

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

Rapport ASN référencé CODEP-DEP-2019-001227



Séance du 9 avril 2019



**Démarche de traitement des écarts affectant les
soudures des lignes vapeur principales en exclusion
de rupture du réacteur EPR de Flamanville**

Date	Le directeur de la direction des équipements sous pression nucléaires de l'ASN
26/03/2019	signé par : S. LIU

SOMMAIRE

REFERENCES	8
SIGLES, ABREVIATIONS ET DENOMINATIONS	13
1. INTRODUCTION	17
2. CONSTITUTION DES LIGNES VVP	20
2.1. Soudures réalisées en atelier	21
2.2. Soudures réalisées sur site	23
3. CADRE REGLEMENTAIRE ET EXIGENCES APPLICABLES AUX SOUDURES DES LIGNES VVP	24
3.1. Défense en profondeur.....	24
3.2. Exclusion de rupture.....	25
3.3. Séance de la section permanente nucléaire (SPN) du 21 juin 2005.....	26
3.4. Exigences spécifiques prises en compte par l'exploitant et le fabricant pour les soudures des lignes VVP en lien avec la démarche d'exclusion de rupture	27
4. ECARTS ASSOCIES AUX DIFFERENTES SOUDURES DES LIGNES VVP	29
4.1. Soudures des traversées d'enceinte	29
4.1.1. Historique	29
4.1.2. Ecart concernant la qualification de mode opératoire de soudage (QMOS)	29
4.1.2.1. Historique des QMOS mises en œuvre :	30
4.1.2.2. Ecart en matière de résilience constatés sur les QMOS :	30
4.1.2.3. Autres écarts constatés sur la QMOS :	30
4.1.2.4. Position du rapporteur sur les écarts affectant la QMOS	31
4.1.3. Ecart concernant les métaux d'apport utilisés	31
4.1.3.1. Choix des métaux d'apport	31
4.1.3.2. Ecart constatés lors des essais de recette.....	31
4.1.3.3. Ecart constatés lors de la réalisation des soudures de production	32
4.1.3.4. Position du rapporteur	33
4.1.4. Ecart concernant les assemblages témoins de soudage (AT)	33
4.1.4.1. Ecart sur les délais de réalisation et de dépouillement des assemblages témoins	33
4.1.4.2. Position du rapporteur :	34
4.1.4.3. Valeurs de résilience non conformes	34
4.1.4.4. Autres écarts détectés sur les assemblages témoins	35
4.1.4.5. Position du rapporteur :	35
4.1.5. Vieillessement sous déformation	36
4.1.5.1. Description du phénomène.....	36
4.1.5.2. Exigences concernant le phénomène de vieillissement sous déformation	37
4.1.5.3. Cas des soudures de traversée	38
4.1.5.4. Position du rapporteur :	39

4.1.6.	Ecart concernant la compacité d'une des soudures de traversée	39
4.1.6.1.	Historique	39
4.1.6.2.	Position du rapporteur :	40
4.1.7.	Autres constats pouvant avoir un impact sur la conformité des soudures au référentiel technique d'exclusion de rupture	40
4.1.7.1.	Nombre de réparations :	40
4.1.7.2.	Position du rapporteur :	41
4.1.7.3.	Analyse des écarts par typologie	41
4.1.7.4.	Position du rapporteur:	44
4.1.8.	Conclusion	45
4.2.	Soudures réalisées sur site	46
4.2.1.	Rappel de l'historique	46
4.2.2.	Ecarts concernant les QMOS	47
4.2.3.	Position du rapporteur	48
4.2.4.	Ecarts concernant les métaux d'apport	48
4.2.5.	Position du rapporteur	49
4.2.6.	Ecarts détectés sur les assemblages témoins.....	49
4.2.6.1.	Valeurs de résilience à -20 °C non conformes	49
4.2.6.2.	Position du rapporteur:	51
4.2.6.3.	Constats questionnant la représentativité des assemblages témoins de soudage	51
4.2.7.	Vieillessement sous déformation	52
4.2.7.1.	Mise en évidence du phénomène	52
4.2.7.2.	Position du rapporteur.....	53
4.2.8.	Etendue des réparations supérieure au critère défini	53
4.2.8.1.	Constat	53
4.2.8.2.	Position du rapporteur.....	53
4.2.9.	Ecarts concernant la détection d'indications dans les soudures après la fin des fabrications.....	54
4.2.10.	Autres constats pouvant avoir un impact sur la conformité des soudures au référentiel d'exclusion de rupture 55	
4.2.10.1.	Absence de réalisation de contrôle par ressuage après un affouillement réalisé lors d'une réparation 55	
4.2.10.2.	Géométrie des cordons de soudures après arasage	55
4.2.10.3.	Position du rapporteur.....	56
4.2.11.	Conclusions.....	56
5.	DEMARCHE DE TRAITEMENT DES ECARTS AFFECTANT LES SOUDURES DES LIGNES VVP ENVISAGEE PAR EDF.....	58
5.1.	Démarche générale de justification présentée par EDF.....	60
5.2.	Position du rapporteur sur la démarche générale de justification présentée par EDF	62
5.3.	Démarche d'EDF appliquée aux soudures de traversée	63
5.4.	Position du rapporteur sur la démarche d'EDF appliquée aux soudures de traversée	64
5.5.	Démarche d'EDF appliquée aux autres soudures	66
5.6.	Position du rapporteur sur la démarche d'EDF appliquée aux autre soudures.....	67

6.	SOUDURES DES TRAVERSEES D'ENCEINTE.....	69
6.1.	Remise en conformité des soudures au référentiel d'exclusion de rupture.....	69
6.1.1.	Eléments constitutifs des traversées d'enceinte VVP	70
6.1.2.	Premier scénario : découpe complète des soudures de traversée et remplacement du flasque	71
6.1.2.1.	Enchaînement des opérations	71
6.1.2.2.	Contraintes opérationnelles et risques associés	73
6.1.3.	Deuxième scénario : découpe complète des soudures de traversée sans remplacement du flasque	74
6.1.3.1.	Enchaînement des opérations	74
6.1.3.1.	Contraintes opérationnelles et risques associés	79
6.1.4.	Troisième scénario : réparations des soudures de traversée avec conservation des passes de racine et de soutien des soudures.....	79
6.1.4.1.	Enchaînement des opérations	79
6.1.4.2.	Contraintes opérationnelles et risques associés	83
6.1.5.	Approvisionnements	84
6.1.6.	Durées de réalisation	84
6.1.7.	Avis du rapporteur	86
6.1.7.1.	Approvisionnements.....	86
6.1.7.2.	Faisabilité et risques associés :	87
6.2.	Renonciation à l'exclusion de rupture	89
6.2.1.	Analyse de l'exploitant.....	89
6.2.2.	Avis du rapporteur	89
6.3.	Justification du maintien en l'état des soudures de traversée d'enceinte VVP	91
6.3.1.	Démarche de traitement des écarts associés à des risques autres que celui de la rupture brutale.....	91
6.3.2.	Démarche vis à vis du risque à la rupture brutale	91
6.3.3.	Démarche vis-à-vis du risque de rupture brutale : caractérisation du matériau des soudures	93
6.3.3.1.	Contexte : utilisation du procédé TIG manuel et fil flux.....	93
6.3.3.2.	Démarche d'EDF	94
6.3.3.3.	Assemblages soudés proposés par EDF pour la caractérisation du matériau.....	95
6.3.3.4.	Méthode de caractérisation	100
6.3.3.5.	Avis du rapporteur concernant la représentativité des matériaux caractérisés	104
6.3.3.6.	Avis du rapporteur concernant les formules de corrélation entre valeurs de ténacité et de résilience 113	
6.3.4.	Mise en évidence du phénomène de vieillissement sous déformation sur les soudures de traversée VVP 116	
6.3.4.1.	Caractérisation du phénomène de vieillissement sous déformation.....	116
6.3.4.2.	Vieillessement sous déformation sur les soudures de traversée VVP	116
6.3.4.3.	Position du rapporteur.....	118
6.3.4.4.	Quantification du phénomène de vieillissement sous déformation	120
6.3.5.	Atteinte des caractéristiques de compacité attendues	124
6.3.5.1.	Rappel des exigences réglementaires	124
6.3.5.2.	Exigences du code RCC-M.....	124
6.3.5.3.	Exigences complémentaires spécifiques au référentiel d'exclusion de rupture	125
6.3.5.4.	Dossier défauts inacceptables.....	125
6.3.5.5.	Comparaison des critères définis dans le code RCC-M et ceux figurant dans le dossier « défauts inacceptables » du fabricant.....	126
6.3.5.6.	Recontrôles des soudures de traversée VVP.....	127
6.3.5.7.	Démarche d'EDF pour justifier la conformité de la compacité des soudures	130
6.3.5.8.	Evaluation de la performance des recontrôles ultrasons	131
6.3.5.9.	Avis du rapporteur sur la compacité des soudures de traversée	133
6.3.6.	Chargements	140
6.3.7.	Marges à la rupture brutale	140
6.3.7.1.	Démarche établie.....	140
6.3.7.2.	Avis du rapporteur.....	141

6.3.8.	Suivi en service renforcé.....	143
6.3.8.1.	Evaluation préliminaire du programme de suivi en service	143
6.3.8.2.	Démarche proposée par EDF en 2018.....	143
6.3.8.3.	Avis du rapporteur concernant la doctrine de suivi en service	144
6.4.	Etudes de robustesse	147
6.5.	Conclusion	148
7.	DEFAUT DETECTE SUR LA SOUDURE DE TRAVERSEE EPP6208TWM-S1	151
7.1.	Démarche de l'exploitant.....	151
7.2.	Caractérisation de l'indication.....	151
7.2.1.	Caractérisation initiale : comparaison entre les contrôles de fin de fabrication et les contrôles contradictoires.....	151
7.2.2.	Expertise complémentaire	153
7.2.3.	Avis du rapporteur	154
7.3.	Scénario de réparation	157
7.3.1.	Contraintes opérationnelles et risques associés	157
7.3.2.	Approvisionnements	157
7.3.3.	Durées de réalisation	158
7.3.4.	Avis du rapporteur	158
7.4.	Analyse la nocivité de cette indication.....	158
7.4.1.	Démarche d'EDF.....	158
7.4.2.	Méthode et hypothèses de calcul	159
7.4.3.	Résultats obtenus	159
7.4.4.	Avis du rapporteur	160
7.4.4.1.	Hypothèses de calculs	160
7.4.4.2.	Résultats obtenus.....	160
7.5.	Modalités définies par l'exploitant pour le suivi en service.....	161
7.6.	Conclusion	162
8.	AUTRES SOUDURES VVP	164
8.1.	Soudures réalisées avec les procédés TIG manuel pour les passes de racine et de soutien et TIG orbital pour les passes de remplissage	165
8.1.1.	Réparation des soudures présentant des défauts de compacité	165
8.1.2.	Compacité des soudures.....	165
8.1.2.1.	Démarche de l'exploitant	165
8.1.2.2.	Avis du rapporteur.....	166
8.1.3.	Cas des soudures qui ont déjà fait l'objet de réparations antérieures	168
8.1.3.1.	Démarche de l'exploitant	168
8.1.3.2.	Avis du rapporteur.....	169
8.1.4.	Phénomène de vieillissement sous déformation affectant les soudures VVP réalisées avec les procédés TIG manuel pour les passes de racine et de soutien et TIG orbital pour les passes de remplissage	169
8.1.4.1.	Rappel concernant le phénomène de vieillissement sous déformation	169
8.1.4.2.	Démarche d'EDF	170
8.1.4.3.	Matériau d'apport EMK35Cr :	170
8.1.4.4.	Matériau d'apport DMOI-G :	171
8.1.4.5.	Avis du rapporteur sur les matériaux nécessitant une quantification du phénomène de vieillissement sous déformation	172
8.1.4.6.	Programme d'essais de quantification du phénomène de vieillissement sous déformation.....	172

8.1.5.	Cas des soudures pour lesquelles des écarts au code RCC-M sont susceptibles de subsister	175
8.1.5.1.	Démarche d'EDF	175
8.1.5.2.	Disposition du paragraphe S7610 du code RCC-M	175
8.1.5.3.	Position du rapporteur vis-à-vis du paragraphe S7610 du code RCC-M.....	176
8.1.5.4.	Désalignement.....	177
8.1.5.5.	Avis du rapporteur.....	178
8.1.6.	Principales conclusions pour les soudures réalisées avec le procédé TIG orbital	178
8.2.	Remise à niveau des soudures non conformes au référentiel d'exclusion de rupture	180
8.2.1.	Conservation des passes de racine et de soutien lors des affouillements	180
8.2.2.	Présence de résidus d'électrodes enrobées après affouillement	181
8.2.3.	Avis du rapporteur	182
8.2.4.	Qualification d'une nouvelle électrode enrobée pour le procédé de réparation TIG et électrodes enrobées	183
8.2.4.1.	Dossier de qualification	183
8.2.4.2.	Note de synthèse relative au retour d'expérience de Framatome sur les électrodes enrobées Tenacito-R	184
8.2.4.3.	Avis du rapporteur.....	184
8.2.5.	Compacité des soudures	185
8.2.6.	Phénomène de vieillissement sous déformation affectant les soudures VVP remises à niveau	186
8.2.6.1.	Démarche d'EDF de remise à niveau des soudures en fonction des matériaux d'apport mis en œuvre initialement sur les soudures VVP réalisées sur site.....	186
8.2.6.2.	Matériau d'apport EMK35Cr :	186
8.2.6.3.	Matériau d'apport EML5 :	186
8.2.6.4.	Matériau d'apport Univers 2M et Cymeta :.....	187
8.2.6.5.	Avis du rapporteur.....	187
8.2.6.6.	Quantification du phénomène de vieillissement sous déformation	188
8.2.7.	Dépassement de la réserve thermique disponible	192
8.2.8.	Cas des soudures pour lesquelles des écarts au code RCC-M sont susceptibles de subsister	192
8.2.9.	Conclusion.....	193
ANNEXE 1	: TABLEAUX ET FIGURES.....	194
ANNEXE 2	: PROCÉDES DE SOUDAGE MIS EN ŒUVRE SUR LES	197
ANNEXE 3	: PROCÉDES DE SOUDAGE INITIAUX MIS EN ŒUVRE SUR LES..	200
ANNEXE 4	: REPARTITIONS DES PROCÉDES DE SOUDAGE MIS EN ŒUVRE SUR LES	202
ANNEXE 5	: EXIGENCES SPECIFIQUES DE FABRICATION APPLICABLES AUX LIGNES VVP EN EXCLUSION DE RUPTURE	203
ANNEXE 6	: ANALYSE COMPARATIVE DES EXIGENCES DE RESILIENCE	204
ANNEXE 7	: EXIGENCES DU RAPPORT DE SURETE RELATIVES AU RISQUE DE RUPTURE BRUTALE POUR LES LIGNES VVP	205

ANNEXE 8 : MATRICE D’EVALUATION DES RISQUES REALISEE PAR EDF RELATIVE AU SCENARIO 3 (AFFOUILLEMENT DES SOUDURES DE TRAVERSEE JUSQU’AUX PASSES DE RACINE ET DE SOUTIEN ET REPLISSAGE PUIS REMISE A NIVEAU AVEC UNE PROCEDE DE SOUDAGE CONFORME AU REFERENTIEL D’EXCLUSION DE RUPTURE).....	207
ANNEXE 9 : INVENTAIRE DES PARAMETRES DE SOUDAGE DE LA SOUDURE S5 ARE3510TY-F02 Q3 ET DES SOUDURES DE TRAVERSEE VVP	209
ANNEXE 10 : VIEILLISSEMENT SOUS DEFORMATION.....	213
ANNEXE 11 : TRAITEMENT RETENU PAR EDF POUR CHAQUE SOUDURE VVP EN EXCLUSION DE RUPTURE (ACCEPTEE EN L’ETAT, REPARATION, REMISE A NIVEAU, JUSTIFICATION EN ECART)	218
ANNEXE 12 : POSITIONS DE SOUDAGE.....	221
ANNEXE 13 : COURRIER EDF D458519013082 DU 15 MARS 2019 : EPR FA3 - GP ESPN - DEMARCHE DE TRAITEMENT DES ECARTS AFFECTANT LES SOUDURES DES LIGNES VAPEUR PRINCIPALES EN EXCLUSION DE RUPTURE DU REACTEUR EPR FA3	222

Références

- [1] DE/MA 050339 : Rapport du Bureau de Contrôle des Chaudières Nucléaires pour la Section Permanente Nucléaire (SPN) du 21 juin 2005 : Examen de la démonstration d'exclusion de rupture des tuyauteries primaires et secondaires principales du réacteur EPR.
- [2] Courrier DGSNR/SDS/FC/MFG N° DEP-SD5-0074-2006 du 13 février 2006
- [3] Courrier CODEP-CAE-2017-009906 du 10 mars 2017 : lettre de suite de l'inspection du 21 février 2017
- [4] Courrier CODEP-DCN-2018-000199 du 2 février 2018
- [5] Courrier EDF D458518037344 du 23 juillet 2018 : Traitements des écarts de fabrication relatifs aux soudures des circuits secondaires principaux
- [6] Courrier de l'ASN à EDF référencé CODEP-DEP-2018-048051 du 2 octobre 2018
- [7] Note EDF D305118007912 rev A du 03 décembre 2018 : démarche de justification de la conformité au Dossier d'Autorisation de Création des lignes vapeur principales de l'EPR de Flamanville.
- [8] Décret n° 2007-534 du 10 avril 2007 modifié autorisant la création de l'installation nucléaire de base dénommée Flamanville, comportant un réacteur nucléaire de type EPR, sur le site de Flamanville (Manche)
- [9] 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)
- [10] Chapitre VII du titre V du livre V du code de l'environnement
- [11] Arrêté du 30 décembre 2015 modifié relatif aux ESPN, dit « arrêté ESPN »
- [12] Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base
- [13] ECEMA040920 indice C du 4 juillet 2007 : Application de l'hypothèse d'exclusion de rupture aux lignes primaires et vapeur principales de l'EPR FA3
- [14] Note Framatome RFP 79710 REC du 08 juillet 2016
- [15] RFP 77269 REC : Courrier AREVA du 06/11/2015 relatif au CT 13-0434 – Réponse au channel EDF RED 42017 RFP
- [16] Note D458519005547 EPR FA3 : compléments de réponse au courrier de recevabilité CODEP-DEP-2018-058957 de la démarche proposée par EDF du traitement des écarts de fabrication des soudures VVP en Exclusion De Rupture de l'EPR de Flamanville
- [17] INSSN-DEP-2018-0286 du 12 juin 2018 : Inspection de l'ASN du fabricant Framatome dans les ateliers Nordon à Nancy.
- [18] Courrier EDF D309518036062 du 12 novembre 2018 : Mise à jour de la note relative au bilan de la prise en compte des critères Exclusion De Rupture
- [19] Courrier EDF D305117066286 du 01 décembre 2017 : Programme de travail engagé pour démontrer l'application de l'Exclusion de Rupture aux lignes vapeur suite aux problématiques rencontrées en fabrication
- [20] Courrier EDF D305118024706 : Analyses mécaniques réalisées pour démontrer la tenue à la rupture brutale
- [21] D02-ARV-01-124-714 Etude de faisabilité d'une remise en conformité des soudures sur la ligne VVP exclusion de rupture
- [22] Note Framatome D02-DTIMM-F-18-0422_D du 21 Décembre 2018 : Programmes d'essais complémentaires : VSD Résilience Macro structure
- [23] Courrier EDF D458518015687 du 10 avril 2018 : non détection de défauts de soudures sur le circuit secondaire principal lors de contrôles non destructifs en phase de fabrication
- [24] Courrier EDF D458518025924 du 18 mai 2018 : Premiers éléments d'analyse de l'évènement significatif du 10 avril 2018

- [25] Note Framatome référencée D02-ARV-01-130-933 rev B: Scénario de coupe et réparation des soudures W1 et W2 des traversées VVP
- [26] Note Framatome référencée D02-ARV-01-130-930 rev B : Scénario de réparation des soudures W1 et W2 des traversées VVP.
- [27] Note Framatome référencée D02-ARV-01-129-532_B_BPE : Scénario de réparation de la soudure W1 de la traversée EPP6208TWM
- [28] Note D02-ARV-01-121-360 A : Analyse des impacts du renoncement à l'exclusion de rupture des lignes vapeurs de l'EPR de Flamanville (Courrier EDF D305118015138)
- [29] Courrier EDF D305117036114 du 13 Juillet 2018 : EPR FA3 – FA 15-10899 – Exclusion de rupture : soudures des traversées VVP – complément d'information.
- [30] Note Framatome D02-ARV-01-125-375 A : Synthèse des essais mécaniques complémentaires réalisés dans le cadre du dossier soudures C-Mn VVP.
- [31] Note Framatome D02-DTIMM-F-18-0628 A : Programme de caractérisation des propriétés de ténacité d'une soudure de traversée fil-flux Q3 de la ligne ARE FA3
- [32] Courrier EDF – D458518064518 du 16 novembre 2018 : « EPR FA3 – Exclusion de rupture des lignes VVP utilisation des résultats du programme d'essais sur une soudure ARE Q3 pour justifier la tenue mécanique des traversées VVP ».
- [33] Note Framatome – D02-ARV-01-090-173 rev.B du 15 décembre 2015 : « Analyse technique sur les résiliences du coupon témoin CT13-0434 »
- [34] Note Framatome – D02-ARV-01-135-981 rev.B du 18 décembre 2018 : « Etude des soudures de la ligne ARE Q3 représentatives des soudures de traversée VVP ».
- [35] Note Framatome D02-DTIMM-F-18-0908 A : Représentativité de la soudure ARE3510TY-F02 S5.
- [36] Note EDF D4002.92-04/CN088GRD indice 3 du 02/07/2007
- [37] ENSN-040134 ind B : Exclusion de rupture de tronçons de tuyauteries CPP-CSP – Positionnement de la démarche et référentiel des exigences de sûreté associées
- [38] NQS-F DC 1026 rev D du 2 octobre 2007 : EPR FA3 – Accessibility and Inspectability for the in-service inspection of the break preclusion areas – Girth welds of the main primary loops and main steam lines
- [39] Courrier CODEP-DEP-2017-041134 du 23 octobre 2017 : Transmission des programmes de contrôle du circuit primaire principal et des circuits secondaires principaux du palier EPR
- [40] Courrier EDF D455018003008 du 11 avril 2018 : Présentation des principes de surveillance des équipements CPP/CSP de FLA3
- [41] Courrier EDFD458517063160 du 30 novembre 2017 : EPR FA3 – Déclaration de l'évènement significatif relatif à l'absence de déclinaison opérationnelle d'exigences de fabrication spécifiques à l'exclusion de rupture pour les lignes primaires et vapeur principales
- [42] Note AREVA – NEEM-F DC 72 rev.C du 24 juin 2015 : « dossier matériau acier C-Mn P355 pour tuyauteries secondaires ».
- [43] Note EDF - D309518019787 ind.A du 21 juin 2018 : « avis technique DI- Vieillessement sous déformation – cas des soudures du circuit VVP et ARE »
- [44] Note Framatome – EE/S.DC.878 rév.B du 02 mai 2002 : « dossier réglementaire de référence lot 3 – matériaux »
- [45] Note Framatome – EES DC 487 rev.B du 12 mars 1997 : « Dossier CSP N4 – transition de ténacité et résistance à la déchirure des aciers C-Mn et joints soudés ».
- [46] Note EDF A4/94/006/A (1994) : « Étude bibliographique du phénomène de vieillissement statique des aciers constituant les tuyauteries secondaires des centrales REP ».
- [47] Courrier EDF D458518047544 du 07 septembre 2018 : « EPR Flamanville – CSP – Réponse au courrier CODEP-DEP-2018-043266 ».

- [48] Courrier EDF D458518062284 du 6 novembre 2018 : « EPR FA3 – Exclusion de rupture des lignes VVP : méthode d'écrouissage de la matière du programme d'essais pour quantifier le vieillissement sous déformation des métaux d'apport utilisés pour le remplissage des soudures ».
- [49] Courrier EDF D458518066298 du 22 novembre 2018 : « EPR FA3 – Exclusion de rupture des lignes VVP : méthode d'écrouissage de la matière du programme d'essais pour quantifier le vieillissement sous déformation des métaux d'apport utilisés pour le remplissage des soudures (compléments) ».
- [50] Note WOOD 208374TR0001 rev. D du 30 octobre 2018 « Compression cold forging of steel with digital image correlation ».
- [51] Note Framatome D02-ARV-01-128-589 rev A du 29/06/2018 : Défauts Inacceptables – Tuyauteries secondaires carbone - Traversée d'enceinte
- [52] Procédure Nordon-Ponticelli NDNP 128001-0505 : FA3 – EM4 : Examen par ultrasons-soudures de production à pleine pénétration & beurrage – Q1 et Q2 RCCM 2007
- [53] NDNP 128001-0501 :FA3 – EM4 : Examen par radiographie des soudures de production Q1-Q2 RCCM 2007
- [54] Note EDF D458518033651 du 27 juin 2018 : Réponses EDF aux questions A1 et B4 de la lettre de suite CODEP-CAE-2018-018979
- [55] Note EDF D309518033868 du 14/11/2018 : Surveillance des activités de contrôle
- [56] Note EDF D309519003908 du 04/02/2019 : Réponse à la question CND1 du JPO « écarts lignes VVP » : avancement de la relecture des radiogrammes
- [57] Avis technique EDF D309518011032 ind A du 11/04/2018 : Avis technique EDF/DI : contrôle par ultrasons automatisés des soudures des traversée BR de l'EPR FA3 – Procédure d'examen (partie acquisition) pour le contrôle pré-VCI des soudures
- [58] Avis technique EDF D309518011966 ind B du 25/05/2018 : Avis technique EDF/DI : contrôle par ultrasons automatisés des soudures des traversées BR de l'EPR FA3 – Procédure d'analyse des acquisitions pour le contrôle pré-VCI des soudures
- [59] Avis technique EDF D309518011627 ind A du 6 avril 2018 : Avis DI/SEND sur la procédure 128001-0505 rev U
- [60] D309515011153 ind A du 29/05/2015 : attestation de qualification du procédé UT36
- [61] EB08490-G53 ind B du 30 mars 2015 : Synthèse de qualification : Examen par ultrasons automatisés des soudures de raccordement flasque sur tuyauteries des traversées BR des lignes ARE/VVP de l'EPR
- [62] Courrier ASN CODEP-DEP-2018-027796 du 11 juin 2018 : Saisine IRSN relative aux performances des examens non destructifs par ultrasons réalisés à l'occasion de la reprise de ces contrôles sur les soudures des lignes VVP en exclusion de rupture
- [63] Avis IRSN 2018-00301 du 12 novembre 2018 relatif à la Saisine IRSN relative aux performances des examens non destructifs par ultrasons réalisés à l'occasion de la reprise de ces contrôles sur les soudures des lignes VVP en exclusion de rupture
- [64] Courrier EDF D309518037455 rev A du 3 décembre 2018 : Réponse aux questions formulées par l'IRSN dans son avis FT/AV/PSN/2018-00175
- [65] CODEP-DEP-2018-056293 du 13 décembre 2018 : Examens par ultrasons des soudures du CSP
- [66] D4002.92-04/CN088GRD indice 3 du 02/07/2007 : Plan Initial de Maintenance (état préliminaire) de l'EPR FA3
- [67] EB09474-G11 ind F du 25 février 2014 : Procédure d'examen par ultrasons automatisés des soudures de raccordement flasque sur tuyauterie des traversées BR des lignes ARE/VVP des paliers P4, P'4 et N4
- [68] EDEND132111 ind B du 26 février 2014 : Fiche de performances de la procédure EB09474-G11 inf F

- [69] Note EDF D458518073493 du 7 janvier 2019 : EPR FA3 - Examen par ultrasons des soudures du CSP
- [70] Courrier ASN CODEP-DEP-2018-058957 du 07 janvier 2019
- [71] Note EDF D309518034005 rev A du 23 octobre 2018 : synthèse des résultats des contrôles contradictoires CND par ultrasons
- [72] D309518016601 : Rapport d'examen de la soudure EPP6208TWM-S1 EDF/DI/DISA
- [73] D309518019486 rev C du 21/09/2018 : Avis technique sur le dimensionnement de l'indication n° 9 relevée sur la soudure EPP6208TWM-S1
- [74] EB08490-G10 ind D du 31 mars 2015 : Procédure d'examen UT automatisé
- [75] Courrier ASN CODEP-CAE-2018-018979 du 18 avril 2018
- [76] Courrier EDF D458519002554 du 25 janvier 2019 : Réponse au courrier ASN CODEP-DEP-2018-058957
- [77] Arrêté du 24 mars 1978 portant réglementation de l'emploi du soudage dans la construction et la réparation des appareils à pression
- [78] Note Framatome D02-ARV-01-128-269 rev C : Défectologie du CSP
- [79] Note EDF D309519002473 du 21 janvier 2019 : Analyse des CND mis en œuvre sur les soudures en exclusion de rupture du CSP de l'EPR FA3
- [80] Procédure NDNP 128001-0633 du 14 août 2015 : Procédure GMES de mise en peinture pour FA3-EM4
- [81] Courrier EDF D458518073496 du 13 décembre 2018 EPR FA3 : Examens par ultrasons des soudures du CSP
- [82] Note Framatome D02-DTIMR-18-0474 rév. B du 6 juillet 2018 : Calcul de propagation et de stabilité
- [83] Note Framatome D02-ARV-01-115-743 rév. E du 27 avril 2018 : Caractéristiques des soudures couvertes par le CT 13.0434
- [84] Note Framatome NESP-F DC 205 rev. C du 29 mai 2009 : Dimensionnement de composants de tuyauterie Q1 des lignes secondaires principales
- [85] Note Framatome IBSEE-F 19-348 rev 0 du 01 février 2019 : EPR FA3 : Présence de zones de dilutions résiduelles lors de la réparation des soudures du CSP avec l'électrode enrobée Tenacito R : avis technique
- [86] Note Framatome D02-ARV-01-133-118 rev G du 16 novembre 2018 : Qualification de l'électrode Tenacito R pour les soudures soumises à Exigence de Rupture Compléments d'essais sur assemblage RCCM Tome IV -§ S5300
- [87] Note Framatome D02-ARV-01 139-351 rev A du 30 janvier 2019 : Dossier de synthèse - Tenacito R
- [88] Courrier EDF D458519008158 rev B du 20 février 2019 : EPR FA3 – Exclusion de rupture des lignes VVP : premiers résultats obtenus sur la soudure ARE6510TY-F02 S5
- [89] Courrier EDF D309519006883 rev A du 22 février 2019 : Réponse EDF à la question complémentaire CND1 du JPO écarts VVP
- [90] Courrier EDF D309519006621 rev A du 22 février 2019 : Réponse EDF à la question CND8 du JPO écarts VVP
- [91] Courrier EDF D309519003340 rev A du 4 février 2019 : Avis technique DI pour les réponses aux questions CND1 et CND3 de l'ASN/DEP
- [92] Note Framatome – EE/S.DC.878 rév. B du 02 mai 2002 : « dossier réglementaire de référence lot 3 – matériaux ».
- [93] Courrier CODEP-DEP-2018-049173 du 18 décembre 2018 : Saisine de l'IRSN pour « Les caractéristiques mécaniques des soudures fil-flux réalisées en préfabrication et caractérisation du phénomène de vieillissement sous déformation »
- [94] Arrêté du 10 novembre 1999 modifié relatif à la surveillance de l'exploitation du circuit primaire principal et des circuits secondaires principaux des réacteurs nucléaires à eau sous pression

- [95] Courrier EDF D458519004466 du 25 janvier 2019 Utilisation Ténacito R
- [96] Courrier EDF D458518070635 du 14 décembre 2018 Présentation Ténacito R
- [97] Directives Techniques pour la conception et la construction de la prochaine génération de tranches nucléaires à eau pressurisée » adoptées pendant les réunions plénières du GPR et des experts allemands les 19 et 26 octobre 2000.
- [98] Courrier EDF D458519013082 du 15 Mars 2019 : EPR FA3 - GP ESPN - Démarche de traitement des écarts affectant les soudures des lignes vapeur principales en exclusion de rupture du réacteur EPR FA3 – Projets de Positions et Actions EDF
- [99] Courrier EDF D309519003921 rev A du 4 février 2019 : Réponse EDF à une question technique de l'ASN : bilan des recontrôles par ressuage et des relectures des radiogrammes pour les 8 soudures de traversée VVP
- [100] Courrier EDF D309518034904 du 31 octobre 2018 : Impact du désaccostage sur la contrôlabilité de la soudure VVP FW7 train 4
- [101] Avis IRSN référencé IRSN/2019-00057 du 22 mars 2019: Exigences d'exclusion de rupture et défauts non détectés lors de contrôle de fin de fabrication

Sigles, abréviations et dénominations

AFCEN :	Association Française pour les règles de conception et de construction des matériels des Chaudières Électro Nucléaires
ARE :	Circuit d'alimentation normale en eau des GV
ASN :	Autorité de sûreté nucléaire
ASTM :	American society for testings and materials
AT :	Assemblage témoin de soudage
AVG :	Amplitude distance gain dimension
BAS :	Bâtiment auxiliaire de sauvegarde
BCCN :	Bureau de contrôle des chaudières nucléaires
BR :	Bâtiment réacteur
BL :	Bâtiment électrique
CCAP :	Commission centrale des appareils à pression
CIVA :	Logiciel d'analyse et de modélisation des données de contrôle non destructif développé par le CEA
CND :	Contrôles non destructifs
COFREND :	Confédération française des essais non destructifs
CSP :	Circuit secondaire principal
CT :	Éprouvette « Compact tension » destinée à réaliser un essai de ténacité
Cyméta :	Désignation commerciale d'un produit d'apport utilisé avec le procédé électrodes enrobées
DAC :	Décret d'autorisation de création d'une installation nucléaire de base
DI :	Défauts inacceptables
DEP :	Direction des équipements sous pression nucléaires de l'ASN
DMOI-G :	Métal d'apport sous forme d'un fil pour le procédé TIG Orbital
DMOS :	Descriptif de mode opératoire de soudage

DN :	Diamètre nominal
DRB :	Dossier rupture brutale
ΔT_v :	Décalage de la température de transition fragile-ductile (en °C)
EDF/DI :	Direction industrielle d'EDF
EE :	Électrode enrobée (produit d'apport) pour procédé de soudage à l'arc
EH :	Épreuve hydraulique
END :	Essais non destructifs
EPR :	European pressurized reactor
ES :	Évènement significatif
ESPN :	Équipement sous pression nucléaire
EMK35Cr :	Désignation commerciale d'un métal d'apport utilisé avec le procédé TIG manuel
EML5 :	Désignation commerciale d'un métal d'apport utilisé avec le procédé TIG manuel
FA :	Fiche d'anomalie
FA3 :	Réacteur n° 3 de la centrale nucléaire de Flamanville
FMOS :	Fiche de mode opératoire de soudage
FNC :	Fiche de non-conformité
FOH :	Facteurs organisationnels et humains
FSS :	Fiche de suivi de soudures
GP ESPN :	Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires
GMES :	Groupement momentané d'entreprises solidaires
GV :	Générateur de vapeur
INB :	Installation nucléaire de base
IRSN :	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
$J_{0,2}$:	Résistance à la déchirure ductile mesurée pour une propagation de 0,2 mm (en N.m ⁻²)
J_S :	Méthode simplifiée de rupture brutale codifiée dans le RSE-M
K_{CP} :	Facteur d'intensité de contraintes (en MPa.m ^{0,5})

K_{Jc} :	Ténacité (en MPa.m ^{0,5})
K_v :	Résilience d'un matériau (en J) à une température donnée
MWe :	Mégawatt électrique
MEL:	Masse et énergie libérées
NAR :	Notification with Acknowledgement of Receipt (modification de spécifications contractuelles)
N4 :	Réacteurs français d'EDF de 1450 MWe (réacteurs 1 et 2 de la centrale nucléaire de Civaux, réacteurs 1 et 2 de la centrale nucléaire de Chooz B)
NDT :	Nil Ductility Transition
OL3 :	Réacteur EPR d'Olkiluoto (Finlande)
PC :	Définit une configuration de soudage d'une soudure bout à bout sur une tuyauterie fixe dont l'axe est vertical et pour laquelle le soudeur déplace sa torche de soudage dans un plan horizontal
PF :	Définit une configuration de soudage d'une soudure bout à bout sur une tuyauterie fixe dont l'axe est horizontal et pour laquelle le soudeur déplace sa torche de soudage dans un plan vertical en sens montant
PV :	Procès-verbal
QMOS :	Qualification de mode opératoire de soudage
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)
RFM :	Rapport de fin de montage
RDS :	Rapport de sûreté
REP :	Réacteur à eau sous pression
RGE :	Règles générales d'exploitation
RGV :	Remplacement de générateur de vapeur
R_m :	Résistance à la traction (en MPa)
$R_{p0,2}$:	Limite d'élasticité conventionnelle pour une déformation de 0,2 % (en MPa)
RPE :	Système de purge et d'évent

RPS : Rapport préliminaire de sûreté

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)

RTHE : Rupture de tuyauterie haute énergie

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

SPN : Section permanente nucléaire de la CCAP

Tenacito-R : Désignation commerciale d'un produit d'apport utilisé avec le procédé électrodes enrobées

TIG : Tungsteninert gaz (procédé de soudage)

Univers 2M : Désignation commerciale d'un produit d'apport utilisé avec le procédé électrodes enrobées

UT : Ultrasons

VCI : Visite complète initiale

VDA : Vanne de décharge à l'atmosphère

VIV : Vanne d'isolement vapeur

VVP : Circuit de vapeur principal

ZAT : Zone affectée thermiquement

1. Introduction

EDF a souhaité soumettre les tuyauteries VVP des circuits secondaires principaux du réacteur EPR de Flamanville à des exigences renforcées visant à prévenir leur rupture avec un haut niveau de confiance, afin de ne pas retenir la rupture de ces tuyauteries dans les événements initiateurs à prendre en compte dans la démonstration de sûreté nucléaire du réacteur. Le rapport préliminaire de sûreté (RPS) transmis par EDF dans le cadre de la demande d'autorisation de création du réacteur EPR de Flamanville prévoit ainsi une démarche d'exclusion de rupture des tuyauteries VVP, de la sortie du générateur de vapeur jusqu'au point fixe en aval de la vanne d'isolement vapeur.

Cette démarche, en particulier les contreparties qu'elle nécessite, a fait l'objet, sur la base du rapport en référence [1], d'un avis de la Section permanente nucléaire (SPN) de la Commission centrale des appareils à pression le 21 juin 2005 et de la lettre de suite en référence [2], qui définissent les bases d'un référentiel technique d'exclusion de rupture.

EDF a informé l'ASN début 2017 de l'existence de « *fiches de non-conformité concernant les exigences du référentiel d'exclusion de rupture* » pour huit soudures sur les traversées de l'enceinte de confinement du réacteur EPR de Flamanville, soudures qui avait été réalisées en usine. EDF avait alors précisé que cet écart, détecté en juillet 2015, concernait des exigences qui n'avaient pas été spécifiées par le fabricant Framatome au sous-traitant en charge de la réalisation de ces soudures. Cet écart n'a pas été détecté par la surveillance d'EDF.

Une inspection de l'ASN, le 21 février 2017, a permis de constater que, pour les autres soudures des tuyauteries VVP, réalisées sur site, ces exigences spécifiques au référentiel d'exclusion de rupture n'étaient pas non plus connues des intervenants.

Le 19 octobre 2017, EDF a présenté à l'ASN et l'IRSN, au cours d'une réunion technique, la démarche qu'elle a initiée à la suite du non-respect du référentiel d'exclusion de rupture et les différentes anomalies identifiées à cette date (critères de résilience non atteints, mise en évidence d'un phénomène de vieillissement sous déformation et traitements thermiques de détensionnement non effectués). La démarche se limitait¹ à la justification de la résistance des tuyauteries VVP vis-à-vis de la rupture brutale au moyen de caractérisations mécaniques complémentaires et de calculs de rupture brutale spécifiques.

Le 30 novembre 2017, EDF a déclaré un événement significatif pour la sûreté relatif à « *l'absence de déclinaison opérationnelle d'exigences de fabrication spécifiques à l'exclusion de rupture* ».

L'ASN a considéré, dans son courrier du 2 février 2018 en référence [4], que la démarche proposée par EDF n'était pas acceptable en l'état et a demandé la transmission d'un dossier autoportant venant compléter cette démarche. Ce dossier devait notamment analyser la possibilité de réaliser à nouveau les soudures concernées ou de réapprovisionner des tuyauteries concernées dans l'objectif de les remplacer, d'étudier la possibilité de renoncer à tout ou partie du référentiel exclusion de rupture et de préciser, en les justifiant, les mesures compensatoires qu'EDF prévoit, notamment en ce qui concerne le suivi en service des équipements.

¹ A l'exception des traitements thermiques de détensionnement qui ont été réalisés *a posteriori*.

En mars 2018, EDF a informé l'ASN de la présence d'indications qui n'avaient pas été détectés lors des contrôles de fin de fabrication de certaines soudures des tuyauteries des circuits secondaires principaux. Ce constat a conduit EDF à réaliser une campagne de recontrôles sur 150 soudures de ces circuits, dont font partie les 66 soudures des tuyauteries VVP en exclusion de rupture. Ces recontrôles ont permis de faire un état des lieux complet des indications encore présentes dans les soudures à l'issue des fabrications.

Dans son courrier du 23 juillet 2018 en référence [5], EDF informait l'ASN de la démarche qu'elle envisageait pour le traitement des écarts relatifs au référentiel exclusion de rupture et des défauts de compacité² des matériaux, qui comprenait la réparation ou remise à niveau³ de certaines soudures et le maintien en l'état d'autres soudures des lignes VVP en exclusion de rupture, en particulier les soudures des traversées de l'enceinte de confinement, qui seraient alors traitées « en écart au référentiel d'exclusion de rupture ».

Dans son courrier du 2 octobre 2018 en référence [6], l'ASN notait favorablement qu'EDF privilégiait, pour certaines soudures des lignes VVP en exclusion de rupture, une remise à niveau permettant de respecter les spécifications définies par le fabricant pour déclinier les exigences du référentiel d'exclusion de rupture en matière de résilience. Dans ce courrier, l'ASN rappelait la nécessité de justifier l'atteinte des objectifs prescrits par le décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base et demandait la transmission d'un dossier autoportant venant notamment préciser les actions préalables nécessaires à une remise en conformité des soudures, ainsi que la justification de la démarche de maintien en l'état envisagée par EDF pour certaines soudures.

En réponse à ce courrier, EDF a transmis, par la note du 3 décembre 2018 en référence [7], la démarche pour justifier la conformité au décret d'autorisation de création (DAC) en référence [8] des soudures des lignes vapeur principales.

*

L'ASN souhaite recueillir l'avis du GP ESPN sur l'acceptabilité de la démarche proposée par EDF de traitement des écarts affectant les soudures des lignes vapeur principales en exclusion de rupture du réacteur EPR de Flamanville.

*

Le présent rapport présente la démarche de traitement des écarts affectant les soudures des lignes VVP en exclusion de rupture proposée par EDF et évalue si ce traitement permet de répondre aux objectifs visés par la démarche d'exclusion de rupture, en particulier ceux prescrits par le

²(extrait de la norme NF ISO 6520-1 et 2) :

« Défaut de compacité : sont considérés comme défauts de compacité dans les matériaux soudés les discontinuités macroscopiques affectant le comportement mécanique de l'ensemble soudé. En particulier les discontinuités dans le réseau cristallin (lacune, dislocation, ...) ne sont pas considérées comme des défauts de compacité. Les défauts de compacité peuvent donc être des altérations du métal lui-même (fissure, retassure, porosité, ...) ou des inclusions endogènes (déjà présentes dans le métal de base), ou exogènes (provenant du procédé de soudage). Ces discontinuités sont présentes dans l'épaisseur de la pièce, mais peuvent également déboucher en surface. Elles affectent d'abord la zone fondue, mais peuvent s'étendre à la zone affectée thermiquement, voire au métal de base adjacent à la soudure. Elles peuvent être classées en 2 catégories : les défauts volumiques pour lesquels les dimensions suivant les 3 axes sont similaires, les défauts non-volumiques pour lesquels une des dimensions est très inférieure aux 2 autres. »

³Réparation, remise à niveau : EDF distingue les « réparations », qui consistent en l'élimination locale des défauts de compacité d'une soudure, des « remises à niveau », qui consistent à enlever l'ensemble des passes de remplissage des soudures concernées en conservant donc les passes de racine et de soutien et refaire les passes de remplissage avec un procédé de soudage permettant de répondre aux exigences spécifiées par le fabricant en lien avec le référentiel d'exclusion de rupture.

décret d'autorisation de création de l'installation. Il aborde successivement les différents écarts affectant les soudures, la démarche de traitement de ces derniers proposé par EDF puis l'analyse faite par le rapporteur de cette démarche en distinguant le cas des soudures de traversée de l'enceinte de confinement, dont une présente en outre un défaut de compacité, du cas des autres soudures. Il présente les recommandations faites par le rapporteur à la suite de son analyse des différents scénarios de traitement des écarts. Il prend également en considération les propositions de positions et d'actions transmises par EDF dans son courrier du 15 mars 2019 en annexe 13 en réponse aux premiers résultats de l'instruction du rapporteur transmis à EDF début mars 2019.

Les recommandations qui sont émises par le rapporteur dans le présent rapport ont été établies sur la base des écarts connus à la date de rédaction du rapport. En effet, EDF poursuit le recensement des écarts affectant chacune des soudures VVP en exclusion de rupture. L'exploitant devra, lors de l'établissement de cet état des lieux, analyser l'impact de chacun des écarts, et le cas échéant leurs cumuls, vis-à-vis du respect des différentes exigences applicables aux soudures concernées. Les conclusions de cette analyse pourraient remettre en cause certaines positions prises par le rapporteur dans le présent rapport.

*

Le présent rapport a été élaboré par la direction des équipements sous pression nucléaires (DEP) de l'ASN avec l'appui technique de l'IRSN en particulier pour les examens non destructifs des soudures et la caractérisation des matériaux des soudures⁴. Le terme « rapporteur » utilisé dans le présent rapport désigne les spécialistes de l'ASN ayant analysé le dossier d'EDF en vue d'une présentation devant le groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires. Il ne présume pas la position qu'adoptera *in fine* l'ASN.

⁴ L'IRSN a transmis à l'ASN les deux avis techniques suivants :

- avis IRSN 2018-00301 du 12 novembre 2018 relatif à la saisine IRSN relative aux performances des examens non destructifs par ultrasons réalisés à l'occasion de la reprise de ces contrôles sur les soudures des lignes VVP en exclusion de rupture ;
- avis IRSN 2019-00057 du 22 mars 2019 relatif aux exigences d'exclusion de rupture et aux défauts non détectés lors de contrôle de fin de fabrication.

2. Constitution des lignes VVP

Le circuit secondaire a pour rôle de convertir l'énergie thermique produite par la chaudière nucléaire en énergie électrique. Le circuit eau-vapeur secondaire est un circuit fermé. La vapeur provient du secondaire des générateurs de vapeur. Les lignes principales d'évacuation de la vapeur (« lignes vapeur principales » ou encore lignes VVP) acheminent la vapeur vers une turbine accouplée à un alternateur.

La Figure 1 présente les principaux éléments constitutifs d'une ligne VVP.

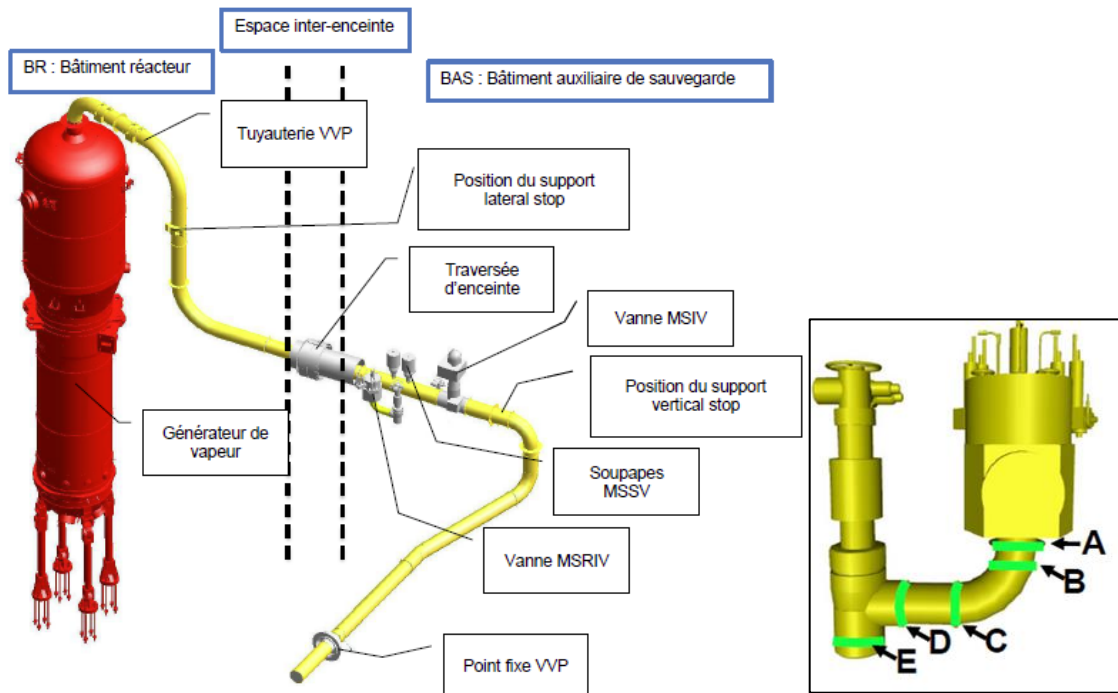


Figure 1 : Principaux éléments constitutif d'une ligne VVP

EDF a choisi d'appliquer une démarche d'exclusion de rupture (se référer au paragraphe 3.2) pour l'ensemble des soudures et tuyauteries des lignes VVP suivantes :

- les soudures et tronçons de tuyauteries situés entre le raccordement à la sortie vapeur du générateur de vapeur et le raccordement au point fixe (cf. Figure 2) situé en aval de la vanne d'isolement vapeur ;
- les soudures de raccordement avec les flasques des traversées de l'enceinte du réacteur ;
- les soudures et piquages de raccordement avec des équipements périphériques situés à l'extérieur du bâtiment réacteur (BR) : vanne d'isolement vapeur, vannes de décharge à l'atmosphère et soupapes de sûreté.

Au total 66 soudures de ces lignes VVP sont concernées par cette démarche d'exclusion de rupture.

Les principales caractéristiques des lignes VVP en exclusion de rupture sont les suivantes :

- diamètres nominaux (DN) : 200 mm, 300 mm ou 750 mm ;
- épaisseur nominale de 41 mm sur les composants de la ligne hors clarinette (59 mm) ;
- acier carbone-manganèse micro-allié de type P355NH ou P355QH ;
- tubes et coudes forgés ;
- matériel de niveau 1 suivant le code de construction RCC-M.

Ces lignes VVP constituent des équipements sous pression nucléaires (ESPN) de niveau N1, qui correspond au niveau de risque le plus élevé prévu par la réglementation ESPN.

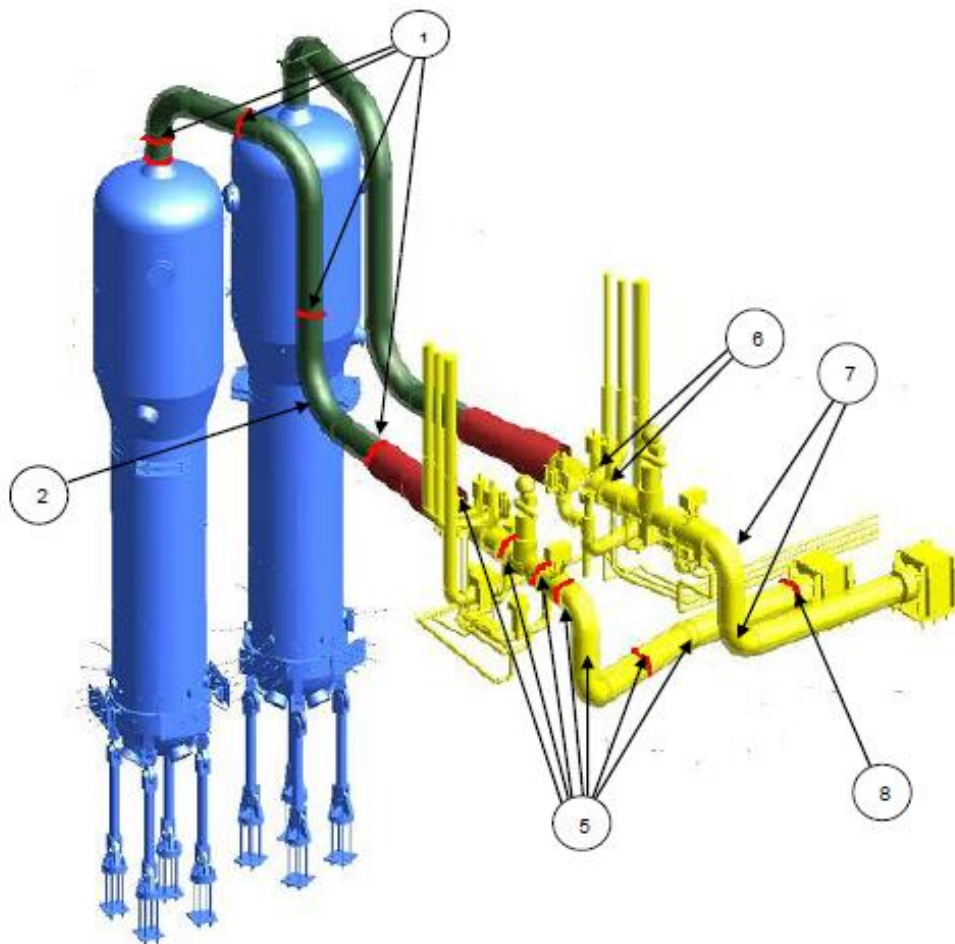
La réalisation des circuits secondaires principaux a été confiée par EDF au fabricant Framatome.

2.1. Soudures réalisées en atelier

Parmi les 66 soudures en exclusion de rupture des lignes VVP, 8 soudures sont dites « soudures de traversée d'enceinte ». Ces soudures sont situées au niveau de la traversée de la double enceinte de confinement qui relie l'enceinte du bâtiment réacteur (BR) à celle du bâtiment auxiliaire de sauvegarde (BAS)⁵.

La Figure 2 schématise les 2 soudures de traversée (référence 3 et 4) sur un train VVP, de part et d'autre du flasque.

⁵Le réacteur EPR compte quatre boucles autour desquels sont organisés quatre sous-systèmes de sûreté (appelés « trains »). On retrouve alors quatre traversées de la double enceinte de confinement. Chaque traversée compte deux soudures.



1. Soudures circulaires et soudure de raccordement au GV
2. Extrados du dernier cintre en amont de la traversée BR
3. Soudure de raccordement de l'embout au flasque de la traversée
4. Soudure de raccordement de l'embout au flasque de la traversée
5. Soudures circulaires y compris les soudures de raccordement aux vannes d'arrêt
6. Soudures de raccordement des soupapes
7. Zones à l'extrados des cintres
8. Soudure circulaire de raccordement au point fixe.

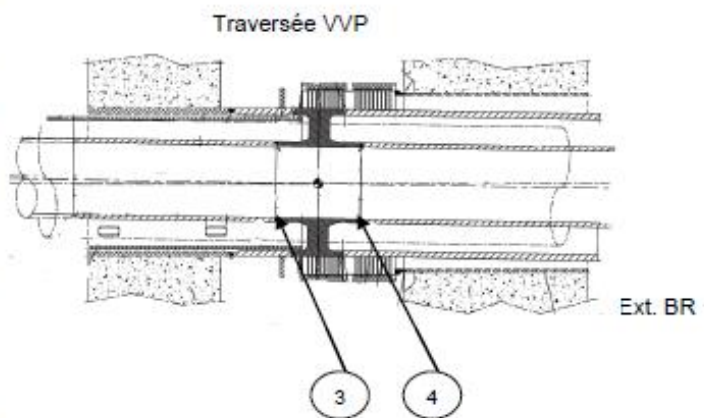


Figure 2 : Soudures de traversée d'enceinte d'un train VVP

Les huit soudures de traversée VVP (2 soudures par train) ont été réalisées entre octobre 2012 et mars 2014 dans les ateliers de la société Nordon à Nancy par le groupement momentanée d'entreprise solidaires (GMES) Nordon-Ponticelli, sous-traitant du fabricant Framatome. Elles constituent des tronçons de traversée qui, une fois préfabriqués en atelier, ont été acheminés sur site pour être raccordés aux autres tronçons de tuyauteries soudés séparément sur site.

Le mode opératoire de soudage utilisé pour les soudures de traversée est le procédé TIG manuel pour les passes de racine et de soutien et le procédé « fil flux » semi-mécanisé pour les passes de remplissage et de finition. Les procédés de soudage mis en œuvre sur les soudures des traversées d'enceinte sont rappelés et détaillés en annexe 2.

2.2. Soudures réalisées sur site

L'ensemble des 58 autres soudures des lignes VVP concernées par une démarche d'exclusion de rupture a été réalisé sur le site de Flamanville. Les opérations de soudage sur site ont débutées, pour ces 58 soudures, en avril 2015. Elles ont également été réalisées par le GMES Nordon-Ponticelli.

Ces opérations de soudage ont impliqué des procédés de soudage variés avec du TIG manuel, du TIG et électrodes enrobées et du TIG orbital. Les procédés de soudage mis en œuvre sur les soudures réalisées sur site sont rappelés en annexe 3.

La répartition des procédés de soudage sur les différentes soudures VVP est rappelée en annexe 4. A noter que certaines soudures ont pu faire l'objet de réparations avec des procédés différents de ceux mis en œuvre pour leur réalisation initiale.

3. Cadre réglementaire et exigences applicables aux soudures des lignes VVP

Différentes exigences sont applicables aux 66 soudures des lignes VVP en exclusion de rupture. Tout d'abord le décret d'autorisation de création de l'installation en référence [8] fixe des exigences auxquelles le réacteur EPR de Flamanville doit être conforme. Ce décret prévoit en particulier des dispositions encadrant la démarche d'exclusion de rupture des lignes VVP.

Les dispositions de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base en référence [12] s'applique également à l'EPR de Flamanville.

Enfin les tuyauteries VVP sont des équipements sous pression nucléaires (ESPN), et la réglementation applicable à la fabrication des lignes VVP de l'EPR de Flamanville est celle applicable aux ESPN de niveau N1⁶. Elle est notamment constituée des textes suivants :

- le chapitre VII du titre V du livre V du code de l'environnement en référence [10] ;
- l'arrêté du 30 décembre 2015 modifié relatif aux ESPN en référence [11] ;
- certaines dispositions de la directive 2014/68/UE du 15 mai 2014 en référence [9] appelées par l'arrêté du 30 décembre 2015 susmentionné.

Le présent chapitre détaille les exigences règlementaires applicables à la conception et à la fabrication des lignes VVP de l'EPR de Flamanville nécessaires à la bonne compréhension de l'analyse de la démarche de traitement des écarts proposée par EDF.

3.1. Défense en profondeur

En application de l'arrêté du 7 février 2012 en référence [12], l'exploitant doit appliquer le principe de défense en profondeur, qui conduit à la mise en œuvre de niveaux de défense successifs (caractéristiques intrinsèques, dispositions matérielles et procédures), destinés à prévenir les incidents et accidents puis, en cas d'échec de la prévention, à en limiter les conséquences.

Le principe de défense en profondeur est décrit à l'article 3.1 de l'arrêté du 7 février 2012 en référence [12] :

« L'exploitant applique le principe de défense en profondeur, consistant en la mise en œuvre de niveaux de défense successifs et suffisamment indépendants visant, pour ce qui concerne l'exploitant, à :

- *prévenir les incidents ;*
- *détecter les incidents et mettre en œuvre les actions permettant, d'une part, d'empêcher que ceux-ci ne conduisent à un accident et, d'autre part, de rétablir une situation de fonctionnement normal ou, à défaut, d'atteindre puis de maintenir l'installation dans un état sûr ;*
- *maîtriser les accidents n'ayant pu être évités ou, à défaut, limiter leur aggravation, en reprenant la maîtrise de l'installation afin de la ramener et de la maintenir dans un état sûr ;*
- *gérer les situations d'accident n'ayant pas pu être maîtrisées de façon à limiter les conséquences notamment pour les personnes et l'environnement.*

⁶Les ESPN sont classés en différents niveaux en fonction des risques et enjeux qui leur sont associés. Les critères de classement sont précisés à l'article 3 de l'arrêté du 30 décembre 2015 modifié en référence [11].

La mise en œuvre du principe de défense en profondeur s'appuie notamment sur :

- *le choix d'un site adapté, tenant compte notamment des risques d'origine naturelle ou industrielle pesant sur l'installation ;*
- *l'identification des fonctions nécessaires à la démonstration de sûreté nucléaire ;*
- *une démarche de conception prudente, intégrant des marges de dimensionnement et recourant, en tant que de besoin, à une redondance, une diversification et une séparation physique adéquates des éléments importants pour la protection qui assurent des fonctions nécessaires à la démonstration de sûreté nucléaire, pour obtenir un haut niveau de fiabilité et garantir les fonctions citées à l'alinéa précédent ;*
- *la qualité des activités mentionnées à l'article 1er.1 ;*
- *une préparation à la gestion d'éventuelles situations d'incident et d'accident. »*

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

3.2. Exclusion de rupture

Le rapport préliminaire de sûreté (RPS) transmis par EDF dans le cadre de la demande d'autorisation de création du réacteur EPR de Flamanville prévoit une démarche d'exclusion de rupture pour les tuyauteries VVP, de la sortie du générateur de vapeur jusqu'au point fixe en aval de la vanne d'isolement vapeur, qui s'appuie notamment sur les directives techniques en référence [97] qui définissent des dispositions spécifiques⁷ pour ces équipements.

Cette démarche consiste en la mise en œuvre de dispositions renforcées prises pour prévenir la rupture des tuyauteries avec un haut niveau de confiance. Cette démarche a pour objectif de ne pas retenir la rupture de ces tuyauteries dans les événements initiateurs retenus au titre des conditions de fonctionnement de référence, des études d'agression interne et des études mécaniques de la démonstration de sûreté nucléaire du réacteur.

Le II-1 de l'article 2 du décret d'autorisation de création du 10 avril 2007 en référence [8] encadre cette démarche prévue dans le rapport préliminaire de sûreté par les dispositions suivantes, dont le respect doit être démontré avant la mise en service du réacteur :

« Des dispositions sont prises pour garantir tout au long de la vie de l'installation, l'intégrité : [...] des tuyauteries primaires et secondaires principales pour lesquelles la survenue d'une rupture circonférentielle doublement débattue n'est pas retenue dans les conditions de fonctionnement de référence étudiées dans le rapport de sûreté.

⁷Extrait des directives techniques en référence [97] :

« B.1.3 - Exigences relatives aux tuyauteries secondaires principales :[...]

- *de manière générale, des exigences réglementaires et des codes de construction visant une haute qualité doivent être appliqués ; de plus, les exigences de être plus sévères que les règles générales pour les tuyauteries de classe 1 ; [...]*
- *les matériaux doivent rester dans le plateau ductile pour les températures les plus basses qui pourraient être rencontrées durant les transitoires, incidents de référence ; [...]*
- *l'installation des circuits doit permettre un accès facile à toutes les surfaces extérieures des tuyauteries ; l'inspection en service des zones soudées doit utiliser des méthodes efficaces. »*

Ces dispositions doivent couvrir l'ensemble des aspects suivants :

- la qualité de la conception et la vérification associée ;
- la qualité de la fabrication et les contrôles associés ;
- le suivi en service devant rendre hautement improbable non seulement l'apparition d'altérations de l'équipement remettant en cause la prévention des différents modes d'endommagement mais aussi l'absence de détection à temps de ces altérations si elles survenaient néanmoins. ».

De ce fait, exclure la rupture d'un composant, en ne retenant pas la rupture des tuyauteries dans les événements initiateurs à prendre en compte dans la démonstration de sûreté nucléaire du réacteur et en affaiblissant ainsi le troisième niveau de défense en profondeur prévu à l'article 3.1 de l'arrêté INB en référence [12], nécessite de renforcer les deux premiers niveaux de défense en profondeur pour atteindre un niveau de sûreté satisfaisant.

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

Ainsi la justification du respect des objectifs liés à la démarche d'exclusion de rupture, en particulier ceux mentionnés dans le décret d'autorisation de création, doit s'entendre comme la démonstration que les équipements et soudures présentent une qualité suffisante pour garantir leur intégrité tout au long de la vie de l'installation avec un haut niveau de confiance. Cette confiance se traduit notamment par la vérification de la bonne application des règles de fabrication choisies et le contrôle final de l'atteinte de la qualité suffisante.

3.3. Séance de la section permanente nucléaire (SPN) du 21 juin 2005

La démarche d'exclusion de rupture, en particulier les contreparties qu'elle nécessite, a fait l'objet, sur la base du rapport en référence [1], d'un avis de la section permanente nucléaire (SPN) de la Commission centrale des appareils à pression le 21 juin 2005 et de la lettre de suite en référence [2], qui définit le cadre d'un référentiel technique d'exclusion de rupture.

Ainsi, au-delà du seul respect des exigences techniques définies par le fabricant et l'exploitant, la lettre de suite [2] précise que :

«[...] l'objectif de la démonstration de l'exclusion de rupture est d'apporter la garantie du maintien de l'intégrité des tuyauteries pendant toute la vie de l'installation. L'intégrité est comprise comme l'absence d'altération de l'équipement remettant en cause la prévention des modes d'endommagements. Cette démonstration pourra être considérée comme acquise si l'examen des dispositions techniques mises en œuvre en conception, fabrication et exploitation permet d'aboutir à la conviction que la rupture des tuyauteries est hautement improbable ».

Le rapport en référence [1] ainsi que l'avis de la SPN et la lettre de suite en référence [2] ont défini plus précisément des dispositions à prendre pour pouvoir apporter la démonstration que les équipements et soudures présentent une qualité suffisante pour garantir leur intégrité tout au long de la vie de l'installation avec un haut niveau de confiance.

En ce sens le respect des exigences formulées dans la lettre de suite en référence [2], qui s'appuient sur les éléments présentés dans le rapport en référence [1], constitue un moyen considéré acceptable pour démontrer le respect des objectifs liés à la démarche d'exclusion de rupture, en particulier ceux mentionnés dans le décret d'autorisation de création en référence [8]. Un non-respect de ces exigences doit donc conduire l'exploitant à apporter par un autre moyen la justification du respect des objectifs liés à la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création de son installation.

En particulier, le rapport SPN en référence [1] avait explicité certaines exigences spécifiques supplémentaires à considérer en plus du respect du code de construction RCC-M. Pour les soudures VVP, ces exigences concernent notamment l'atteinte une valeur de résilience moyenne de 100 J à 0 °C et une maîtrise du phénomène de vieillissement sous déformation, alors évalué autour de 15 °C.

Par ailleurs ce même rapport précisait : « *Si la qualité de conception et fabrication peuvent globalement être acquises par l'application de codes habituels, la garantie de la qualité de la conception et de la fabrication, ainsi que le suivi en service, doivent être renforcés afin de rendre improbables d'une part l'apparition d'un défaut rédhibitoire et d'autre part son absence de détection à temps*».

3.4. Exigences spécifiques prises en compte par l'exploitant et le fabricant pour les soudures des lignes VVP en lien avec la démarche d'exclusion de rupture

A la suite de l'avis de la section permanente nucléaire (SPN) de la Commission centrale des appareils à pression le 21 juin 2005 et de la lettre de suite en référence [2], l'exploitant a proposé en 2007, en complément, une déclinaison de certains principes dans le document en référence [13] qui s'appuie sur les exigences du code RCC-M pour les équipements ESPN classés N1 tout en les complétant par des exigences spécifiques à la démarche d'exclusion de rupture.

Ces exigences concernent les métaux de base ainsi que les assemblages soudés. Peuvent notamment être citées les exigences suivantes :

- pour les métaux de base :
 - pour les produits obtenus par forgeage, le taux de corroyage est supérieur à 3 ;
 - le préchauffage et post-chauffage sont réalisés à une température minimale de 125 °C. La durée minimale du post-chauffage est d'une heure ;
 - pour le P355NH, le fabricant impose une valeur de carbone équivalent maximale de 0,52 % pour les tubes sans soudure (valeur visée de 0,50 %) et de 0,47 % pour les produits forgés ;
 - la teneur minimale en chrome est de 0,20 % sur coulée et de 0,15 % sur produit ;
- pour les joints soudés:
 - les valeurs de caractéristiques mécaniques de traction spécifiées pour le métal fondu sont au moins équivalentes à celles spécifiées pour les métaux de base ;
 - la valeur de résilience spécifiée pour le métal fondu est au moins équivalente à celle spécifiée pour le métal de base ;
 - les soudures sont détensionnées ;
 - les soudures sont arasées en peau interne autant que possible compte tenu de l'enchaînement des opérations de montage.

L'ensemble de ces exigences complémentaires est détaillé dans la note EDF en référence [7] et sont reprises en annexe 5.

Par la suite, le fabricant a décidé de renforcer et compléter ces critères dans ses documents opérationnels notamment par la définition de critères de résilience plus sévères : KV moyen à 0 °C supérieur à 100 J et KV individuel à -20 °C supérieur à 47 J.

Les critères de résilience requis par les différents référentiels sont détaillés en annexe 6.

Les critères spécifiques à la démarche d'exclusion de rupture n'ont pas été prescrits initialement par Framatome à son sous-traitant Nordon-Ponticelli en charge de la réalisation des soudures. Les exigences transmises au sous-traitant se sont en effet limitées à l'application du code RCC-M.

La transmission de ces critères spécifiques n'a seulement eu lieu à partir d'avril 2017, par l'émission de NAR (Notification with Acknowledgement of Receipt).

4. Ecartés associés aux différentes soudures des lignes VVP

4.1. Soudures des traversées d'enceinte

4.1.1. Historique

Les soudures de traversée VVP ont été réalisées par le GMES Nordon-Ponticelli, sous-traitant du fabricant Framatome, dans les ateliers de Nordon entre octobre 2012 et mars 2014 avec le procédé de soudage « fil/flux ». Un premier écart concernant des valeurs de résilience à 0 °C obtenues sur deux assemblages témoins de soudage inférieures au requis du code RCC-M a été ouvert en octobre 2013. Malgré cet écart, les fabrications en atelier se sont poursuivies jusqu'en mars 2014.

En juillet 2015, alors que les tuyauteries préfabriquées sont introduites dans l'œuvre sur le site de Flamanville, le fabricant Framatome constate que les exigences spécifiques relatives à la démarche d'exclusion de rupture n'ont pas été retranscrites à son sous-traitant, et en informe EDF. L'ASN n'en sera informée que début 2017.

Cette partie du rapport précise les différents écarts ou constats identifiés sur les soudures de traversée VVP en lien avec le référentiel d'exclusion de rupture. Le rapporteur précisera pour ces écarts et constats si ces derniers sont de nature à remettre en cause le respect du référentiel découlant de la SPN de 2005, à questionner le caractère suffisant de la qualité de fabrication atteinte et/ou à questionner la confiance obtenue dans l'atteinte effective de cette qualité suffisante. Enfin certains constats soulignent une défaillance dans la qualité de réalisation et/ou dans la surveillance d'EDF sans nécessairement remettre en cause la qualité suffisante de la soudure vis-à-vis de l'ensemble des modes d'endommagement.

4.1.2. Ecartés concernant la qualification de mode opératoire de soudage (QMOS)

Les soudures de préfabrication en atelier ont été réalisées sur la période d'octobre 2012 à mars 2014 sur la base de la QMOS R147AC révision 1.

Les requis en matière de résilience sont rappelés dans le tableau suivant :

Documents	Valeurs de résilience spécifiées
Arrêté ESPN 2005 : annexe 1 §4.2	KV moyen à 0 °C \geq 40 J pour un matériau ferritique dont la résistance à la traction à température ambiante est inférieure à 600 MPa
Code RCC-M niveau 1	KV moyen à 0 °C \geq 60 J et KV individuel à 0 °C \geq 42 J
Référentiel technique Framatome	KV individuel à -20 °C \geq 47 J et KV moyen à 0 °C \geq 100 J

Tableau 1 : Requis de résilience

4.1.2.1. Historique des QMOS mises en œuvre :

La QMOS R147AC a fait l'objet de plusieurs révisions. Des essais de résilience complémentaires ont notamment été ajoutés au cours du temps.

La révision 0 de mars 2011 disposait ainsi uniquement d'essais de résilience à -20 °C en peau (surface extérieure). La révision 1 de février 2012 a complété la révision 0 avec des essais de résilience à -20 °C à mi-épaisseur et la révision 2 de février 2015, postérieure donc à la réalisation des soudures de traversée d'enceinte, incorpore en plus des essais de résilience à 0 °C en peau et en racine (près de la surface intérieure).

La QMOS utilisée pour la réalisation des soudures en atelier (révision 1), ne présentait donc pas d'essais mécaniques de résilience à 0°C alors que ces essais sont requis par le code RCC-M.

EDF précise à l'ASN que cet écart a été détecté par le GMES en septembre 2013. En septembre 2013, le GMES a poursuivi la réalisation des deux réparations qui restaient à réaliser sur les soudures de traversée d'enceinte VVP malgré l'absence de garantie sur le respect des exigences du RCC-M. Ce point n'a été couvert qu'après le complément de qualification de mode opératoire réalisé *a posteriori* en février 2015 (révision 2 de la QMOS).

4.1.2.2. Ecart en matière de résilience constatés sur les QMOS :

Les valeurs de résilience individuelles minimales obtenues lors de la réalisation de la QMOS sont les suivantes :

	KV individuel à -20 °C en peau	KV individuel à -20 °C à mi-épaisseur	KV moyen à 0 °C dans le métal fondu
QMOS rev 0	30 J		
QMOS rev 1		80 à 170 J	
QMOS rev 2			68 et 60 J

Tableau 2 : Valeurs de résilience minimales obtenues sur la QMOS R147 AC

Il peut donc être constaté, au regard des requis en matière de résilience rappelés dans le tableau précédent :

- qu'une des valeurs de résilience obtenue à -20 °C lors de la QMOS initiale de mars 2011 n'est pas conforme aux référentiel technique spécifié par le fabricant pour l'exclusion de rupture (30 J pour un requis à 47 J) ;
- que la valeur de résilience obtenue à 0 °C lors de la révision 2 de QMOS en février 2015 n'est pas conforme aux référentiel technique spécifié par le fabricant (60 et 68 J pour un requis à 100 J) ;
- la valeur de résilience obtenue à 0 °C lors de la révision 2 de QMOS en février 2015 est tout juste supérieure ou égale aux exigences minimales du code RCC-M (60 J).

4.1.2.3. Autres écarts constatés sur la QMOS :

L'instruction de l'ASN et de l'IRSN sur les QMOS utilisées ont mis en exergue pour la QMOS R147AC d'autres écarts techniques au code RCC-M ou aux exigences spécifiques au référentiel d'exclusion de rupture. Ces écarts concernent, en complément de ceux mentionnés dans le paragraphe précédent pour les essais de résilience :

- l'absence de contrôle ultrasons (US) réalisé sur le coupon de qualification du mode opératoire de soudage ;
- l'absence de réalisation d'essais de dureté en racine ;
- des conditions de préchauffage non conformes.

4.1.2.4. *Position du rapporteur sur les écarts affectant la QMOS*

Le rapporteur considère que les écarts auraient pu être évités dès la qualification du mode opératoire de soudage en constatant que celle-ci n'était pas conforme d'une part au code RCC-M (absence d'essai de résilience à 0 °C) et d'autre part aux exigences de résilience spécifiées par le fabricant pour l'exclusion de rupture (valeurs de résilience non conformes à -20 °C). Les opérations de fabrication se sont néanmoins poursuivies et certains compléments de qualification de mode opératoire de soudage n'ont été réalisés qu'après la fin des opérations de soudage. Ces compléments ne permettent par ailleurs pas de répondre avec une marge suffisante au requis du code RCC-M.

Au regard de ces constats, un autre mode opératoire de soudage aurait dû être choisi.

Le fait que les exigences spécifiques à l'exclusion de rupture n'aient pas été spécifiées par le fabricant à son sous-traitant est à l'origine en partie de cet écart.

Les autres écarts techniques identifiés dans le cadre de l'instruction mettent en évidence un manque de rigueur dans la réalisation de la QMOS.

Ces écarts soulignent une défaillance de la surveillance de l'exploitant. Ils auraient dû être détectés avant le début des opérations de soudage par exemple lors de la revue du cahier de soudage. Ils mettent en évidence un manque de rigueur dans la réalisation de la QMOS et remettent en cause la qualité effectivement atteinte par les soudures de traversée en matière de résilience et la confiance dans l'atteinte de cette qualité.

4.1.3. Écarts concernant les métaux d'apport utilisés

4.1.3.1. *Choix des métaux d'apport*

Dans sa note en référence [15], le fabricant précise que le flux utilisé pour les soudures de traversée VVP présente un indice de basicité de l'ordre de 1,3 et que cet indice ne permet pas une très bonne désoxydation du métal fondu et donc un niveau de résilience optimum. Il précise également, que pour améliorer les résiliences à basse température, le choix d'un flux avec un indice de basicité de l'ordre de 3 aurait dû être employé. Enfin, Framatome mentionne que le métal d'apport, au vu des requis de résilience définis, aurait dû disposer de teneurs en phosphore et soufre les plus faibles possibles.

Le fournisseur du flux précise par ailleurs que, pour les appareils à pression de l'industrie nucléaire, l'emploi d'une autre référence de flux présentant un indice de basicité de 3 est recommandé. Les faibles valeurs de résilience obtenues pourraient trouver leur origine dans le type de flux retenu par le fabricant.

4.1.3.2. *Écarts constatés lors des essais de recette*

Les métaux d'apport utilisés pour les soudures des traversées ont fait l'objet d'essais de recette pour lesquels des écarts au code RCC-M ont été détectés, *a posteriori*, par Framatome et EDF en 2016 et ont fait l'objet de fiches d'anomalies (FA). Ces fiches d'anomalie concernent notamment :

- un nombre de passes de soudage supérieur au requis du code RCC-M ;
- l'utilisation de courant alternatif au lieu de courant continu ;
- des températures entre passes non conformes.

EDF mentionne que ces écarts ont conduit à surestimer les valeurs de résilience obtenues lors des essais de recette. Cette surestimation a été quantifiée par EDF *a posteriori* et a conduit à déterminer un facteur d'abattement d'environ 40 %, qui a ensuite été appliqué aux valeurs de résilience initialement obtenues. La valeur de résilience moyenne à 0 °C ainsi corrigée est alors de 80 J environ. Cette valeur est cohérente avec celles obtenues sur les assemblages témoins de soudage (cf. paragraphe 4.1.3.3).

4.1.3.3. *Écarts constatés lors de la réalisation des soudures de production*

Recyclage de flux⁸ :

Le recyclage du flux de soudure consiste à récupérer le flux inutilisé, les scories ou les particules en fusion de la zone de travail, à séparer le flux exempt de scories dans une trémie, puis à le reconditionner pour une nouvelle utilisation.

Le paragraphe S7222 du RCC-M encadre les pratiques de recyclage. Il est notamment précisé que le recyclage du flux est déconseillé mais que, dans la situation où celui-ci était recyclé, qu'une proportion maximale de 50 % peut être mélangée avec un flux neuf de même lot.

Dans la note en référence [15], le fabricant précise que des recyclages de flux ont été mis en œuvre lors du soudage des traversées VVP :

« Les flux non fondus au cours des opérations de soudage sont récupérés dans un réservoir placé sous la soudure réalisée. Le réservoir de récupération est bâché lors des opérations de meulage afin d'éviter la pollution du flux.

Les flux ainsi traités sont réutilisés après qu'ils aient été débarrassés par tamisage des particules de scories et de fines particules de flux fondu si la durée de leur séjour hors d'une étuve est inférieure à 4h. Dans le cas contraire, les flux sont rebutés.

Le nombre de recyclage n'est pas un critère tant que le ratio imposé est respecté.

Le taux de recyclage du flux est un paramètre pouvant potentiellement impacter les valeurs de résistance à la flexion par choc. »

Le fabricant précise que le taux de recyclage du flux est un paramètre pouvant potentiellement impacter les valeurs de résilience.

EDF précise que la procédure du GMES autorisait pour les soudures VVP un mélange de flux contenant jusqu'à 50 % de flux recyclé. Les pourcentages de flux mis en œuvre sur chaque soudure de traversée VVP ainsi que sur les deux assemblages témoins de soudage n'ont pas été recensés lors des opérations de soudage.

⁸Le flux est un dépôt alcalin tensio-actif qui est ajouté sur le joint avant ou pendant le soudage. Il modifie la convection dans le bain de fusion et la géométrie de l'arc électrique, ce qui permet d'atteindre de plus grandes profondeurs de pénétration pour un même apport calorifique.

4.1.3.4. Position du rapporteur

En ce qui concerne les essais de recette, le rapporteur considère que les faibles marges par rapport aux requis du RCC-M (résilience de 80 J à 0 °C pour un requis à 60 J), et *a fortiori* l'écart aux exigences complémentaires liées au référentiel d'exclusion de rupture (100 J à 0 °C) auraient dû conduire le fabricant à faire le choix d'un métal d'apport différent.

Cependant le fait que les exigences spécifiées par le fabricant n'aient pas été transmises à son sous-traitant et l'identification tardive des écarts affectant les essais de recette n'ont pas permis de se poser, à temps, la question du choix d'un métal d'apport adapté.

Ces écarts soulignent une défaillance de la surveillance de l'exploitant. Ils auraient dû être détectés avant le début des opérations de soudage et mettent en évidence un manque de rigueur dans la réalisation des essais de recette. Les résultats d'essais de résilience remettent en cause la qualité effectivement atteinte par les soudures de traversée en matière de résilience vis-à-vis des requis du référentiel exclusion de rupture et ceux du fabricant.

Concernant l'utilisation de flux recyclé, le rapporteur constate que du flux recyclé a été mis en œuvre sur les soudures des traversées ainsi que sur les assemblages témoins de soudage alors que cette pratique est déconseillé par le code RCC-M. En l'absence d'informations complémentaires sur les conditions d'utilisation de flux recyclé (pourcentage de flux recyclé sur les soudures de production et sur les assemblages témoins de soudage) et de justification de son absence d'impact sur les caractéristiques mécaniques, le rapporteur considère, à ce stade, que l'utilisation de flux recyclé est susceptible de remettre en cause la représentativité des assemblages témoins par rapport aux soudures de production, et donc *in fine* la confiance dans l'atteinte des caractéristiques mécaniques attendues.

4.1.4. Écarts concernant les assemblages témoins de soudage (AT)

La connaissance des propriétés mécaniques d'une soudure s'appuie sur des essais destructifs réalisés sur des soudures représentatives appelées « assemblages témoins », dont la réalisation est prévue et encadrée par le code RCC-M. Les huit soudures de traversée sont représentées par deux assemblages témoins :

- l'assemblage témoin CT13-0010 qui couvre 6 des 8 soudures réalisées entre octobre 2012 et décembre 2012 et 4 réparations réalisées entre octobre 2012 et mars 2013 ;
- l'assemblage témoin CT13-0434 qui couvre les deux autres soudures réalisées en avril 2013 et plusieurs réparations entre avril 2013 et mars 2014.

4.1.4.1. *Écarts sur les délais de réalisation et de dépouillement des assemblages témoins*

Le RCC-M impose des délais de réalisation pour le soudage des assemblages témoins dans l'objectif de garantir une certaine représentativité vis-à-vis des soudures de production ainsi que pour leur dépouillement, dans l'objectif cette fois-ci notamment de pouvoir rapidement suspendre la production en cas d'écart.

En l'occurrence, la réalisation des assemblages témoins doit s'effectuer dans les deux premiers mois suivant la réalisation des soudures de production et le dépouillement des assemblages le plus rapidement possible et, en tout état de cause, moins de deux mois après la fin des opérations de soudage et de traitement thermique.

Ces délais n'ont pas été respectés dans le cas présent (l'assemblage témoin CT13-0010 a été soudé sept mois après le début de réalisation des soudures de production qu'il couvre, l'assemblage témoin CT13-0434 cinq mois après) et la fiche d'écart associée statue sur l'acceptation en l'état en identifiant la cause suivante : « *En production, la priorité est donnée à l'avancement de l'affaire et la programmation des essais n'est pas suivie* ».

4.1.4.2. Position du rapporteur :

Le rapporteur constate que les délais de réalisation et de dépouillement des assemblages témoins de soudage n'ont pas été respectés.

Ces écarts récurrents n'ont pas fait l'objet d'actions correctives ni préventives permettant d'éviter leur renouvellement. Les actions identifiées dans les fiches d'écart concernaient l'acceptation *a posteriori* de l'écart sous réserve de la conformité des essais mécaniques. Le rapporteur considère que ces écarts sont susceptibles de remettre en cause la représentativité de ces assemblages par rapport aux soudures de production, et donc *in fine* la confiance dans l'atteinte des caractéristiques mécaniques attendues.

4.1.4.3. Valeurs de résilience non conformes

Les essais mécaniques réalisés sur les assemblages témoins CT13-0010 et CT13-0434, ont mis en évidence, en octobre 2013, des écarts en matière de résilience à 0 °C par rapport à la valeur de résilience moyenne à 0 °C de 60 J requise par le code RCC-M : des valeurs respectivement de 59 J et 49 J ont en effet été mesurées sur les deux assemblages témoins.

Des contre-essais ont été réalisés en octobre 2013 par le GMES Nordon-Ponticelli. Ces contre-essais présentaient des valeurs cette fois-ci conformes au code, sans marge néanmoins (cf. Tableau 3). A cette période, le sous-traitant en charge de la réalisation des soudures n'avait pas connaissance des exigences spécifiques à la démarche d'exclusion de rupture, auxquelles ces contre-essais étaient en écart.

Les rapports des assemblages témoins ont donc été considérés conformes au RCC-M niveau 1 en valorisant les contre-essais et n'ont pas fait l'objet d'un traitement d'écart.

Coupons témoins	CT 13-0010	CT 13-0434
Valeurs initiales	$KV_{\text{moy}} (0^{\circ}\text{C}) = 59 \text{ J}$ $KV_{\text{min}} (0^{\circ}\text{C}) = 56 \text{ J}$	$KV_{\text{moy}} (0^{\circ}\text{C}) = 49 \text{ J}$ $KV_{\text{min}} (0^{\circ}\text{C}) = 42 \text{ J}$
Valeurs après contre-essais	$KV_{\text{moy}} (0^{\circ}\text{C}) = 67 \text{ J}$ $KV_{\text{min}} (0^{\circ}\text{C}) = 56 \text{ J}$	$KV_{\text{moy}} (0^{\circ}\text{C}) = 62 \text{ J}$ $KV_{\text{min}} (0^{\circ}\text{C}) = 42 \text{ J}$

Tableau 2: Valeurs de résilience mesurées sur les coupons témoins 13-0010 et 13-0434.

Tableau 3 : Extrait du courrier EDF en référence [19]

Toutefois l'organisme Bureau Veritas Exploitation, mandaté par l'ASN pour l'évaluation de la conformité des circuits secondaires principaux du réacteur EPR de Flamanville, a émis plusieurs réserves en mai 2015 sur la validité du rapport du CT 13-0434 et notamment sur la valorisation de contre-essais effectués par le fabricant sans justification associée⁹.

4.1.4.4. *Autres écarts détectés sur les assemblages témoins*

Par ailleurs d'autres écarts affectant les assemblages témoins CT13-0010 et CT-13-0434 ont également été mis en évidence. EDF a effectué l'analyse de la représentativité et de la conformité des deux assemblages témoins de soudage des soudures de traversée VVP, synthétisée sous la forme de tableaux appelés « matrices de représentativité et de conformité ».

Les principaux écarts mis en évidence par ces matrices sont les suivants :

- le lot d'un métal d'apport de fil utilisé pour la réalisation des passes de remplissage d'un des deux assemblages témoins est différent de celui utilisé pour les soudures de production, ce qui constitue un écart aux dispositions du code RCC-M ;
- un lot de métal d'apport qui n'a pas été recetté conformément au S2000 du code RCC-M a été utilisé ;
- des énergies de soudage sont non conformes à la fiche de mode opératoire de soudage (FMOS) ;
- des conditions de réalisation du traitement thermique de détensionnement sont non conformes à la FMOS (vitesse de descente en température non conforme).

4.1.4.5. *Position du rapporteur :*

Le rapporteur considère que l'écart au code RCC-M en matière de résilience détecté en 2013 sur les assemblages témoins aurait dû conduire à la suspension de la qualification de mode opératoire de soudage et que les opérations de fabrication restantes (en l'occurrence quelques opérations de réparation) auraient dû être arrêtées dans l'attente de l'analyse des causes de cet écart.

Ces écarts en matière de résilience interrogent sur le caractère suffisant des propriétés mécaniques des soudures de production au regard des objectifs liés à la démarche d'exclusion de rupture.

Le rapporteur considère que les valeurs de résilience obtenues sur ces assemblages témoins sont en écart avec les valeurs attendues dans le cadre du référentiel technique d'exclusion de rupture tel que défini à la suite de l'avis de la SPN de 2005. Le rapporteur considère ainsi qu'EDF ne peut se prévaloir du respect de ce référentiel technique pour justifier l'atteinte des objectifs liés à la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création de l'installation.

⁹En désaccord avec l'organisme habilité mandaté par l'ASN pour l'évaluation de la conformité des lignes VVP, le fabricant a réalisé une demande d'interprétation à l'AFCEN en octobre 2015 concernant notamment la possibilité de réaliser des contre-essais bien qu'aucune mauvaise exécution de l'essai, ni présence de défaut dans l'éprouvette ne pouvait justifier ce recours aux contre-essais. L'AFCEN indique dans un premier temps, dans un courrier mentionné dans le document en référence [14], que la possibilité de faire des contre-essais lorsque les résultats initiaux sont compris entre la valeur moyenne requise et la valeur individuelle requise n'est pas techniquement acceptable. Quant à la question de savoir si cette possibilité, bien que techniquement non acceptable, est autorisée par le code RCC-M, ce dernier s'appuyant sur la norme de soudage ISO 15614-1, l'AFCEN a consulté l'AQUAP afin de disposer d'une interprétation de cette norme. L'AFCEN précise alors, dans un second temps, le 15 mars 2016, sur la base de l'interprétation fournie par l'AQUAP, que la réalisation de contre-essais est autorisée lorsque les essais initiaux sont supérieurs à la valeur individuelle requise, en précisant que la valeur moyenne des 6 éprouvettes (essais initiaux et contre-essais) doit être comparée à la valeur moyenne requise.

Par ailleurs, certains écarts comme l'utilisation de métaux d'apport différents entre certains assemblages témoins et les soudures de production ainsi que le non-respect de certains paramètres de soudage des FMOS constituent des incertitudes supplémentaires concernant la représentativité de ces assemblages témoins par rapport aux soudures de production, et donc remettent en question *in fine* la confiance dans l'atteinte des caractéristiques mécaniques attendues.

4.1.5. Vieillessement sous déformation

4.1.5.1. *Description du phénomène*

Pour certains assemblages témoins relatifs aux soudures réalisées sur site (tous modes opératoires de soudage confondus), les caractéristiques de traction (R_m) mesurées à chaud (300 °C) sont plus élevées que celles mesurées à température ambiante (20 °C), contrairement à ce qui est habituellement constaté. EDF précise dans son courrier en référence [19] que cette inversion, constatée sur certains assemblages témoins est vraisemblablement due à l'utilisation de métaux d'apport sensibles au vieillissement sous déformation.

Le vieillissement sous déformation est un phénomène qui se traduit par une évolution du comportement mécanique du matériau au cours du temps et en fonction de la température. Sous le terme général « vieillissement sous déformation », il y a le regroupement de deux types de vieillissement :

- le vieillissement sous déformation statique qui correspond au changement de propriétés d'un matériau après déformation et au cours du temps, et ce même à température ambiante ;
- le vieillissement sous déformation dynamique qui correspond au changement de propriétés d'un matériau en cours de déformation, notamment lorsqu'une déformation plastique est appliquée en température.

A la différence du phénomène de vieillissement thermique qui peut intervenir pendant toute la durée de vie d'un équipement, le phénomène de vieillissement sous déformation peut, sous certaines conditions de sollicitations mécaniques et thermiques, intervenir suivant des cinétiques beaucoup plus rapides, typiquement quelques cycles de déformation.

Ces deux types de vieillissement sous déformation sont dus à des interactions entre les dislocations mobiles présentes dans le matériau et la présence d'atomes en solution solide interstitielle notamment les atomes de carbone et d'azote. Avec un temps suffisant, sous l'effet de la température ou sous l'effet d'une déformation en température, les atomes interstitiels diffusent vers les dislocations et provoquent leur « ancrage ». La remise en mouvement des dislocations lors d'une nouvelle sollicitation va alors être entravée par cet ancrage, provoquant ainsi « un durcissement » et des changements de propriétés mécaniques.

Dans le cas du vieillissement sous déformation statique, le matériau présente une densité de dislocations initiale produite lors des opérations de fabrication (écrouissage notamment). Avec un temps suffisant à température ambiante ou réduit à température élevée, les atomes interstitiels migrent vers ces dislocations disponibles et vont les ancrer.

Dans le cas du vieillissement sous déformation dynamique, la diffusion des interstitiels s'effectue pendant une déformation, sensiblement augmentée à haute température (à partir de 200 °C). La vitesse de diffusion des interstitiels augmentée avec la température, devient du même ordre de grandeur que la vitesse de mouvements des dislocations due à la déformation. Il y a alors une compétition de mobilité entre les dislocations et les interstitiels se traduisant par des « ancrages-désancrages » successifs des dislocations. Ce mouvement discontinu des dislocations entraîne un changement de comportement du matériau.

Le phénomène de vieillissement sous déformation (statique et dynamique) provoque ainsi un durcissement de la structure.

Ce phénomène conduit à une fragilisation qui se traduit par un décalage de la courbe de transition fragile-ductile vers des températures plus élevées qu'initialement prévu. Il est pris en compte dans les études de conception (calculs de mécanique à la rupture brutale) par un décalage limité de 15 °C en début de vie permettant de couvrir à la fois les phénomènes de vieillissement sous déformation et le phénomène de vieillissement thermique pouvant se produire pendant les 60 ans d'exploitation.

Une inversion de R_m entre haute et basse température remet donc *a priori* en cause le caractère suffisant d'un décalage estimé à 15 °C.

Le choix des métaux d'apport est le facteur principal identifié par l'exploitant dans la mise en évidence du phénomène de vieillissement sous déformation, ainsi l'analyse dans la suite du document est déclinée suivant les différents types de métaux d'apport. La mise en œuvre du procédé de soudage peut néanmoins également contribuer à l'apparition de ce phénomène. En effet le vieillissement sous déformation se produit par nature en zone fondue de soudage du fait des effets thermomécaniques des passes successives de soudage. Cet effet est plus important dans les passes de racine des soudures épaisses qui sont soumises aux contraintes qu'induit le retrait des passes supérieures.

4.1.5.2. Exigences concernant le phénomène de vieillissement sous déformation

Le rapport de la SPN de 2005 en référence [1] précise que la fragilisation liée au phénomène de vieillissement sous déformation, après traitement thermique, est évaluée à +15 °C pour les nuances d'aciers au carbone manganèse (C-Mn) et que, sur la base des teneurs en aluminium et azote qui seront spécifiées, l'exploitant devra justifier le décalage lié à cette fragilisation.

Par ailleurs, la note EDF en référence [13] relatif aux hypothèses relatives à l'exclusion de rupture mentionne :

« Deux mécanismes de vieillissement sont à considérer :

- le vieillissement thermique associé à la migration du phosphore aux joints de grains (à considérer pour une température de fonctionnement supérieure à 250 °C),
- le vieillissement dynamique après déformation.

Compte tenu du détensionnement des soudures VVP et des précautions de fabrication, le DRB N4 avait retenu un décalage ΔT_v maximal de 15 °C (pour 40 ans de durée de vie). [...]

Dans le cas des lignes VVP de l'EPR, le matériau retenu est également calmé avec des teneurs en aluminium comprises entre 0.015 et 0.065 %, limitant ainsi fortement les conséquences associées au vieillissement dynamique. Compte-tenu des éléments présents ci-dessus, aucune difficulté particulière n'est attendue dans le cadre de la réalisation des études de rupture brutale des lignes vapeur et du secondaire GV de l'EPR. »

Dans la suite du rapport, il est considéré, que les choix de conception et de fabrication des lignes secondaires du réacteur EPR de Flamanville doivent amener à un phénomène de vieillissement sous déformation maîtrisée. Il peut être noté qu'il était considéré qu'une bonne maîtrise du phénomène de vieillissement sous déformation doit conduire à un décalage de la courbe de transition en fin de vie du réacteur inférieur à 15 °C¹⁰.

4.1.5.3. Cas des soudures de traversée

Les passes de racine et de soutien des soudures de traversée VVP ont été réalisées avec le procédé TIG manuel avec le métal d'apport de désignation EMK35Cr. Pour ce matériau, EDF mentionne, dans la note en référence [7] que la quantification du décalage de la courbe de transition lié au phénomène de vieillissement sous déformation est prévue au travers d'un programme d'essais.

Concernant les passes de remplissage réalisées avec le procédé fil/flux, EDF mentionne dans la note en référence [20] que les soudures de traversée ne présentent pas de sensibilité particulière au phénomène de vieillissement sous déformation, car il n'a pas été observé d'inversion des valeurs de R_m mesurées sur les assemblages témoins couvrant ces soudures.

Néanmoins dans le cadre de la démarche de justification des écarts qu'il a mise en place (cf. paragraphe 6.3.3.3), EDF a présenté, dans son document en référence [88], les premiers résultats d'essais mécaniques réalisés sur une soudure ARE Q3 (ARE3510TY-F02 S5) qui a été expertisée et qu'EDF considère comme représentative des soudures de traversée. Les résultats des essais de traction sur des éprouvettes prélevées dans les passes de remplissage réalisées en fil/flux sont présentés dans la Figure 3.

I. Résultats des essais de traction

A température ambiante		A 300°C	
$R_{p0.2}$	R_m	$R_{p0.2}$	R_m
466 MPa	586 MPa	432 MPa	636 MPa

Figure 3 : Résultats des essais de traction réalisés sur la soudure ARE3510TY-F02 S5.

Il est observé une valeur de R_m à 300 °C supérieure à celle mesurée à température ambiante, ce qui, comme l'indique EDF dans son courrier en référence [19], est vraisemblablement due à l'utilisation de métaux d'apport sensibles au phénomène de vieillissement sous déformation.

¹⁰ Pour ce qui concerne les réacteurs du palier N4, Framatome avait identifié, dans son document en référence [92], à l'issue d'un programme d'essais portant sur l'évolution des courbes de transition de résilience après un écrouissage de 5 % suffisant pour activer le phénomène de vieillissement sous déformation, un vieillissement sous déformation après traitement thermique conduisant à un décalage forfaitaire de la température de transition de +15 °C (incluant une incertitude de 10 °C) pour des aciers faiblement alliés dont les soudures sont détensionnées.

4.1.5.4. Position du rapporteur :

Les soudures de traversée présentent des passes racine et de soutien, réalisées avec le métal d'apport EMK35cr utilisé en TIG manuel, dont la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation n'est pas évaluée. Par ailleurs, Il ne peut plus être exclu plus que le matériau d'apport mis en œuvre lors des passes de remplissage réalisées avec le procédé fil/flux (couple SAF FRO/Oerlikon) puisse être également sensible à ce phénomène. En effet, les informations transmises par EDF dans son document en référence [88] indiquent une inversion de R_m sur des éprouvettes de tractions prélevées dans la première soudure ARE Q3 expertisée (ARE3510TY-F02 S5).

L'absence à ce stade de quantification disponible du phénomène de vieillissement sous déformation ne permet pas de confirmer la maîtrise du phénomène au regard du décalage de 15 °C de la courbe de transition fragile-ductile mentionné dans la SPN de 2005.

Par conséquent, étant donné que le phénomène de vieillissement sous déformation peut avoir un impact direct sur le caractère suffisant des caractéristiques mécaniques des soudures, le rapporteur estime qu'EDF doit évaluer la sensibilité des matériaux d'apport au phénomène de vieillissement sous déformation et leurs impacts sur la tenue mécanique des soudures de traversée.

Ce point fait l'objet de recommandations dans le paragraphe 6.3.4.

Enfin le rapporteur constate que la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation n'a pas été observée sur les assemblages témoins des soudures réalisées avec le procédé fil/flux, alors qu'une inversion des valeurs de R_m a été constatée sur des éprouvettes de traction prélevées dans la première soudure ARE Q3 expertisée (ARE3510TY-F02 S5) réalisée avec ce procédé. Ce constat interroge fortement la représentativité des assemblages témoins et affaiblit d'autant la confiance dans l'atteinte effective de la qualité attendue pour les soudures de production.

4.1.6. Ecart concernant la compacité d'une des soudures de traversée

4.1.6.1. Historique

Lors des contrôles ultrasonores (UT) réalisés par EDF dans le cadre de la visite complète initiale (VCI)¹¹ prévue par la réglementation, des indications non conformes aux critères de fabrication ont été détectées sur certaines soudures VVP réalisées sur site.

Ce constat a fait l'objet de la déclaration d'événement significatif en référence [23] puis d'une première analyse et de la définition d'un plan d'actions décrit dans le document en référence [24].

Cet événement a conduit EDF à mettre en place une organisation spécifique et à réaliser des recontrôles ultrasons sur l'ensemble des soudures des circuits secondaires principaux réalisées par le GMES Nordon-Ponticelli (soit 150 soudures). EDF a constaté que 40 % de ces soudures présentaient des indications qui n'avaient pas été détectées lors des contrôles UT de fin de fabrication.

¹¹ Cette visite permet d'établir l'état qui servira de référence aux examens qui seront mis en œuvre dans le cadre du suivi en service. La VCI constitue également une ultime vérification des équipements avant la mise en service de la chaudière.

En ce qui concerne les soudures de traversée, une indication notable a été détectée lors de ces recontrôles dans la soudure EPP6208TWM-S1 du côté externe de la traversée du train 2, alors que les contrôles UT de fin de fabrication étaient tous conformes.

Cette indication est située à proximité de la paroi externe sans être débouchante. Après une analyse complémentaire décrite au paragraphe 7.2.2, EDF a estimé que cette indication était non-volumique, se situait à une profondeur de 3 mm et disposait d'une largeur maximale de 2 mm et d'une longueur maximale de 8 mm.

Le code RCC-M considère les indications non volumiques comme inacceptables.

Ce point est détaillé au chapitre 7.

4.1.6.2. Position du rapporteur :

Le rapporteur constate que les contrôles de fin de fabrication mis en œuvre sur les soudures VVP n'ont pas permis de détecter certaines indications. Ce constat souligne le manque de rigueur dans la réalisation des contrôles et la défaillance de la surveillance d'EDF. Le caractère suffisant, vis-à-vis de cette remise en question de la confiance, des recontrôles effectués par EDF à la suite de la défaillance des contrôles de fin de fabrication est analysée au paragraphe 6.3.5.9.

Par ailleurs la présence d'un défaut non-volumique dans une des soudures de traversée est de nature à interroger sur le caractère suffisant des propriétés atteintes pour la soudure en matière de compacité, au regard de l'objectif d'exclusion de rupture.

4.1.7. Autres constats pouvant avoir un impact sur la conformité des soudures au référentiel technique d'exclusion de rupture

En complément de ces écarts relevés par EDF, l'instruction de l'ASN, à la suite notamment de constats faits lors de ses différentes inspections, a permis de mettre en lumière d'autres éléments pouvant remettre en question l'atteinte de la haute qualité de fabrication attendue pour ces soudures.

4.1.7.1. Nombre de réparations :

Framatome a fait le choix d'utiliser, pour les soudures de production, des géométries de chanfrein différentes de celle mise en œuvre lors de la qualification. Le fabricant, précise dans la note en référence [15] que ce choix a engendré pour les soudeurs des difficultés à respecter les énergies de soudage et a contribué ainsi à générer davantage de défauts de fabrication. Jusqu'à la fin des fabrications des soudures de traversée, les paramètres en cause n'avaient pas évolué dans les gammes de fabrication, bien que Framatome ait considéré que ces paramètres étaient inadaptés et ait même indiqué que « *la QMOS R147AC ne sera plus utilisée* ».

Les huit soudures de production réalisées en usine ont par conséquent nécessité de nombreuses réparations. Sur ces huit soudures, deux ont pu se faire sans réparation, trois avec une réparation, deux avec deux réparations et une soudure a nécessité six réparations, conduisant ainsi à un total de treize réparations pour huit soudures.

A ce titre, le code RCC-M S7610 indique par ailleurs que des réparations trop systématiques sont de nature à remettre en cause les conditions d'application du mode opératoire, ou la qualification du mode opératoire de soudage elle-même :

« Au même endroit deux opérations de réparation par soudage sont autorisées. Au-delà, le Fabricant ne doit pas poursuivre avant d'avoir établi un rapport analysant les causes de ces réparations successives et avoir soumis ce rapport à l'accord du Constructeur. Il en est de même en cas de réparations trop systématiques ou de mise en évidence de défauts susceptibles de remettre en cause les conditions d'application du mode opératoire, ou la qualification elle-même du mode opératoire de soudage ».

4.1.7.2. Position du rapporteur :

Le rapporteur considère que le nombre élevé de réparations nécessaires à la réalisation des soudures de traversée aurait dû conduire le fabricant à s'interroger sur l'adéquation de son mode opératoire de soudage. Ceci renforce le constat de manque de rigueur dans la réalisation de soudures en exclusion de rupture.

4.1.7.3. Analyse des écarts par typologie

Comme cela a été évoqué en introduction, l'analyse de la démarche de traitement des écarts objet du présent rapport a été réalisée sur la base des écarts connus à la date de sa rédaction, EDF poursuivant le recensement des écarts affectant chacune des soudures VVP en exclusion de rupture.

Dans le document en référence [16] transmis le 4 février 2019 et dans l'attente de la description détaillée de l'état final de chacune des huit soudures de traversée¹², EDF a réalisé une analyse de la typologie des écarts au RCC-M constatés lors des étapes de préfabrication en atelier qui pourraient ne pas être résorbés *in fine*.

Ces écarts ont été constatés lors :

- des activités d'usinage ;
- des activités de soudage ;
- des activités de contrôles non destructifs ;
- des revues des rapports de fin de montage (RFM). Il s'agit d'écarts « documentaires ».

EDF précise les modes de traitement retenus et l'analyse de leur impact est réalisée par typologie d'écart. Le cas échéant, une analyse préliminaire de leur cumul est proposée.

Ce paragraphe a pour objectif de présenter les quatre typologies d'écarts au RCC-M susceptibles d'être rencontrés et de subsister sur certaines soudures de traversée VVP. Concernant les écarts notables identifiés par le rapporteur, l'analyse de l'exploitant concernant les modes de traitements retenus et l'analyse de leur impact est réalisée au chapitre 8. A noter que l'ensemble des éléments de cette partie vaut également pour les autres soudures VVP en exclusion de rupture réalisées sur site pour lesquelles des écarts au RCC-M pourraient subsister à l'issue des opérations de réparation et de remise à niveau envisagées par EDF.

¹² Les matrices de conformité et les fiches d'identités des soudures de traversée d'enceinte VVP, détaillant leur état final, ont depuis été transmises, trop tardivement cependant pour que leur analyse puisse être intégrée au présent rapport.

i. Écarts dimensionnels

Ce type d'écart peut remettre en cause les règles générales de conception précisées dans le tome I du RCC-M. Ces données dimensionnelles peuvent avoir un impact sur la prévention des modes d'endommagement pouvant remettre en cause l'intégrité mécanique des équipements du fait des chargements thermomécaniques qui leur sont appliqués lors des épreuves hydrauliques, des essais, ainsi que lors du fonctionnement en service.

Il s'agit notamment des modes d'endommagement suivants :

- la déformation excessive et l'instabilité plastique ;
- l'instabilité élastique ou élastoplastique (flambement) ;
- la déformation progressive ;
- la fatigue (fissuration progressive) ;
- la rupture brutale.

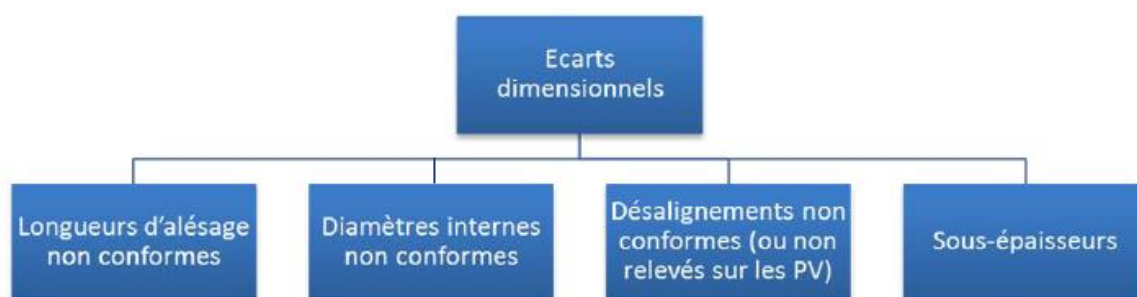


Figure 4 : Typologie des écarts constatés lors des activités d'usinage (extrait de la note en référence [16])

La question du désalignement fait l'objet d'une analyse spécifique dans le paragraphe 8.1.5.4 du présent rapport.

ii. Écarts liés aux activités de soudage

Ce type d'écart peut avoir un potentiel impact sur les caractéristiques mécaniques des soudures, sur la conformité des QMOS, ainsi que sur la représentativité et la conformité des assemblages témoins couvrant les soudures VVP en exclusion de rupture.

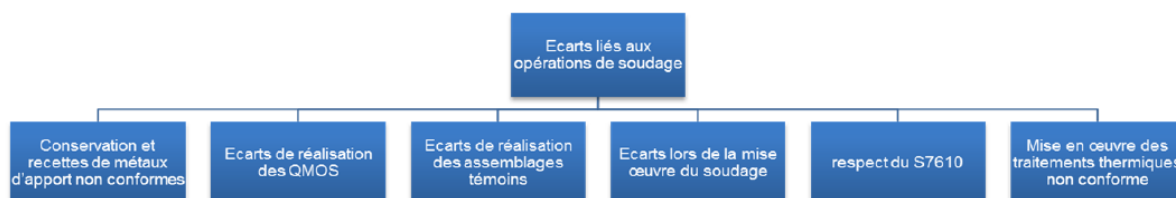


Figure 5 : Typologie des écarts constatés lors des activités de soudage (extrait de la note en référence [16])

Écarts de réalisation des QMOS : il s'agit principalement des écarts relatifs à l'absence de réalisation de certains essais mécaniques et au non-respect des conditions de traitements thermiques (cf. chapitre 4.1.2).

Écarts de réalisation des assemblages témoins : il s'agit principalement des retards concernant les délais de réalisation et/ou de dépouillement, des résultats d'essais mécaniques non conformes aux requis du code RCC-M, du non-respect ponctuel de l'énergie de soudage (cf. chapitre 4.1.4).

Écarts lors de la mise en œuvre du soudage : il s'agit essentiellement des écarts relatifs à des surintensités constatées ou à des énergies non conformes aux FMOS utilisées pour la réalisation des soudures.

Écart lors de la mise en œuvre des traitements thermiques : il s'agit principalement de non-conformités constatées lors des étapes de préchauffage ou de post-chauffage et des survitesses de refroidissement.

Recette non conforme des métaux d'apport : plusieurs écarts ont été constatés lors des recettes des métaux d'apport constitutifs des passes de racine et de soutien des soudures VVP ainsi que des métaux d'apport mis en œuvre lors des réparations de certaines d'entre elles (cf. chapitre 4.1.3).

La question du respect du paragraphe S7610 du code RCCM relatif à l'étendue des réparations par soudage est abordée au paragraphe 4.2.8 pour les soudures réalisées sur site, l'écart ayant été constaté sur certaines d'entre elles, et fait l'objet d'une analyse spécifique dans le chapitre 8 du présent rapport.

iii. Écarts liés aux activités de contrôles non destructifs

Ces écarts sont susceptibles de remettre en cause les propriétés de compacité des soudures, la contrôlabilité à 100 % (et par conséquent la garantie de l'absence de défauts de compacité des soudures concernées) et la traçabilité des éléments permettant le suivi en service.



Figure 6 : Écarts liés aux activités de contrôles non destructifs
(extrait de la note en référence [16])

États de surface non conformes : il s'agit des indications non conformes au RCC-M détectées lors des contrôles surfaciques (ressuage essentiellement) ou visuels. Il peut également s'agir d'états de surface non compatibles avec la réalisation des contrôles ultrasons.

Marquages non conformes : il s'agit des non-conformités constatées sur le marquage des repères nécessaires à la réalisation des CND de fabrication et des END en service. Il ne s'agit pas d'écarts au RCC-M mais ces derniers peuvent remettre en cause la contrôlabilité de la totalité de la soudure ainsi que les comparaisons entre les CND de fabrication et les END de suivi en service qui pourraient être nécessaires pour le suivi en service des soudures.

EVF non réalisable : pour des raisons d'accessibilité, il n'est pas toujours possible de réaliser les examens visuels internes finaux de certaines soudures correspondant aux soudures des dernières tuyauteries fermant la ligne.

Zones non contrôlables : en raison de leur configuration (assemblage tube/vanne par exemple), certaines soudures peuvent présenter des zones non contrôlables en ultrasons avec les procédures dédiées.

Mise en œuvre non conforme des contrôles ultrasons : la campagne de contrôles contradictoires réalisée au premier semestre 2018 sur l'ensemble des soudures des circuits secondaires principaux a démontré que des contrôles ayant conclu à la conformité de certaines soudures n'avaient pas été mis en œuvre correctement.

Non-respect du phasage RCC-M : certaines soudures n'ont pas fait l'objet de contrôles surfaciques après affouillement bien que ce contrôle soit requis par le code RCC-M.

iv. Écarts documentaires

Ces écarts concernent :

- la perte de procès-verbaux (PV) ou des PV non remplis : ces écarts font suite à la revue des rapports de fin de montage (RFM). Cette revue a permis de constater l'absence de PV associés à certaines phases figurant dans les fiches de suivi de soudures (FSS).
- l'utilisation de FMOS non validées pour la réalisation de reprise envers.

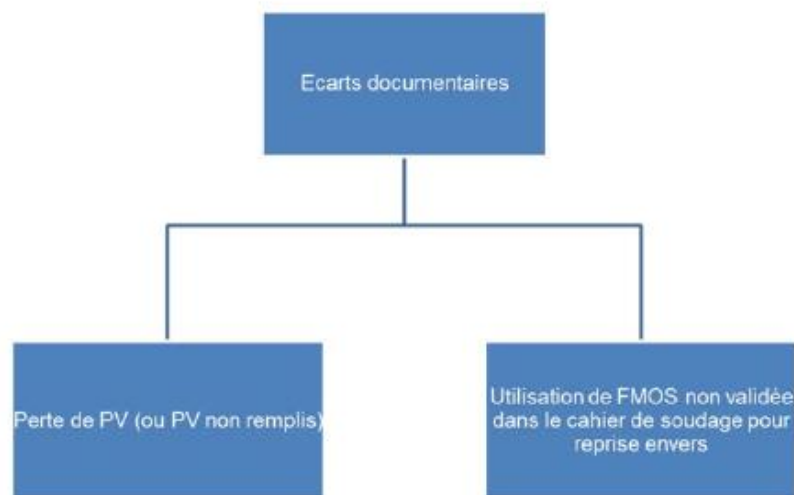


Figure 7 : Écarts documentaires
(extrait de la note en référence [16])

4.1.7.4. Position du rapporteur:

Chaque soudure des circuits VVP peut être concernée par un ou plusieurs écarts mentionnés dans cette liste.

Le rapporteur considère que certains de ces écarts, et surtout leur éventuel cumul, peuvent, selon leur degré de gravité, remettre en question le respect du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005 et sa déclinaison par le fabricant. En effet, certains de ces écarts peuvent avoir des impacts sur le niveau de qualité atteint et la confiance dans l'atteinte de cette qualité.

Le rapporteur considère que ces points doivent faire l'objet de justifications complémentaires dans le cadre des analyses spécifiques qui seront menées sur chacune des soudures.

Les écarts, que le rapporteur considère comme étant notables étant donné les informations disponibles et les analyses déjà réalisées à ce stade, ainsi que les traitements associés, proposés par l'exploitant, sont analysés au chapitre 8.

4.1.8. Conclusion

Le rapporteur considère que certains écarts identifiés sur les soudures de traversée des lignes VVP du réacteur EPR de Flamanville, détaillés dans les parties ci-dessus, constituent des écarts forts aux exigences définies à la suite de la SPN de 2005 pour répondre aux objectifs liés à la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création en référence [8]. C'est en particulier le cas des valeurs de résilience obtenues sur les assemblages témoins des soudures de traversée, l'absence de preuve de la maîtrise du phénomène de vieillissement sous déformation et la présence d'un défaut considéré inacceptable par le code de construction RCC-M.

Il en résulte que le rapporteur considère que l'exploitant ne peut se prévaloir du respect du référentiel issu de la SPN de 2005 pour démontrer l'atteinte des objectifs liés à la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création en référence [8].

La démonstration que ces écarts ne remettent pas en cause l'atteinte de ces objectifs doit alors être apportée par l'exploitant par un autre moyen. Il doit en particulier apporter la justification de l'atteinte d'une qualité suffisante pour garantir l'intégrité des lignes VVP tout au long de la vie de l'installation et cela avec un haut niveau de confiance.

Le rapporteur note qu'un nombre significatif d'écarts interroge sur le caractère suffisant de la qualité des soudures ou altère la confiance dans l'atteinte de cette qualité. Peuvent notamment être mentionnés les nombreux écarts affectant les assemblages témoins, la qualification de mode opératoire et la non-détection d'un défaut, considéré comme inacceptable par le code RCC-M, lors des contrôles de fin de fabrication.

La démarche de traitement des écarts proposée par EDF doit donc prendre en considération l'impact de l'ensemble de ces écarts.

La démarche proposée par EDF est détaillée dans la partie 5 du présent rapport.

Le rapporteur note par ailleurs que certains écarts, bien qu'ayant dans certains cas peu d'impact sur la qualité finale de la soudures, traduisent un manque de rigueur aussi bien lors de la réalisation des opérations de qualification de modes opératoires de soudage, lors des recettes des métaux d'apport que lors des opérations de soudage des traversées.

Comme cela a été évoqué en introduction, l'analyse de la démarche de traitement des écarts objet du présent rapport a été réalisée sur la base des écarts connus à la date de sa rédaction, EDF poursuivant le recensement des écarts affectant chacune des soudures VVP en exclusion de rupture. Les matrices de conformité des soudures de traversée VVP pourront néanmoins mettre en lumière d'autres écarts que ceux détaillés dans le présent rapport. Ainsi les conclusions de ce rapport pourraient être à reconsidérer en tenant compte notamment du cumul des écarts inventoriés dans les matrices de conformité de chacune des soudures.

4.2. Soudures réalisées sur site

Les opérations de soudage sur site ont débuté à partir d'avril 2015. Comme pour les soudures de traversée d'enceinte, ces soudures ont été réalisées par le GMES Nordon-Ponticelli, sous-traitant du fabricant Framatome. Au total 58 soudures VVP réalisées sur site sont concernées par la démarche d'exclusion de rupture.

Rappel des caractéristiques de résilience :

Documents	Valeurs de résilience spécifiées
Arrêté ESPN 2005 : annexe 1 §4.2	KV moyen à 0 °C \geq 40 J pour un matériau ferritique dont la résistance à la traction à température ambiante est inférieure à 600 MPa et 60 J lorsque cette résistance à la traction dépasse 600 MPa
Code RCC-M niveau 1	KV moyen à 0 °C \geq 60 J et KV individuel à 0 °C \geq 42 J
Référentiel technique Framatome	KV individuel à -20 °C \geq 47 J et KV moyen à 0 °C \geq 100 J

Tableau 4 : Principales caractéristiques de résilience

Cette partie du rapport précise les différents écarts ou constats identifiés sur les soudures VVP réalisées sur site en lien avec le référentiel d'exclusion de rupture. Le rapporteur précisera pour ces écarts et constats si ces derniers sont de nature à remettre en cause le respect du référentiel découlant de la SPN de 2005, à questionner le caractère suffisant de la qualité de fabrication atteinte et/ou à questionner la confiance obtenue dans l'atteinte effective de cette qualité suffisante. Enfin certains constats soulignent une défaillance dans la qualité de réalisation et/ou dans la surveillance d'EDF sans nécessairement remettre en cause la qualité suffisante de la soudure vis-à-vis de l'ensemble des modes d'endommagement.

4.2.1. Rappel de l'historique

Des écarts ont été découverts sur les assemblages témoins de soudage des soudures de traversée par le GMES dès octobre 2013, concernant notamment les valeurs de résilience à 0 °C (cf. partie 4.1.4.3 du présent rapport). En juillet 2015, EDF et le fabricant Framatome ont pris conscience de l'absence de transmission des exigences du référentiel d'exclusion de rupture au sous-traitant en charge de la fabrication des soudures de traversée.

Les exigences spécifiques à l'exclusion de rupture étant également applicables aux soudures VVP en exclusion de rupture réalisées sur site, les activités de soudage sur site, qui ont commencé en avril 2015, sont alors arrêtées en juillet 2015. EDF indique que la reprise des activités fin 2015 a été décidée à la suite d'une sélection par le fabricant de qualifications de modes opératoires de soudage (QMOS) permettant d'atteindre de hautes valeurs de résilience à 0 °C.

Les exigences spécifiques à l'exclusion de rupture n'ont cependant pas fait, à cette période, l'objet d'une contractualisation entre Framatome et le GMES et ni EDF, ni le fabricant ne se sont assurés que les QMOS sélectionnées permettaient de remplir les exigences de résilience à -20 °C spécifiées dans le référentiel technique du fabricant.

L'ASN a été informée de l'écart début 2017 et à la suite d'une inspection de l'ASN sur site, les exigences spécifiques à l'exclusion de rupture ont été contractualisées entre Framatome et le GMES en avril 2017¹³ (via la NAR-198).

Des mesures de résilience à -20 °C, demandées par les exigences spécifiées par le fabricant en lien avec son référentiel d'exclusion de rupture, sont alors réalisées en 2017 et conduisent EDF à faire le constat, fin juillet 2017, de premiers résultats de résilience à -20 °C non conformes sur des assemblages témoins des soudures de production réalisées sur site.

EDF a alors décidé en août 2017 de ne plus utiliser que le procédé TIG orbital pour les soudures restant à réaliser, le mode opératoire utilisant ce procédé ayant montré des résiliences à -20 °C suffisantes sur les assemblages témoins de production. Pour autant un grand nombre de soudures avaient à cette date déjà été réalisées avec des modes opératoires de soudage inadéquats pour répondre à l'exigence de résilience à -20 °C spécifiée par le fabricant.

4.2.2. Ecart concernant les QMOS

Les soudures réalisées sur site sont couvertes par 8 qualifications de mode opératoire de soudage (QMOS) différentes.

Ces qualifications ont été affectées d'un certain nombre d'écarts, soit au code RCC-M soit aux exigences spécifiques au référentiel d'exclusion de rupture, dont :

- l'absence d'essais de résilience réalisés dans les zones situées à 4 mm de la zone thermiquement affectée (ZAT) ;
- l'absence d'essais de résilience à -20 °C ;
- l'absence de contrôle ultrasons (US) ;
- l'absence d'essais de traction longitudinaux (alors que la géométrie de certains assemblages soudés le permettait) ;
- des conditions de préchauffage non conformes ;
- l'absence de traitement de détensionnement simulé ;
- des zones de prélèvement destinées aux essais de dureté non conformes.

Chacune des qualifications n'est pas concernée par l'ensemble des écarts susmentionnés. Néanmoins quatre écarts par QMOS ont été détectés en moyenne.

¹³Une inspection de l'ASN du 12 juin 2018, dont la lettre de suite est en référence [17], menée dans l'usine de Fives-Nordon à Nancy, a conduit les inspecteurs de l'ASN à constater que les résultats d'essais mécaniques figurant sur les procès-verbaux pour les assemblages témoins de soudage n'étaient pas conformes aux critères spécifiés dans le document NAR-198. Ce constat souligne une absence de prise en compte par le prestataire des exigences spécifiques au référentiel d'exclusion de rupture près de 3 ans après la détection de l'écart concernant l'absence de transmission des exigences d'exclusion de rupture par le fabricant Framatome à son sous-traitant.

4.2.3. Position du rapporteur

Bien que les valeurs de résilience à 0 °C obtenues lors des différentes qualifications respectent le critère de KV moyen supérieur à 100 J, les écarts mentionnés ci-dessus sont de nature à questionner l'atteinte de propriétés mécaniques suffisantes ainsi que la confiance dans l'atteinte de ces propriétés pour les soudures de production.

En effet l'absence de réalisation de certains essais, comme les essais de résilience à -20 °C ou encore les essais à réaliser à 4 mm de la ZAT, remet en question l'atteinte effective des propriétés mécaniques attendus.

Par ailleurs l'absence de contrôle ultrasons, le problème de zones de prélèvement des essais de dureté et l'absence de certains traitements thermiques questionnent la représentativité des résultats de qualification au regard des soudures de production. En ce sens l'assurance de l'atteinte effective des bonnes propriétés des soudures de production s'en trouve amoindrie.

Enfin, l'absence d'essais de résilience à -20 °C pour les QMOS a été détectée par EDF en juillet 2015 lorsque l'écart relatif à l'absence de déclinaison des exigences du référentiel d'exclusion de rupture a été constaté. La réalisation des soudures sur site s'est néanmoins poursuivie pendant près de deux ans sans que le fabricant n'ait contractualisé les exigences d'exclusion de rupture à son sous-traitant.

Les autres écarts ont tous fait l'objet d'une détection tardive à partir de 2017, la plupart lors de l'instruction par l'ASN et l'IRSN des QMOS en 2018.

Ces écarts soulignent à nouveau la défaillance du contrôle de Framatome et de la surveillance d'EDF qui auraient dû détecter et traiter ces écarts, par exemple lors de la surveillance du cahier de soudage.

4.2.4. Écarts concernant les métaux d'apport

L'annexe 7 du présent rapport rappelle les exigences d'exclusion de rupture applicables aux soudures des lignes VVP en exclusion de rupture. Parmi ces exigences figurent les exigences suivantes concernant :

- les caractéristiques mécaniques: « les valeurs des caractéristiques de traction et de résilience spécifiées pour le métal fondu sont au moins équivalentes à celles spécifiées pour les métaux de bases » ;
- le traitement thermique de détensionnement : « les soudures sont détensionnées ».

L'absence de déclinaison des exigences du référentiel d'exclusion de rupture détectée en juillet 2015 a conduit EDF à vérifier *a posteriori* le respect de ces exigences.

L'analyse menée par EDF sur les résultats des essais effectués lors de la recette des produits d'apports utilisés pour les soudures VVP réalisées sur site, a permis d'identifier les écarts suivants, concernant principalement le produit d'apport utilisé pour le procédé TIG manuel et repris par EDF dans sa note en référence [18] :

- un lot de métal d'apport dispose d'un $R_{p0.2}$ à température ambiante inférieur à celui requis pour le métal de base (349 contre 355 MPa) ;
- un lot de métal d'apport dispose d'un R_m à température ambiante inférieur à celui requis pour le métal de base (459 contre 490 MPa) ;
- un lot de métal d'apport dispose d'un R_m à température ambiante inférieur à celui requis pour le métal de base (489 contre 490 MPa) ;
- le traitement thermique de détensionnement n'a pas été réalisé sur deux lots de métal d'apport et les résultats de recettes sont non conformes aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture ;
- un lot de métal d'apport ne dispose pas de valeur de résilience ;

- une teneur en chrome mesurée en passe de racine est inférieure au requis pour certaines soudures.

4.2.5. Position du rapporteur

Bien que la plupart des écarts mentionnés ci-dessus n'aient pas d'impact fort sur les caractéristiques réellement obtenues sur les soudures réalisées sur site, la détection tardive de ces écarts, en lien avec l'absence de retranscription des exigences spécifiques au référentiel d'exclusion de rupture du fabricant vers son sous-traitant, n'a pas permis de s'assurer *a priori* que les métaux d'apport mis en œuvre respectaient les exigences définies. Ce constat questionne à nouveau la rigueur dans le traitement des écarts lors de la réalisation des soudures en exclusion de rupture.

4.2.6. Écarts détectés sur les assemblages témoins

4.2.6.1. *Valeurs de résilience à -20 °C non conformes*

Les premiers résultats d'essais mécaniques réalisés sur les assemblages témoins des soudures réalisées sur site ont été obtenus en novembre 2015 (assemblage témoin CT15-0054). Des essais de résilience à 0 °C étaient prévues mais pas à -20 °C. Les valeurs de résiliences obtenues à 0 °C étaient conformes au critère d'exclusion de rupture du fabricant (KV moyen à 0 °C supérieur à 100 J).

A la suite de la contractualisation tardive entre le fabricant et son sous-traitant des exigences spécifiques au référentiel d'exclusion de rupture en 2017 (via la NAR-198), les premiers essais de résilience à -20 °C réalisés sur les assemblages témoins de soudage des soudures réalisées sur site ont présenté des résultats non conformes, fin juillet 2017, pour les procédés TIG et électrodes enrobées et TIG manuel.

Plus précisément, sur les 21 assemblages témoins de soudage, pour lesquels les essais de résilience ont été réalisés :

- l'ensemble des assemblages témoins présentent des résiliences à 0 °C conformes aux exigences spécifiées par le fabricant dans son référentiel d'exclusion de rupture (KV moyen à 0 °C supérieur à 100 J) et donc *a fortiori* aux exigences du code RCC-M pour les matériels de niveau 1 (KV moyen à 0 °C supérieur à 60 J) ;
- quatre assemblages témoins, réalisées avec les procédés TIG et électrode enrobée ou TIG manuel, présentent des valeurs résilience individuelles non conformes à -20 °C. On dénombre pour ces trois assemblages témoins, cinq valeurs, allant de 16 à 40 J, inférieures au requis de 47 J. Les autres assemblages témoins présentent des valeurs de résilience supérieures à 100 J à -20 °C.

Coupon témoin (procédé de soudage)		Métal d'apport		Résilience à 0°C (J) – Critère : $KV_{moy}(0°C) \geq 100 J$						Résilience à -20°C (J) – Critère : $KV_{indiv}(-20°C) \geq 47J$									
				Métal Fondu en peau			Métal Fondu en racine			Métal Fondu en peau			Métal Fondu en racine						
				KV_{indiv}	KV_{moy}		KV_{indiv}	KV_{moy}		KV_{indiv}	KV_{moy}		KV_{indiv}	KV_{moy}					
TIG Orbital	15-0141	M	DMO-IG	268	258	252	259	284	268	264	272	266	274	234	258	194	236	290	240
		D	DMO-IG	252	268	264	261	282	276	220	259	274	284	238	265	288	222	252	254
	16-0186	M	DMO-IG	276	258	280	271	>290	>290	>290	>290								
		D	DMO-IG	272	258	270	267	>290	258	>290	>279								
	17-0065 (1)	M	DMO-IG	266	284	284	278	>290	>290	>290	>290	278	286	266	276	>290	>290	278	>286
		D	DMO-IG	278	270	286	278	>290	>290	>290	>290	(1) et (2)							
17-0319 (2)	D	DMO-IG	276	280	286	280	>290	>290	>290	>290	268	282	262	270	>290	>290	>290	>290	
TIG + EE	15-0054		EMK35CR + UNIVERS 2M	180	190	194	188	108	120	124	117	172	184	150	169	72	16	22	37
	16-0039		EMK35CR + UNIVERS 2M	200	230	226	219	126	102	88	105	190	160	168	173	102	26	30	53
	16-0171		EML5 + CYMETA 9AQ	170	194	178	181				180	140	192	171					
	16-0210		EML5 + CYMETA 9AQ	96	190	154	146												
	16-0229		EMK35CR + UNIVERS 2M	174	176	204	185	198	188	226	204	202	176	208	195	130	114	164	136
	16-0234		EMK35CR + UNIVERS 2M	262	282	238	261	172	168	160	167	190	196	182	189	102	94	86	94
	17-0031		EMK35CR + UNIVERS 2M	240	256	268	254	266	280	260	268	232	214	214	220	176	200	254	210
	17-0195		EML5 + CYMETA 9AQ	190	174	166	176												
	17-0229		EMK35CR + UNIVERS 2M	212	> 290	236	> 246	226	188	168	194	220	226	200	215	180	152	160	164
	17-0294 (3)		EML5 + CYMETA 9AQ	270	264	> 290	> 274	202	186	168	185	206	218	192	205	56	92	168	105
	18-0005		EMK35CR + UNIVERS 2M	188	202	204	198	198	222	208	209	170	34	182	128	180	40	154	124
	18-0058		EMK35CR + UNIVERS 2M	190	230	210	210	122	124	128	124	182	160	194	178	118	70	154	114
	18-0088		EML5 + CYMETA 9AQ	158	197	179	178	160	150	133	147,7	163	153	179	165	137	58	114	103
18-0089		EML5 + CYMETA 9AQ	186	202	189	192,3	164	151	160	158,3	178	168	164	170	145	139	150	144,7	
TIG	16-0336		EML5	>290	>290	252	>277				18	186	180	128					
										Contre-essais -->			52	172	58	94			
							Moyenne des essais -->						111						
	17-0234		EML5	208	262	202	224												
	17-0328		EML5	222	222	214	219												

Légende :

			Pas de critère applicable
			Conforme
			Non conforme
			$Rm(300°C) > Rm(amb)$
			Essais non requis (faible épaisseur) – (4)
			Essais non réalisés (manque de matière) - FNC

Pour les coupons témoins en TIG Orbital :

M	Position Montante
D	Position Descendante

(1) Matière insuffisante pour réaliser les essais de résilience à -20°C. Les essais ont été réalisés sur l'assemblage 17-0319 (traitement par FNC).

(2) Coupon témoin optimisé avec alternance du sens de rotation des passes (pas de distinction entre position montante et descendante).

(3) Coupon témoin spécifique de la soudure F1 de l'isométrique VVP3321TY (soupape MSSV train 3 coupée puis ressoudée suite à un affouillement sur le corps de la soupape).

(4) En raison de la faible épaisseur des coupons, les essais de traction longitudinale dans le métal déposé n'ont pu être réalisés.

Tableau 5 : Résiliences obtenues sur les assemblages témoins des soudures VVP réalisées sur site

4.2.6.2. Position du rapporteur:

Bien que l'ensemble des assemblages témoins présente des valeurs de résilience à 0 °C conformes et pour certains également des valeurs à -20 °C conformes, les valeurs basses à -20 °C de certains assemblages témoins interrogent sur l'atteinte de propriétés mécaniques suffisantes. Par ailleurs la grande disparité dans les résultats d'essais de résilience remet en question la confiance dans la reproductibilité des modes opératoires de soudage mis en œuvre et donc *in fine* la confiance dans l'atteinte effective des caractéristiques souhaitées pour les soudures de production.

4.2.6.3. Constats questionnant la représentativité des assemblages témoins de soudage

i. Écarts : délais de réalisation et de dépouillement des assemblages témoins dépassés

Comme cela avait été détaillé dans le paragraphe 4.1.4.1 pour les soudures de traversée, le code RCC-M prévoit des délais de réalisation et de dépouillement des assemblages témoins, afin notamment de garantir une certaine représentativité de ces dernières au regard des soudures de production.

Les délais de réalisation de la majeure partie des assemblages témoins des soudures réalisées sur site ont été dépassés, avec, pour certains, des délais pouvant aller jusqu'à 9 mois au lieu des 2 mois prévus par le code RCC-M.

Le traitement de ces écarts proposé par le fabricant consistait en une acceptation en l'état de ces écarts, sous réserve de la conformité des essais mécaniques.

Position du rapporteur :

Le rapporteur constate que les délais de réalisation et de dépouillement des assemblages témoins de soudage n'ont pas été respectés. Cet écart est susceptible de remettre en cause la représentativité de ces assemblages par rapport aux soudures de production.

Ces écarts récurrents n'ont pas fait l'objet d'actions correctives ni préventives permettant d'éviter leur renouvellement.

ii. Constat : hétérogénéité des valeurs de résilience obtenues

Les valeurs de résilience obtenues sur les assemblages témoins mettent en évidence une hétérogénéité des propriétés mécaniques obtenues avec le même mode opératoire de soudage sur une même période pour le procédé TIG manuel et les procédés TIG et électrodes enrobées.

Par ailleurs, à la suite de l'obtention de valeurs de résilience non conformes à -20 °C, EDF a engagé des investigations afin d'identifier les phénomènes et paramètres de soudage pouvant expliquer les valeurs basses de résilience. Les éléments techniques identifiés à ce stade concernent principalement les énergies de soudage, les dimensions des passes et le recouvrement entre les passes.

EDF a identifié des « variations » dans la mise en œuvre des modes opératoires de soudage. Ainsi le fabricant et EDF précisent qu'une certaine latitude est laissée aux soudeurs par le mode opératoire de soudage TIG et électrodes enrobées en ce qui concerne les énergies de soudage, le nombre et la disposition des passes de remplissage tout en restant dans le domaine de validité des QMOS.

Position du rapporteur :

Le rapporteur constate que la mise en œuvre des paramètres de soudage pour un même mode opératoire sur une même période a conduit à de fortes variations de valeurs de résilience (conformes ou non conformes). Ce constat conduit le rapporteur à s'interroger sur la reproductibilité du mode opératoire de soudage et la garantie de l'atteinte des caractéristiques mécaniques attendues.

iii. Autres écarts identifiés

En complément des écarts relatifs au dépassement de délais de soudage et de dépeçage des assemblages témoins présentés ci-dessus, les écarts au code RCC-M suivants ont été détectés :

- l'utilisation pour l'assemblage témoin de lots de métaux d'apports différents de ceux de production ;
- des dimensions d'assemblages témoin différentes des soudures de production ;
- des métaux de base utilisés sur les assemblages témoins non conformes aux critères définis par le paragraphe S7810 du code RCC-M qui requiert qu'ils soient suffisamment représentatifs des assemblages auxquels ils se rapportent.

4.2.7. Vieillesse sous déformation

4.2.7.1. Mise en évidence du phénomène

Pour plusieurs assemblages témoins relatifs aux soudures réalisées sur site (tous procédés confondus), les caractéristiques de traction (R_m) mesurées à chaud (300 °C) sont plus élevées que celles mesurées à température ambiante (20 °C), contrairement à ce qui est habituellement constaté. EDF précise dans son courrier en référence [19] que cette inversion, constatée sur certains assemblages témoins est due à l'utilisation de métaux d'apport vraisemblablement sensibles au vieillissement sous déformation.

Le phénomène de vieillissement sous déformation est décrit plus précisément au paragraphe 4.1.5.

Ce phénomène conduit à un décalage de la courbe de transition fragile-ductile vers des températures plus élevées qu'initialement prévu. Il est pris en compte dans les études de conception (calculs de mécanique à la rupture brutale) un décalage limité de 15 °C en début de vie afin de couvrir les phénomènes de vieillissement sous déformation et de vieillissement thermique pouvant se produire pendant les 60 ans d'exploitation.

Le constat de cette inversion de R_m entre haute et basse température remet en cause cette hypothèse.

EDF considère, d'une manière qu'il juge conservatrice à ce stade, et sur la base d'une étude bibliographique, un décalage forfaitaire et enveloppe de 40 °C de la courbe de transition fragile/ductile (au lieu du décalage de 15 °C actuellement pris en compte en conception), afin de couvrir le phénomène de vieillissement sous déformation. A ce stade, cette hypothèse est intégrée dans l'analyse des transitoires sollicitant la ligne VVP ainsi que dans les calculs de rupture brutale correspondants. La démonstration de la robustesse de cette hypothèse fait l'objet d'un programme d'essai en cours, décrit par Framatome dans le document en référence [22].

Le détail des programmes engagés est précisé au paragraphe 6.3.3.

4.2.7.2. Position du rapporteur

Le rapporteur considère que la justification de la maîtrise par le fabricant du phénomène de vieillissement sous déformation, au regard du décalage limité à 15 °C de la courbe de transition fragile–ductile considéré initialement en conception et lors de la SPN de 2005, nécessite une quantification de la sensibilité des matériaux des soudures à ce phénomène de vieillissement.

Par conséquent, étant donné que le phénomène de vieillissement sous déformation peut avoir un impact direct sur le caractère suffisant des caractéristiques mécaniques des soudures, le rapporteur considère nécessaire qu'EDF évalue la sensibilité des matériaux d'apport au phénomène de vieillissement sous déformation et leurs impacts sur la tenue mécanique des soudures. Ces éléments sont analysés dans le paragraphe 6.3.4.

4.2.8. Étendue des réparations supérieure au critère défini

4.2.8.1. Constat

Le code RCC-M précise dans le paragraphe S7610 :

« Si l'étendue des réparations d'une soudure exécutée par un procédé automatique est susceptible de dépasser le cinquième de sa longueur sur au moins la moitié de son épaisseur, la soudure doit être refaite puis recontrôlée à nouveau. ».

L'étendue des réparations calculée par EDF sur certaines soudures réalisées avec le procédé TIG orbital, comme par exemple la soudure VVP FW12, est supérieure aux critères définis par le paragraphe S7610 du code RCC-M.

EDF considère cependant que le procédé TIG orbital n'est pas un procédé « automatique » mais un procédé partiellement mécanisé (ou semi-automatique) tel que le définit le paragraphe S1500 du code RCC-M qui mentionne : *« Un procédé de soudage est partiellement mécanisé lorsqu'un opérateur a la possibilité d'intervenir en cours de soudage, un procédé de soudage totalement mécanisé, automatique ou robotisé est caractérisé par l'impossibilité d'intervention humaine en cours d'opération de soudage. »*

EDF considère ainsi que les dispositions du paragraphe S7610 ne sont pas applicables aux soudures réalisées à l'aide du procédé TIG orbital. EDF a transmis des éléments techniques complémentaires dans le document en référence [16].

4.2.8.2. Position du rapporteur

Le rapporteur rappelle que les dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M trouvent leur origine dans la disposition suivante de l'arrêté du 24 mars 1978 en référence [77], dit arrêté « soudage », aujourd'hui abrogé : *« Annexe III. 13. Si l'étendue des réparations d'une soudure exécutée par un procédé automatique est susceptible de dépasser le cinquième de sa longueur sur au moins la moitié de son épaisseur, la soudure doit être refaite puis contrôlée à nouveau. »*

Le soudage automatique était alors compris comme étant une opération de soudage dont la source d'énergie conduisant à la création du bain fondu n'était pas tenue à la main par un opérateur d'une part et dont l'alimentation du métal d'apport n'était pas réalisé par un produit d'apport tenu à la main d'autre part.

L'objectif de l'exigence définie dans l'arrêté en référence [77] était alors de réparer en totalité les soudures faites avec un procédé automatique lorsque les indications détectées peuvent conduire à des réparations trop importantes en nombre et en étendue. Cette réparation totale permet notamment de s'affranchir de questionnements sur la capacité des contrôles non destructifs à détecter de manière exhaustive des défauts en grand nombre.

En effet, lors de la mise en œuvre d'un procédé de soudage tel que le TIG orbital, pour lequel la source d'énergie et l'alimentation du métal d'apport n'est pas tenue à la main, le soudeur ne peut assurer une maîtrise permanente de son bain de fusion et ne peut corriger rapidement les réglages de sa machine lorsqu'il constate une situation anormale. Cela peut alors conduire à la génération de nombreux défauts.

Par ailleurs, Framatome a calculé la longueur moyenne de défauts détectés sur les circuits secondaires principaux du réacteur EPR de Flamanville. Ces valeurs, recensées dans la note en référence [78], indiquent que la longueur moyenne d'un défaut réalisé avec le procédé TIG orbital est supérieure à celle d'un défaut réalisé avec les procédés TIG et électrodes enrobées.

Le rapporteur considère donc que l'application des dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M au procédé TIG orbital, à l'instar de ce qui était prescrit dans l'arrêté « soudage », est pertinente d'un point de vue technique dans un grand nombre de cas rencontrés. Une telle application est notamment un bon moyen de s'affranchir d'un doute résiduel lié à la capacité des contrôles non destructifs à détecter de manière exhaustive les défauts de compacité.

Le rapporteur considère donc que la non-application des dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M aux soudures réalisées avec le procédé TIG orbital est de nature à remettre en question la confiance dans l'atteinte effective des bonnes propriétés, notamment de compacité, des soudures concernées.

L'analyse technique menée concernant ce point est détaillée au chapitre 8.

Enfin le rapporteur note également que l'étendue des réparations qui se sont révélées être nécessaires souligne le manque de maîtrise de la qualité de réalisation des soudures VVP réalisés sur site et peuvent, *in fine*, remettre en question la confiance dans l'atteinte des caractéristiques requises pour des soudures en exclusion de rupture.

4.2.9.Écarts concernant la détection d'indications dans les soudures après la fin des fabrications

Lors des contrôles ultrasons (UT) réalisés par EDF dans le cadre de la visite complète initiale prévue par la réglementation, des indications non conformes aux critères de fabrication ont été détectées sur certaines soudures VVP réalisées sur site.

Comme précisé au paragraphe 4.1.6, ce constat a fait l'objet de la déclaration d'événement significatif en référence [23]. Cet événement a conduit EDF à mettre en place une organisation spécifique et à réaliser des recontrôles ultrasons sur l'ensemble des soudures des circuits secondaires principaux réalisées par le GMES Nordon-Ponticelli (150 soudures). EDF a constaté que 40 % des soudures des circuits secondaires principaux présentaient des indications qui n'avaient pas été détectées lors des contrôles de fin de fabrication.

Dans le document en référence [7], EDF s'est engagée à réparer l'ensemble des soudures réalisées sur site qui présentent des défauts à réparer. Ces éléments sont précisés dans le paragraphe 8.2.

4.2.10. Autres constats pouvant avoir un impact sur la conformité des soudures au référentiel d'exclusion de rupture

Lors de l'instruction, par l'ASN et l'organisme habilité mandaté par l'ASN pour l'évaluation de la conformité des lignes VVP, des dossiers de réalisation des soudures et de leurs réparations, un certain nombre de constats ont été ouverts. Ces constats ne constituent pas tous des écarts au code, mais sont susceptibles d'affaiblir la confiance dans la maîtrise de la qualité de la réalisation des soudures concernées.

L'analyse par typologie d'écart menée au paragraphe 4.1.7.3 identifie certains types d'écarts d'ores et déjà relevés sur les soudures réalisées sur site. Les paragraphes suivants illustrent plus précisément deux de ces types d'écarts.

4.2.10.1. Absence de réalisation de contrôle par ressuage après un affouillement réalisé lors d'une réparation

Comme précisé au paragraphe 4.1.7.3 (écarts liés au non-respect du phasage RCC-M), pour les réparations imposant l'élimination partielle ou totale de la zone soudée, le paragraphe S7715 du code RCC-M requiert qu'un examen non destructif par magnétoscopie ou par ressuage soit réalisé après l'affouillement de manière à garantir l'élimination complète du défaut ayant conduit à engager la réparation. L'organisme habilité a constaté que ce contrôle n'avait pas été réalisé dans certains cas, comme par exemple pour la soudure FW7 du train 4 où le ressuage n'a pas été effectué. Ceci constitue un écart au code RCC-M qui impose les critères d'acceptation pour ces contrôles en fin d'affouillement, à savoir :

- pour un affouillement ne concernant que la partie « métal fondu », toute indication supérieure à 1 mm est inacceptable ;
- pour un affouillement affectant en partie le « métal de base environnant », les critères d'acceptation sont définis dans les tableaux S7363.1 et 2 du code RCC-M.

EDF considère que la mise en œuvre de contrôles par ultrasons et par radiographie en fin de fabrication garantit l'absence de défauts laissés en l'état.

Le rapporteur considère nécessaire qu'EDF justifie que les performances des contrôles volumiques de fin de fabrication sont équivalentes à celles des contrôles surfaciques qui n'ont pas été mis en œuvre au cours de la fabrication. L'analyse des performances des contrôles volumiques de fin de fabrication réalisée par le rapporteur pour les contrôles des soudures de traversée au paragraphe 6.3.5.9 est transposable aux soudures réalisées sur site.

Cet écart est considéré comme mineur à ce stade et ne sera pas abordé dans la suite du rapport.

4.2.10.2. Géométrie des cordons de soudures après arasage

Comme évoqué au paragraphe 4.1.7.3 (écarts liés aux états de surface non conformes), le code RCC-M prévoit des dispositions, aux paragraphes F 4320 et 4330, concernant le parachèvement des surfaces après la réalisation d'une soudure, afin de prévenir le risque de propagation de défaut par concentration de contrainte et d'améliorer la contrôlabilité. Ces irrégularités de surface peuvent s'expliquer par des problèmes d'alignement entre les deux pièces soudées, par des défauts de géométrie des tuyauteries (ovalisation, surépaisseur ou sous-épaisseur), ou par la manière dont les deux surfaces sont raccordées après avoir réalisé la soudure (élimination du bourrelet de soudure).

Ces exigences font l'objet de contrôles dimensionnels ponctuels, sans que l'intégralité des surfaces ne soit contrôlée. Lors de certains recontrôles ultrasonores, il est apparu que la géométrie après arasage de cordons de soudures en surface interne ou externe, bien que conforme au requis du code RCC-M, pouvait provoquer l'apparition d'échos parasites (échos de géométrie) localisés ou généralisés. EDF a notamment identifié neuf soudures des circuits secondaires principaux, dont cinq soudures des lignes VVP, présentant un état de parachèvement externe non conforme aux exigences définies dans le paragraphe MC2141 du code RCC-M¹⁴.

L'opérateur effectuant le contrôle doit être en mesure d'identifier et de justifier l'origine de ces échos. Pour cela il s'appuie sur des critères explicités dans la procédure de contrôle de fabrication et une validation par un expert certifié de niveau 3 par la Cofrend.

En outre ces états de surface irréguliers peuvent perturber le déplacement des capteurs, voire réduire les zones inspectables.

Cet écart est considéré comme mineur à ce stade et ne sera pas abordé dans la suite du rapport.

4.2.10.3. Position du rapporteur

Ces constats soulignent le manque de maîtrise de la qualité de réalisation des soudures réalisées sur site. Le rapporteur considère que certains de ces écarts, et surtout leur éventuel cumul, pourraient, en fonction de leur gravité, remettre en question le respect du référentiel technique d'exclusion de rupture, en portant atteinte notamment à la confiance dans l'atteinte de la qualité attendue (cas des problèmes d'arasage ou encore l'absence de ressuage réalisé en fond d'affouillement).

Le rapporteur considère que ces points doivent faire l'objet de justifications complémentaires dans le cadre des analyses spécifiques qui seront menées sur chacune des soudures.

4.2.11. Conclusions

Malgré les écarts en préfabrication détectés dès 2013 par le GMES et connus d'EDF en 2015, et le fait que leur traitement aurait dû conduire à l'identification de leurs causes profondes, la réalisation des soudures des lignes VVP s'est poursuivie sur site jusqu'en 2017, sans que les exigences d'exclusion de rupture ne fassent l'objet d'une contractualisation entre le fabricant Framatome et son sous-traitant en charge de la réalisation des soudures sur site.

Les conditions de réalisation des soudures et la surveillance de ces opérations n'ont pas été satisfaisantes, conduisant à la présence, pour certains modes opératoires de soudage, de défauts dans des proportions inhabituelles qui ont nécessité de nombreuses réparations en cours de fabrication.

Enfin les contrôles de fin de fabrication ont été défailants et n'ont pas permis de détecter l'ensemble des indications présentes dans les soudures.

¹⁴ Le paragraphe MC2141 du code RCC-M précise que les surfaces d'exploration doivent être exemptes de peinture, calamine non adhérente, milieu de couplage séché, et tout autre produit et irrégularités de surface susceptibles soit de nuire à la transmission des ondes dans la pièce, soit de gêner le libre mouvement du palpeur, soit de provoquer des erreurs d'interprétation (échos parasites dus à des transformations d'ondes).

Ces principaux constats, auxquels s'ajoutent d'autres écarts détectés lors des revues documentaires, traduisent, par leur nombre et leur nature, une défaillance d'ensemble de la maîtrise de la réalisation de ces activités de soudage, tant en termes de ressources techniques et de gestion des compétences des intervenants qu'en termes d'organisation, d'encadrement et de surveillance.

Après analyse de l'ensemble des écarts, l'exploitant considère que les procédés de soudage TIG manuel et TIG et électrodes enrobées associés à leurs métaux d'apports respectifs se sont révélés être inadaptés pour répondre aux exigences requises par le référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005 complété par les exigences spécifiées par le fabricant.

En effet certains écarts détectés sur les soudures réalisées sur site avec ces procédés remettent en cause le respect de ce référentiel d'exclusion de rupture. C'est en particulier le cas des valeurs de résilience à -20 °C inférieures au requis obtenues sur les assemblages témoins, qui couplés à une sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation non évaluée, interrogent sur l'atteinte des valeurs de résilience à 0 °C considérées initialement avec l'hypothèse d'une maîtrise du vieillissement. D'autres écarts concernant les conditions de réalisation des QMOS ou des assemblages témoins réduisent encore la confiance dans l'atteinte des propriétés attendues pour ces soudures.

En ce qui concerne les soudures réalisées sur site avec le procédé TIG orbital, les valeurs de résilience mesurées sur les assemblages témoins répondent aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture avec des marges permettant de couvrir raisonnablement certaines incertitudes. Certains écarts constatés sur ces soudures peuvent néanmoins remettre en question la confiance dans l'atteinte de certaines caractéristiques attendues pour les matériaux (écarts concernant les conditions de réalisation des QMOS, indications non détectées lors des contrôles de fin de fabrication, étendue des réparations supérieure au critère du code de construction).

La démarche de traitement des écarts proposée par EDF devra donc évaluer l'impact de ces écarts sur les caractéristiques finales des soudures réalisées avec le procédé TIG orbital.

Comme cela a été évoqué en introduction, l'analyse de la démarche de traitement des écarts objet du présent rapport a été réalisée sur la base des écarts connus à la date de sa rédaction, EDF poursuivant le recensement des écarts affectant chacune des soudures VVP en exclusion de rupture. Ce recensement n'étant par ailleurs pas encore achevé pour les soudures réalisées sur site, la liste précise des écarts qui subsisteraient pour chaque soudure après avoir réalisé les opérations de réparation ou de remise à niveau proposées par EDF, et notamment leur gravité, n'est pas connue du rapporteur.

Ainsi, en fonction de leur gravité, des écarts pourraient remettre en cause le respect du référentiel d'exclusion de rupture et les positions du rapporteur.

5. Démarche de traitement des écarts affectant les soudures des lignes VVP envisagée par EDF

L'absence de prescription, par le fabricant Framatome à son sous-traitant en charge de la réalisation des soudures, des exigences de fabrication spécifiques à l'exclusion de rupture a conduit à la mise en œuvre de modes opératoires de soudage et de matériaux inadaptés pour atteindre ces exigences renforcées, notamment en ce qui concerne les propriétés mécaniques.

De plus de nombreux écarts ont été rencontrés lors des opérations de fabrication, comme cela a pu être détaillé aux paragraphes 4.1 et 4.2 du présent rapport.

L'ensemble de ces constats remettent en cause, d'une part le caractère suffisant des caractéristiques, notamment mécaniques et de compacité, des soudures pour assurer l'intégrité des soudures tout au long de la vie de l'installation et d'autre part la confiance nécessaire dans l'atteinte effective de ces caractéristiques.

Cette situation conduit à s'interroger sur le respect des exigences spécifiques à la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création de l'installation en référence [8].

Dans le contexte réglementaire applicable décrit au chapitre 3 du présent rapport, l'ASN a rappelé à EDF, dans son courrier en référence [6], qu'EDF doit apporter la justification de la conformité de l'ensemble des soudures au décret d'autorisation de création en référence [8]. A cette fin, l'ASN a indiqué à EDF la nécessité de distinguer les soudures, pour lesquelles une résorption de certains écarts permettra de se conformer au référentiel d'exclusion de rupture tel que défini à l'issue de la SPN de 2005 complété par les spécifications de l'exploitant et du fabricant, des autres soudures pour lesquelles les écarts susceptibles de subsister ne permettent pas à EDF de s'appuyer sur le respect du référentiel issu de la SPN de 2005 pour apporter la démonstration de l'atteinte des objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret en référence [8].

Cette position peut être synthétisée par le logigramme de la figure 8 applicable pour chacune des soudures VVP en exclusion de rupture :

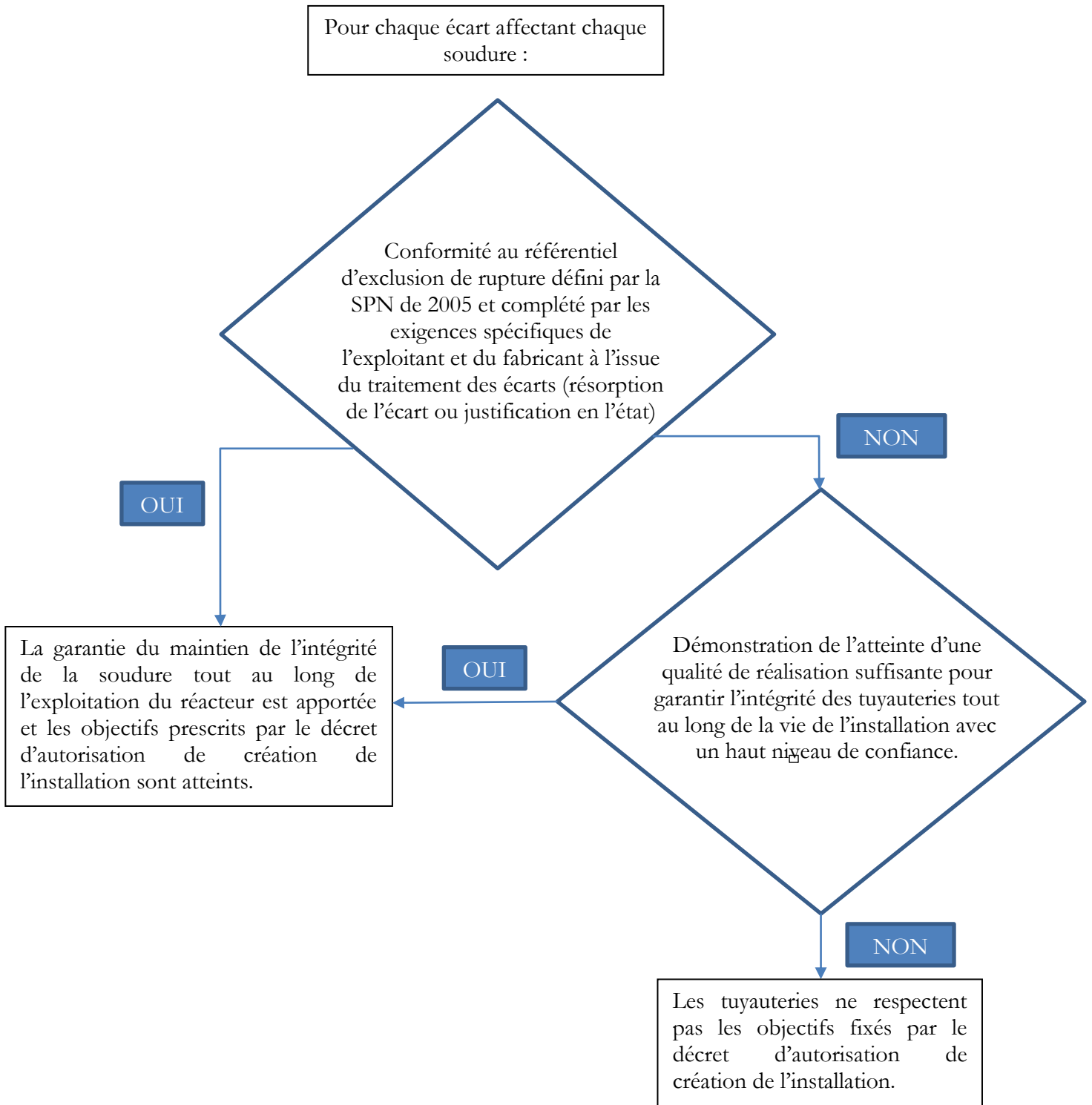


Figure 8 : Démarche de justification de la conformité des soudures aux objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création

5.1. Démarche générale de justification présentée par EDF

La démarche présentée par EDF dans son dossier en référence [7] consiste à analyser l'historique et l'ensemble des écarts affectant chaque soudure VVP (en incluant les écarts relatifs aux métaux de base associés) afin de statuer sur le fait que la soudure à l'état final satisfait aux objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création du réacteur.

L'exploitant précise dans son dossier en référence [7] que les écarts survenus lors des opérations de fabrication sont de natures différentes et sont susceptibles d'avoir un impact :

- sur les modes de défaillance ;
- sur le niveau de confiance dans la connaissance des caractéristiques des matériaux des soudures.

Cette approche correspond à celle développée aux paragraphes précédents du présent rapport relatifs aux écarts détectés sur les soudures de traversée et sur les soudures réalisées sur site.

Les écarts principaux rencontrés et susceptibles d'avoir un impact sur les modes de défaillance concernent les valeurs de résilience non conformes détectées en QMOS, en recette de métaux d'apport et sur assemblages témoins, l'absence d'évaluation du phénomène de vieillissement sous déformation ainsi que la détection d'une indication inacceptable.

Les écarts principaux rencontrés susceptibles de remettre en cause la confiance dans l'atteinte des caractéristiques des matériaux concernent la représentativité des assemblages témoins, l'étendue des réparations par soudage, la reproductibilité des modes opératoires de soudage et la non-détection de défauts lors des contrôles de fin de fabrication.

Ces éléments sont présentés par EDF dans le dossier en référence [7].

EDF fonde sa démarche non pas vis-à-vis du respect du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005 et complété par les spécifications de l'exploitant et du fabricant mais vis-à-vis de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création de l'installation, à savoir la garantie du maintien de l'intégrité des soudures tout au long de la vie de l'installation.

EDF considère que l'évaluation de cette garantie passe en premier lieu par l'évaluation de l'impact des écarts sur la tenue mécanique des soudures d'une part vis-à-vis du risque de rupture brutale et d'autre part vis-à-vis des autres risques d'endommagement. En cas de remise en cause de la tenue mécanique, EDF conclut à la nécessité de réaliser une remise en conformité au référentiel d'exclusion de rupture.

La démarche d'EDF mentionne par ailleurs que les autres écarts n'affectant pas les modes de défaillance mais uniquement le niveau de confiance n'interfèrent pas dans la justification par calcul de la tenue mécanique. Elle précise toutefois que la prise en compte de ces écarts conduit à un renforcement du suivi en service.

En dernier lieu, les écarts mineurs n'affectant ni les modes de défaillance, ni la confiance dans les caractéristiques des matériaux des soudures font l'objet d'un traitement d'écart sans impact sur les soudures et leur suivi.

EDF illustre dans son document en référence [7] cette première phase de sa démarche par le logigramme présenté dans la Figure 9.

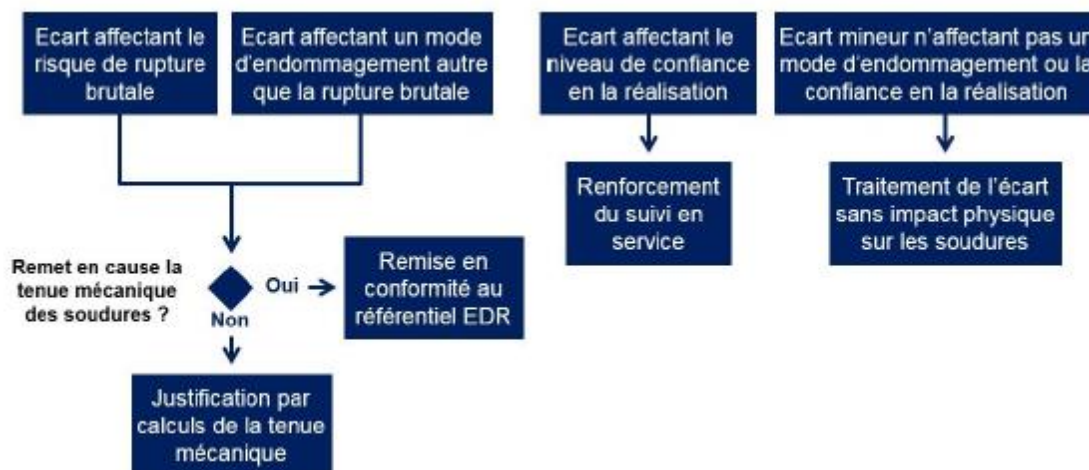


Figure 9 : Logigramme de traitement des écarts extrait du courrier EDF en référence [7]

Différentes étapes dans la proposition de traitement des écarts

Même si la justification par calcul de la tenue mécanique apparaît comme le scénario de traitement à examiner systématiquement comme présenté dans le logigramme précédent, EDF a néanmoins défini des engagements complémentaires établissant différentes étapes dans le traitement des écarts.

La première étape ainsi considérée dans la proposition de traitement des écarts proposée par EDF est la remise en conformité des soudures au référentiel d'exclusion de rupture. La proposition de traitement des écarts d'EDF comprend donc la remise en conformité d'un grand nombre de soudures, lorsque raisonnablement possible.

Lorsque les caractéristiques mécaniques sont remises en cause, cette remise en conformité consiste soit à remettre à niveau les soudures en affouillant puis en remplissant à nouveau les passes de remplissage et de finition (en conservant donc les passes de racine et de soutien) avec un mode opératoire de soudage répondant aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture. Cette remise en conformité consiste également à réparer localement les soudures lorsque des défauts de compacité ont été identifiés.

Une remise en conformité n'est pas envisagée pour les soudures réalisées avec le procédé TIG orbital lorsque les contrôles ultrasons n'ont pas mis en évidence de défauts de compacité. En effet EDF considère que les propriétés mécaniques obtenues avec ce procédé sont suffisantes et que les écarts pouvant subsister dans ces soudures ne sont pas de nature à remettre en question le caractère suffisant des propriétés mécaniques ou de compacité.

Enfin EDF n'envisage pas non plus de remise en conformité des soudures des traversées estimant que cette dernière n'est pas raisonnablement possible avant la mise en service du réacteur en raison des difficultés d'accessibilité, des risques associés aux opérations de réparation qui nécessiteront d'importantes études détaillées et de nombreuses opérations de préparation ainsi que des délais associés.

Dans le cas où cette première étape de remise en conformité n'est pas raisonnablement envisageable, ce qui semble être l'hypothèse retenue par EDF en ce qui concerne les soudures des traversées, EDF évalue dans un deuxième temps la possibilité de renoncer à l'hypothèse d'exclusion de rupture en réalisant les études complémentaires nécessaires à la démonstration de sûreté et en envisageant l'installation des dispositifs physiques de mitigation des conséquences des ruptures.

En cas d'impossibilité de renoncer à l'hypothèse d'exclusion de rupture, la dernière étape de la démarche de traitement des écarts d'EDF consiste à maintenir en l'état les soudures en justifiant la conformité aux objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création de l'installation. Cette justification s'appuie sur un dossier spécifique pour chaque soudure comprenant la justification par calcul de la tenue mécanique, des dispositions de renforcement de suivi en service permettant de compenser la perte de niveau de confiance dans la qualité de réalisation des soudures et la documentation techniques traçant le traitement des écarts y compris ceux sans réel impact sur les propriétés de la soudure ou son suivi en service.

La Figure 10 extrait du document en référence [7], illustre ces différentes étapes retenues par EDF.

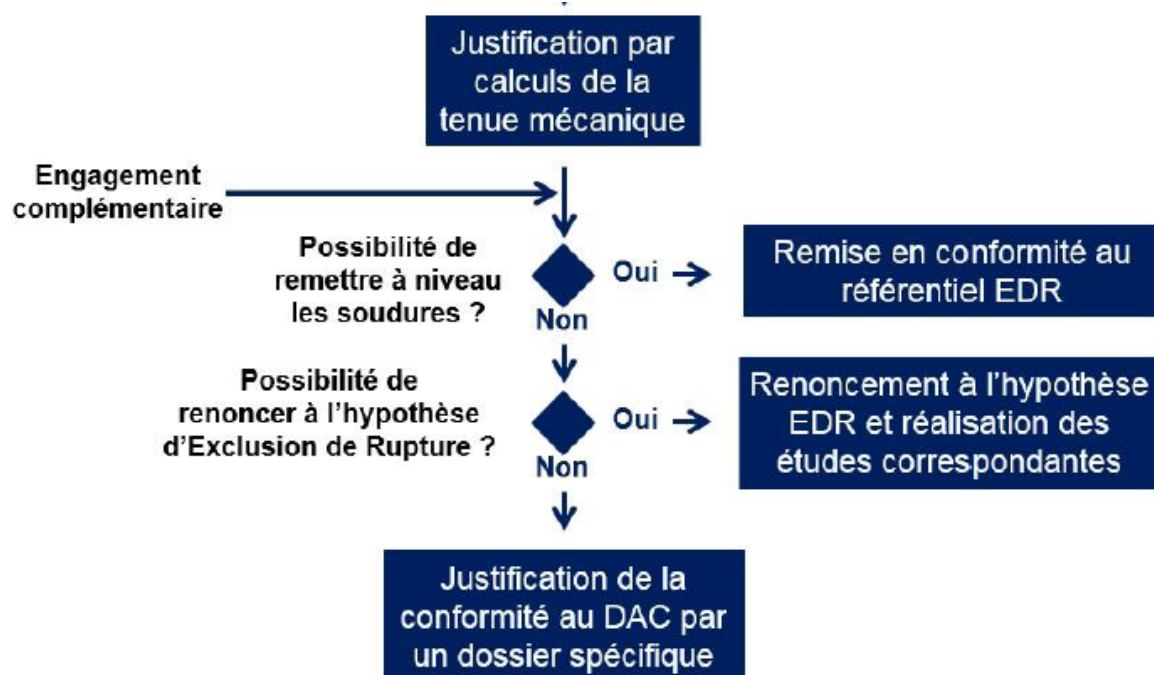


Figure 10 : Extrait du logigramme de traitement des écarts vis-à-vis du risque de rupture brutale

5.2. Position du rapporteur sur la démarche générale de justification présentée par EDF

La démarche de traitement des écarts définie par l'exploitant doit s'inscrire dans l'objectif prescrit par le décret en référence [8] qui encadre la démarche d'exclusion de rupture :

«Des dispositions sont prises pour garantir tout au long de la vie de l'installation, l'intégrité : [...] des tuyauteries primaires et secondaires principales pour lesquelles la survenue d'une rupture circonférentielle doublement débattue n'est pas retenue dans les conditions de fonctionnement de référence étudiées dans le rapport de sûreté.»

Ces dispositions doivent couvrir l'ensemble des aspects suivants :

- *la qualité de la conception et la vérification associée ;*
- *la qualité de la fabrication et les contrôles associés ;*
- *le suivi en service devant rendre hautement improbable non seulement l'apparition d'altérations de l'équipement remettant en cause la prévention des différents modes d'endommagement mais aussi l'absence de détection à temps de ces altérations si elles survenaient néanmoins. ».*

Si la SPN de 2005 a fixé un cadre d'exigences en établissant un référentiel d'exclusion de rupture permettant d'atteindre cet objectif afin de garantir tout au long de la vie de l'installation l'intégrité des équipements, le rapporteur considère que d'autres démarches pouvaient être menées pour apporter cette même garantie.

Le rapporteur note que la démarche d'EDF examine en premier lieu la possibilité de remettre en conformité les soudures, ce qui est approprié. La démarche la mieux à même d'atteindre un niveau de confiance élevé consiste en effet en la mise en œuvre de modes opératoires de soudage permettant d'obtenir a priori le niveau de performance visé, puis de mettre en œuvre les contrôles permettant de s'assurer de l'atteinte du niveau visé.

Par ailleurs, EDF propose de compenser globalement les écarts affectant le niveau de confiance sur les caractéristiques du matériau par un renforcement du contrôle en service. **Bien que ce renforcement soit favorable vis-à-vis de la démarche de défense en profondeur, le rapporteur considère que ce contrôle en service, qui ne porte que sur la compacité du matériau, ne permet pas de renforcer le niveau de confiance sur les propriétés mécaniques du matériau, qui sont pourtant affectées par le plus grand nombre d'écarts.**

5.3. Démarche d'EDF appliquée aux soudures de traversée

Les écarts et constats relatifs aux soudures des traversées ont été présentés au paragraphe 4.1 du rapport. Ils concernent la QMOS du procédé fil/flux pour le remplissage, les recettes des métaux d'apports et le recyclage du flux, les résultats et la représentativité des assemblages témoins, l'absence d'évaluation de la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation, l'indication non-volumique détectée sur une des soudures de traversée et d'autres écarts traduisant un nombre important de réparations nécessaires et mettant en cause la maîtrise du mode opératoire de soudage.

Parmi ces écarts, ceux relatifs aux valeurs de résilience non conformes détectées en QMOS, en recette de métaux d'apport et sur assemblages témoins, à la sensibilité des métaux d'apport au vieillissement sous déformation ainsi qu'à la détection d'une indication non-volumique remettent en cause la prévention des modes de défaillance dont celui de rupture brutale.

D'autres écarts, comme l'étendue des réparations, soulignent un manque de maîtrise de la qualité de réalisation des soudures VVP réalisées en atelier et sont de nature à remettre en question l'atteinte effective des caractéristiques attendues au titre du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005.

En application des logigrammes présentés précédemment, la première étape à considérer concerne la remise en conformité des soudures. Comme précisé précédemment, EDF considère que la remise à niveau des soudures de traversée n'est pas raisonnablement envisageable avant la mise en service du réacteur. EDF précise en complément que la remise en conformité des soudures de traversée pourrait être réalisée, si nécessaire, au premier arrêt du réacteur.

EDF a ensuite examiné la possibilité de renoncer à l'exclusion de rupture. Le dossier de l'exploitant transmis en référence [7] n'est pas conclusif mais met d'ores et déjà en évidence des difficultés majeures pour justifier la tenue des casemates vapeurs et des locaux des bâtiments des auxiliaires de sauvegarde vis-à-vis de l'augmentation de la pression induite par les masses et énergie libérées en cas de rupture des tuyauteries ainsi que pour installer des dispositifs anti-fouettement pour la gestion des ruptures des tuyauteries à haute énergie.

En conséquence, selon la figure 10 présentée dans ce chapitre, EDF envisage le maintien en l'état des soudures de traversée sur la base d'un dossier de justification de la conformité aux objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création de l'installation. Etant donné les écarts constatés sur les soudures de traversée, cette justification ne pourra s'appuyer sur le respect du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005.

Cette démarche s'appuie notamment, comme mentionné plus haut, sur la justification par calcul de la tenue mécanique, sur des dispositions de renforcement de suivi en service permettant de compenser la perte de niveau de confiance dans la qualité de réalisation des soudures et sur la documentation techniques traçant le traitement des écarts y compris ceux sans réel impact sur les propriétés de la soudure ou son suivi en service. EDF précise également dans son document en référence [7] qu'en ce qui concerne les calculs de tenue mécanique pour les soudures de traversée non conformes au référentiel d'exclusion de rupture : *« le niveau de confiance associé à cette démonstration dépend de la connaissance des caractéristiques mécaniques retenues dans les calculs, elles-mêmes dépendant de la richesse de la base expérimentale utilisée et de sa représentativité. Les limites de cette base expérimentale sont compensées par des conservatismes dans les caractéristiques mécaniques utilisées dans les calculs de façon à disposer d'une démonstration avec un haut niveau de confiance. »*

La démarche de traitement des écarts sera détaillée dans le chapitre 6 relatif aux soudures des traversées.

5.4. Position du rapporteur sur la démarche d'EDF appliquée aux soudures de traversée

Le rapporteur note que pour les soudures de traversée la démarche d'EDF consiste à justifier du respect des objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création sans remise en conformité des soudures au référentiel d'exclusion de rupture.

En effet compte-tenu de la configuration des soudures des traversées, leur remise à niveau nécessitera des études détaillées et des opérations de préparation dans des délais qu'EDF ne juge pas raisonnablement compatible avec la mise en service du réacteur. Par ailleurs, EDF considère que le renoncement à l'hypothèse d'exclusion de rupture est très complexe voire impossible pour les soudures de traversée VVP. En conséquence, EDF envisage de justifier, notamment par des calculs de mécanique à la rupture brutale, le respect des objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création sans remise en conformité des soudures au référentiel d'exclusion de rupture.

Le rapporteur note qu'EDF n'écarte pas le scénario de remise en conformité des soudures pour des raisons associées à la faisabilité des opérations mais plutôt en raison des délais de préparation et de réalisation nécessaires pour sécuriser les risques associés aux opérations.

Le rapporteur note également que l'exploitant structure la justification du respect de l'objectif du décret d'autorisation de création par des calculs de tenue mécanique vis-à-vis des modes d'endommagement et principalement de la rupture brutale.

Comme évoqué plus haut, EDF propose de compenser globalement les écarts affectant le niveau de confiance sur les caractéristiques du matériau par un renforcement du suivi en service et le rapporteur considère que ce suivi en service, qui ne porte que sur la compacité du matériau, ne permet pas de renforcer le niveau de confiance sur les propriétés mécaniques du matériau, qui sont pourtant affectées par le plus grand nombre d'écarts. La confiance à accorder aux résultats des calculs de mécanique de la rupture brutale dépendant directement du niveau de confiance dans les données d'entrée de ce calcul, le seul renforcement du suivi en service est donc à lui seul insuffisant.

Pour le cas spécifique des soudures de traversée non conformes au référentiel d'exclusion de rupture, le rapporteur note qu'EDF prévoit néanmoins de compenser les limites en termes de confiance dans les caractéristiques du matériau prises en données d'entrée des calculs de tenue mécanique par l'introduction de conservatismes dans ces caractéristiques mécaniques utilisées dans les calculs.

La démarche présentée par EDF ne précise cependant pas la manière dont seront définis ces conservatismes. En particulier EDF n'explique pas comment chaque élément constituant sa justification du respect des objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création permet de compenser les altérations de confiance liées aux écarts mentionnés au chapitre 4. **Par conséquent, le rapporteur considère que la démarche n'apporte pas, en l'état, la démonstration du haut niveau de confiance dans l'atteinte des propriétés des matériaux suffisantes pour prévenir les différents modes de défaillance.**

Le rapporteur considère alors qu'une approche fondée sur un calcul de rupture brutale nécessite de disposer au préalable d'une connaissance robuste du comportement du matériau des soudures et de ses propriétés et l'introduction de conservatismes dans les calculs. Ces conservatismes sont nécessaires pour prendre en compte les conséquences des écarts affectant le niveau de confiance au niveau de chaque donnée d'entrée du calcul à la rupture brutale - ce qui comprend la compacité du matériau et les chargements considérés et non pas uniquement les caractéristiques mécaniques -, afin de définir pour chacune d'entre elles une valeur enveloppe, dont l'exploitant doit démontrer qu'elle est atteinte avec un haut niveau de confiance.

Cette position du rapporteur concernant les conservatismes a conduit EDF à s'engager, dans son courrier du 15 mars 2019, en référence [98] et en annexe 13, à établir :

- une matrice de conformité pour chacune des soudures qui listera l'ensemble des écarts détectés et non résorbés par l'opération de réparation ou de remise à niveau. Ces écarts seront alors classifiés selon leur impact sur les données d'entrées des calculs de rupture brutale (chargement, caractéristiques mécaniques ou compacité) ;
- une synthèse, pour juin 2019, établissant avec un haut niveau de confiance le caractère enveloppe de chacun des paramètres de calculs de rupture brutale, au regard notamment des écarts non résorbés par les réparations et remises à niveau. Ce livrable valorisera le bilan des conservatismes considérés dans les calculs de rupture brutale pour les 3 données d'entrée.

Les données d'entrées relatives aux caractéristiques mécaniques et à la compacité sont abordées dans les chapitres 6 et 7, où seront notamment précisées les recommandations du rapporteur en matière de connaissance robuste du comportement du matériau des soudures et de ses propriétés. Concernant celles relatives au chargement, le courrier d'EDF en référence [76] mentionne l'introduction de conservatisme dans la définition des situations et charges sans préciser les valeurs de ces conservatismes.

L'engagement d'EDF, objet du projet d'action n° 1 dans le courrier en annexe 13, est recevable pour ce qui concerne la méthode d'identification des conservatismes à introduire. Ces éléments techniques devront cependant faire l'objet d'une instruction approfondie.

Dans l'attente de cette instruction, le rapporteur réserve sa position quant à la prise en compte adéquate des conséquences des écarts sur le niveau de confiance des données d'entrée des calculs à la rupture brutale.

Même si le rapporteur considère, en cohérence avec la position de l'ASN exprimée dans les courriers en référence [4] et [6], que le scénario de remise en conformité doit être privilégié, il fera néanmoins l'analyse dans le chapitre 6 du présent rapport de chacun des éléments apportés par EDF pour constituer sa justification du respect des objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation au regard du caractère suffisant des propriétés pour garantir l'intégrité des soudures tout au long de la vie de l'installation et du haut niveau de confiance attendu dans l'atteinte effective de ces propriétés.

5.5. Démarche d'EDF appliquée aux autres soudures

Les écarts relatifs aux soudures réalisées sur site ont été présentés au paragraphe 4.2 du présent rapport.

Les valeurs de résilience non conformes observées à -20 °C sur les assemblages témoins couplées à une sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation interrogent sur l'atteinte des bonnes propriétés de résilience à 0 °C considérées initialement en faisant l'hypothèse d'une maîtrise du vieillissement. Cet écart auquel se rajoutent d'autres écarts comme les conditions de réalisation de QMOS non conformes ou les valeurs de traction non conformes obtenues en recette de métaux d'apport, remettent en cause le respect du référentiel issu de la SPN de 2005 complété par les spécifications de l'exploitant et du fabricant.

D'autres écarts comme le désalignement ou l'étendue des réparations soulignent un manque de maîtrise de la qualité de réalisation des soudures VVP réalisés sur site, et peuvent, *in fine*, également remettre en cause l'atteinte des caractéristiques requises.

L'analyse de ces écarts a conduit l'exploitant à conclure que l'utilisation des modes opératoires de soudage TIG manuel (avec les métaux d'apports EMK35Cr et EML5) et TIG et électrodes enrobées (avec les métaux d'apports Univers 2M et CYMETA) est inadaptée pour répondre aux exigences requises par le référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005, complété par les spécifications de l'exploitant et du fabricant.

En application des logigrammes précisés précédemment, EDF envisage une remise à niveau de ces soudures en utilisant un mode opératoire de soudage conforme à ce référentiel d'exclusion de rupture. Ce mode opératoire de soudage pourra utiliser le procédé TIG orbital (avec le métal d'apport DMOI-G) ou un nouveau procédé TIG et électrodes enrobées (avec le métal d'apport Tenacito-R) qui fait l'objet d'un programme de qualification permettant de vérifier sa conformité au référentiel d'exclusion de rupture. Ce programme prévoit une quantification du décalage de la courbe de transition fragile-ductile causé par le phénomène de vieillissement sous déformation.

Ces éléments sont détaillés dans le chapitre 8.

Afin d'éviter les contraintes de désalignement, la remise à niveau prévue par EDF conduit à conserver les passes de racine et de soutien.

EDF précise, dans son courrier en référence [76], que ces passes maintenues en l'état sont constituées de passes réalisées avec le procédé TIG manuel avec les métaux d'apport EML5 ou EMK35Cr ainsi que, pour certaines soudures, de résidus de passes en électrodes enrobées réalisées avec les matériaux d'apport Cymeta et Univers 2M.

Pour ces passes, la démarche d'EDF consiste en la justification que l'épaisseur de ces passes est sans impact sur la tenue mécanique des soudures.

Les autres soudures réalisées sur site avec le procédé TIG manuel pour les passes de racine et TIG orbital pour les passes de remplissage sont également concernées par des défauts de compacité et d'autres écarts au code RCC-M.

Concernant les défauts de compacité, EDF prévoit de réparer ces soudures afin d'établir leur conformité au code RCC-M.

5.6. Position du rapporteur sur la démarche d'EDF appliquée aux autres soudures

Le rapporteur note que pour les soudures réalisées sur site la démarche d'EDF consiste à justifier du respect de l'objectif du décret d'autorisation de création avec remise en conformité des soudures au référentiel exclusion de rupture.

L'ensemble des soudures réalisées sur site est concerné par une remise en conformité au référentiel exclusion de rupture. Suivant la typologie des écarts affectant les soudures, cette remise en conformité nécessite un traitement dédié :

- lorsque les écarts sont relatifs au référentiel d'exclusion de rupture, la remise en conformité des soudures vis-à-vis du référentiel d'exclusion de rupture nécessite de reprendre les soudures. C'est en particulier le cas des soudures réalisées avec les procédés TIG manuel et TIG et électrodes enrobées, ou encore les soudures réalisées en TIG orbital et présentant des défauts de compacité. Ce scénario est privilégié par EDF puisqu'il considère que cette remise en conformité ne présente pas de difficultés majeures tant en termes d'accessibilité que de réalisation ;
- lorsque les écarts remettent en cause le niveau de confiance dans les caractéristiques des matériaux obtenues, l'exploitant doit apporter les justifications permettant de considérer que les modalités de traitement des écarts permettent de restaurer le niveau de confiance et que les caractéristiques des matériaux garanties dans ce contexte sont conformes à celles du référentiel exclusion de rupture. C'est le cas notamment des soudures réalisées avec le procédé TIG orbital et les passes racines des autres soudures réalisées sur site avec le procédé TIG manuel.

Le traitement des soudures réalisées sur site avec les procédés TIG manuel et TIG et électrodes enrobées, accompagné d'une justification suffisante du maintien en l'état des passes de racine et de soutien est de nature à pouvoir assurer le respect du référentiel défini dans le cadre de la SPN de 2005 et ainsi répondre aux objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création de l'installation.

En ce qui concerne le traitement des soudures réalisées en TIG orbital, les valeurs de résilience obtenues sur les assemblages témoins à -20 °C et à 0 °C répondent aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005 et présentent des marges permettant de couvrir certaines incertitudes. Néanmoins le traitement des écarts affectant ces soudures, comme ceux associés à la représentativité des assemblages témoins, aux modalités de réalisation des réparations et à l'éventuelle sensibilité du mode opératoire de soudage (métal d'apport DMOI-G) au phénomène de vieillissement sous déformation devra statuer sur le caractère suffisant des marges constatées pour couvrir ces écarts avec un haut degré de confiance. La démarche de traitement d'EDF devra donc évaluer l'impact de ces écarts sur les caractéristiques finales des soudures.

Le rapporteur considère donc que la démarche proposée par l'exploitant pour le traitement des écarts des soudures réalisées sur site est globalement appropriée au regard des objectifs à atteindre dans le cadre d'une démarche d'exclusion de rupture.

6. Soudures des traversées d'enceinte

Comme mentionné au paragraphe 2.1, les soudures des traversées VVP ont été préfabriquées en usine avec les procédés de soudage TIG manuel pour les passes de racine et de soutien et fil sous flux pour les passes de remplissage. Comme indiqué dans le chapitre 4.1, les écarts détectés ne permettent pas de respecter le référentiel de la SPN de 2005 et sa déclinaison par le fabricant (valeurs de résilience non conformes en QMOS, en recette de métaux d'apport, sur assemblages témoins de soudage, sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation non évaluée, présence d'une indication inacceptable).

Un nombre significatif d'écarts remet également en cause la confiance dans le respect des caractéristiques attendues pour les matériaux de ces soudures (représentativité des assemblages témoins, absence de détection de défauts en fin de fabrication, écart de désalignement, étendue et nombre de réparations).

Dans le présent paragraphe, le rapporteur précise l'analyse technique menée par l'exploitant, en lien avec la stratégie de traitement des écarts décrite précédemment, pour le cas des soudures de traversée d'enceinte des lignes VVP.

Comme indiqué dans les logigrammes de la Figure 9 et de la Figure 10 présentés au chapitre 5, EDF structure sa démarche de traitement des écarts affectant chaque soudure autour de trois étapes successives :

- dans un premier temps est évaluée la possibilité de remettre à niveau les soudures en procédant par exemple à leur réparation ou leur remplacement ;
- dans un second temps est analysée la possibilité de renoncer à la démarche d'exclusion de rupture pour ces soudures ;
- enfin, si la remise à niveau des soudures et le renoncement à la démarche d'exclusion de rupture ne sont pas considérés comme possibles, EDF prévoit de justifier que le maintien en l'état des soudures ne remet pas en cause la conformité aux objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création de l'installation.

6.1. Remise en conformité des soudures au référentiel d'exclusion de rupture

Dans son courrier du 2 février 2018 en référence [4], puis dans son courrier du 2 octobre 2018 en référence [6], l'ASN considérait que la remise en conformité des soudures à leur référentiel de fabrication initialement prévu devait être privilégiée.

Ces courriers invitaient l'exploitant à engager, en parallèle de l'instruction du dossier, les actions préalables à la remise en conformité des soudures, qu'EDF envisage de maintenir en l'état, comprenant notamment :

- l'approvisionnement des tuyauteries, des équipements et des matériaux d'apport ;
- l'établissement d'un programme détaillé et jalonné décrivant les opérations à mener pour développer, qualifier et mettre en œuvre les dispositifs nécessaires pour accéder aux soudures, éliminer ou extraire les parties à réparer, et procéder aux réparations.

Une première étude de faisabilité en référence [21] a été transmise par EDF le 30 mars 2018.

Dans un second temps, à la suite d'une nouvelle demande de l'ASN dans son courrier du 2 octobre 2018 en référence [6], EDF a transmis de nouvelles études de faisabilité en décembre 2018 par le courrier en référence [7]. Ces études, en référence [25] et [26], ont permis :

- d'affiner les études menées dans le cadre du premier scénario de réparation en référence [21] transmis en mars 2018, en ne prévoyant notamment plus la coupe et le remplacement de nombreux équipements et tuyauteries qui rendaient le scénario complexe ;
- d'analyser un nouveau scénario de réparation consistant à conserver certaines passes de racine et de soutien des soudures de traversée VVP.

Les scénarios de réparation en référence [25] et [26] ont été analysés par l'ASN et une visite sur le site du réacteur EPR de Flamanville avec le fabricant Framatome et EDF a été réalisée en janvier 2019 afin d'évaluer les contraintes opérationnelles. Des questions spécifiques relatives aux durées d'approvisionnement, à l'enchaînement des opérations ainsi qu'aux risques et parades identifiés ont été transmises en janvier 2019 à l'exploitant. Certaines réponses ne seront transmises par l'exploitant qu'au mois d'avril 2019. Ainsi, l'analyse menée par le rapporteur dans les paragraphes suivants est basée sur les éléments techniques figurant dans les notes en référence [25] et [26], ainsi que sur les réponses apportées par EDF, disponibles au moment de la rédaction du présent rapport.

6.1.1. Eléments constitutifs des traversées d'enceinte VVP

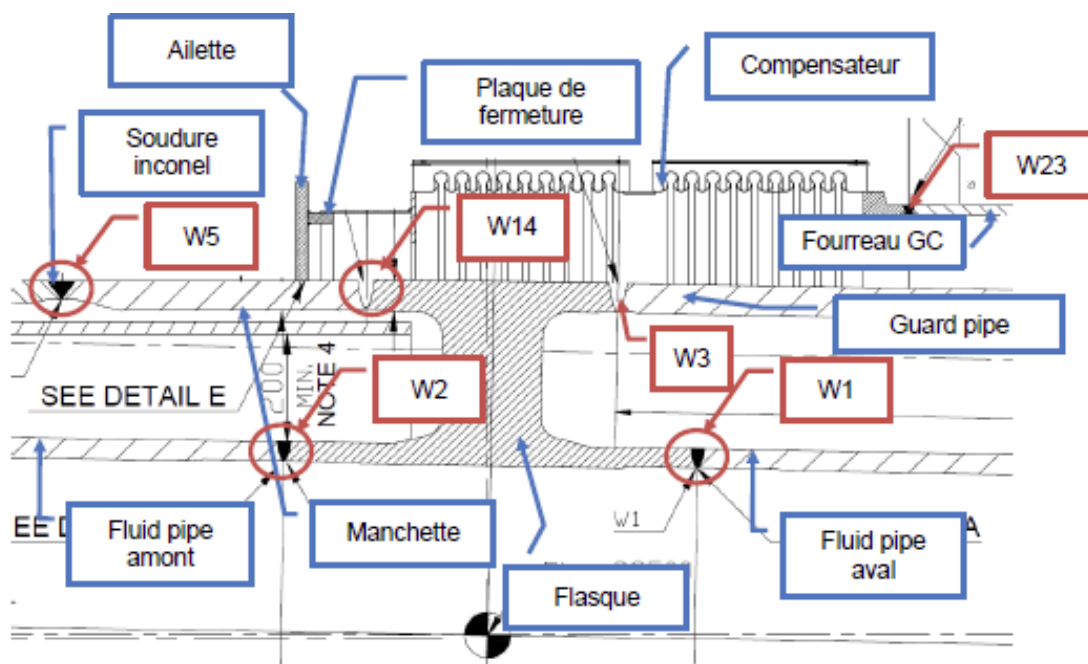


Figure 11 : Présentation des éléments principaux de la traversée (extrait de la note en référence [15])

La note EDF en référence [7] précise trois scénarios relatifs aux réparations complètes des 8 soudures de traversée :

- un premier scénario comprenant la découpe complète des soudures de traversée (W1 et W2) et le remplacement du flasque. Ce scénario est décrit dans la note en référence [25] ;
- un deuxième scénario comprenant la découpe complète des soudures de traversée (W1 et W2) et le remplacement d'un tube et d'un cintre VVP. Ce scénario est décrit dans la note en référence [25] ;
- un troisième scénario avec conservation des passes de racine des soudures (W1 et W2). Ce scénario est décrit dans la note en référence [26].

Un quatrième scénario de réparation a été établi par EDF dans la note en référence [27]. Ce scénario, appliqué à une seule des huit soudures de traversée (celle présentant une indication non-volumique), est similaire au troisième scénario. Il est décrit au chapitre 7 du présent rapport.

6.1.2. Premier scénario : découpe complète des soudures de traversée et remplacement du flasque

Ce scénario consiste à remplacer le flasque existant par un nouveau flasque. Ce dernier serait alors de taille légèrement plus importante afin de compenser notamment la perte de matière issue de l'élimination des zones affectées thermiquement des soudures de traversée.

6.1.2.1. Enchaînement des opérations

Les opérations nécessaires à la réalisation de ce scénario de réparation s'enchaînent de la manière suivante :

- coupe et retrait du compensateur et de la manchette ;
- dégagement du guard pipe ;
- extraction de l'ancien flasque ;
- insertion de la première partie du nouveau compensateur ;
- mise en place du nouveau flasque simultanément avec la deuxième partie du nouveau compensateur ;
- soudage aux tuyauteries et au guard pipe de ce flasque puis contrôle ;
- mise en place, soudage et contrôle de la nouvelle manchette (approvisionnée en deux demi-coquilles) puis du compensateur.

Les figures suivantes, extraites de la note en référence [25], permettent de schématiser les principales opérations réalisées sur site.

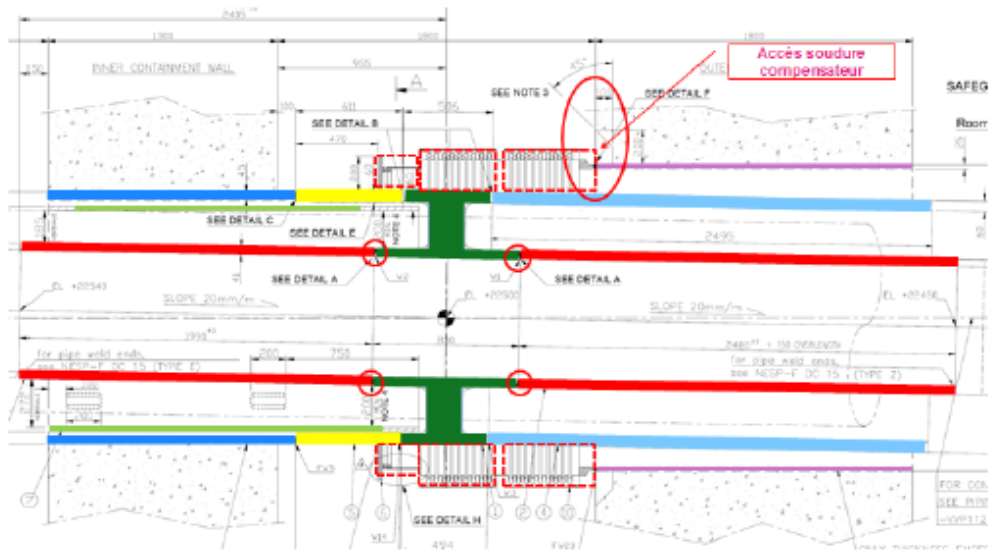


Figure 12 : Coupe et retrait du compensateur et de la manchette

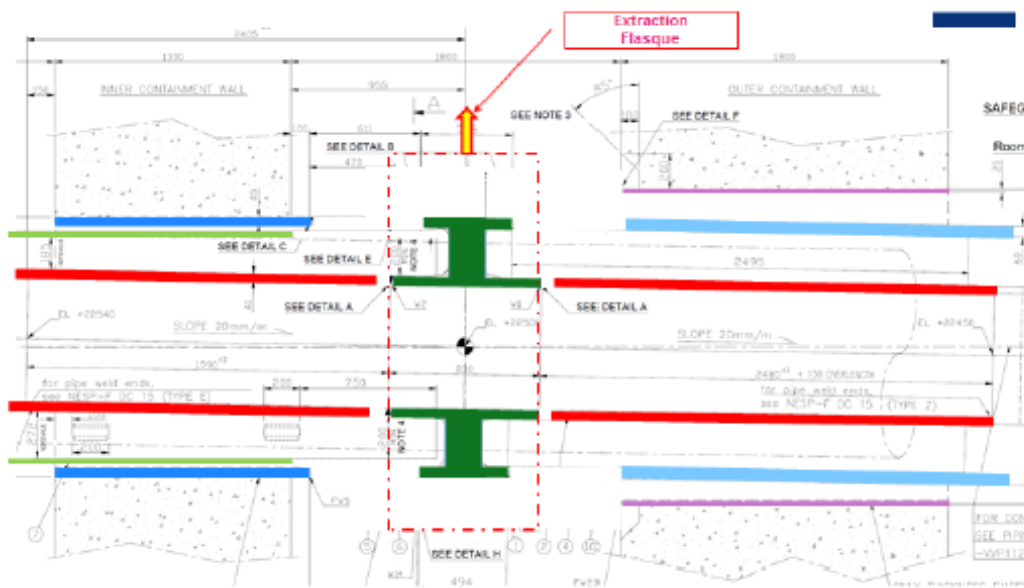


Figure 13 : Dégagement du guard pipe, extraction de l'ancien flasque

- de réalisation de la soudure W3 in-situ et des opérations associées, en particulier le traitement thermique de détensionnement ;
- de soudage de la manchette en deux demi-coquilles, dont deux soudures circulaires et deux soudures longitudinales ;
- de contrôle non destructif volumique sur la soudure FW23 entre le compensateur et le fourreau ;
- de soudage des soudures W1 et W2, en raison de leur accessibilité ;
- de beurrage en inconel in-situ sur le flasque côté chanfrein W14 ;
- vérification de la faisabilité :
 - de la manchette en deux parties avec revêtement inconel aux embouts ;
 - des soudures inconel de la nouvelle manchette sur le fourreau du génie civil, le flasque et les soudures internes à la manchette en veillant à limiter les déformations ;
 - d'une épreuve enceinte locale avec le développement d'un outillage d'essai spécifique à prévoir ;
- nécessité de réaliser une QMOS supplémentaire dédiée à la soudure en inconel des manchettes en demi-coquilles.

Le fabricant précise également la nécessité :

- de faire valider le scénario de démontage et de remontage auprès d'un monteur afin d'analyser les risques identifiés et de définir les parades associées ;
- de réaliser une maquette afin de s'assurer de la faisabilité d'une telle opération.

6.1.3. Deuxième scénario : découpe complète des soudures de traversée sans remplacement du flasque

La note en référence [15] décrit l'ensemble des étapes de montage associées à cette réparation. Ce scénario consiste à retirer un tube ainsi qu'un cintre VVP. Dans ce scénario ces composants sont remplacés et le flasque est conservé.

6.1.3.1. *Enchaînement des opérations*

L'enchaînement des opérations est similaire au scénario décrit précédemment à l'exception des points suivants :

- le flasque est retiré mais n'est pas remplacé ;
- un beurrage inconel devra être réalisé (sur site ou en atelier) sur une partie du flasque (soudure W14) dans le cas où l'extrémité de la nouvelle manchette en deux demi-coquilles est revêtue en inconel ;
- trois autres soudures sont coupées (en complément des coupes réalisées au niveau du flasque, déjà présentes dans le premier scénario) : en l'occurrence il s'agit de deux soudures du côté bâtiment réacteur pour le retrait d'un cintre et d'une soudure côté bâtiment électrique pour le retrait d'un tube. Ces coupes permettent le retrait du cintre et du tube pour permettre l'extraction de la tuyauterie VVP et ainsi libérer l'accès à la traversée ;
- un nouveau cintre ainsi qu'un nouveau tube VVP sont approvisionnés afin notamment de compenser les pertes de longueur dues aux découpes et à l'élimination des zones affectées thermiquement (ZAT) : ces éléments seront approvisionnés avec des sur-longueurs ;
- trois soudures supplémentaires sont réalisées pour assembler le nouveau cintre et le nouveau tube VVP.

Les figures suivantes, extraites de la note en référence [25], permettent de schématiser les principales opérations réalisées sur site :



Figure 16 : Retrait du cintre coté bâtiment réacteur pour permettre l'extraction de la tuyauterie VVP ultérieurement (coupe des 2 soudures côté bâtiment réacteur)

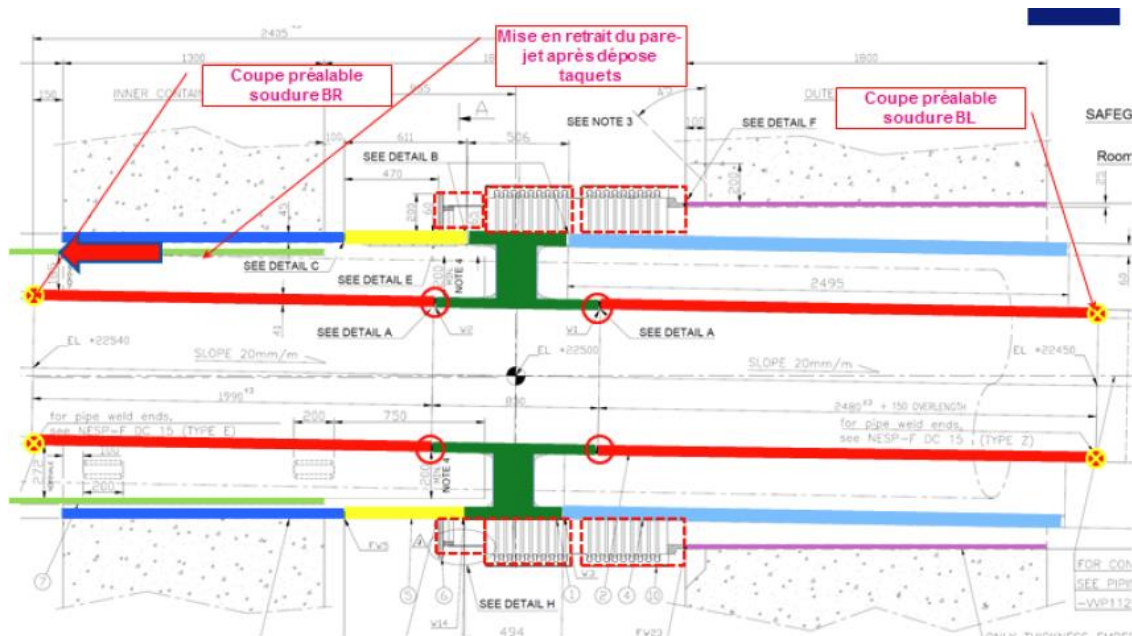


Figure 17 : Coupe préalable d'une des soudures côté bâtiment réacteur (BR) et de la soudure côté bâtiment électrique (BL), coupe de la manchette

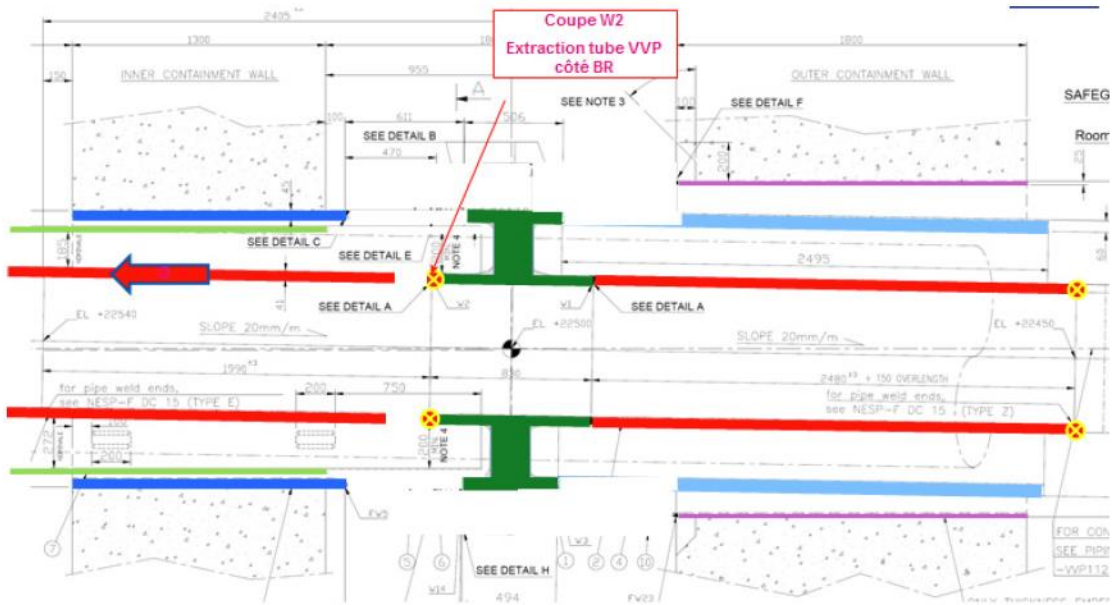


Figure 18 : Coupe de la soudure W2 pour permettre l'extraction du tube VVP côté bâtiment réacteur

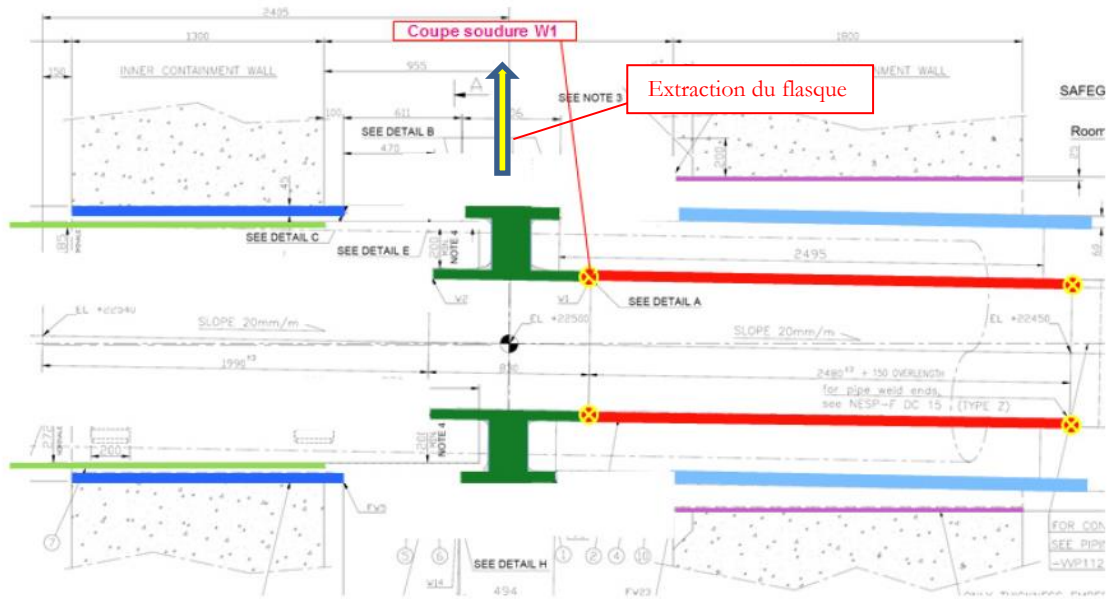


Figure 19 : Coupe de la soudure W1 pour permettre l'extraction du flasque

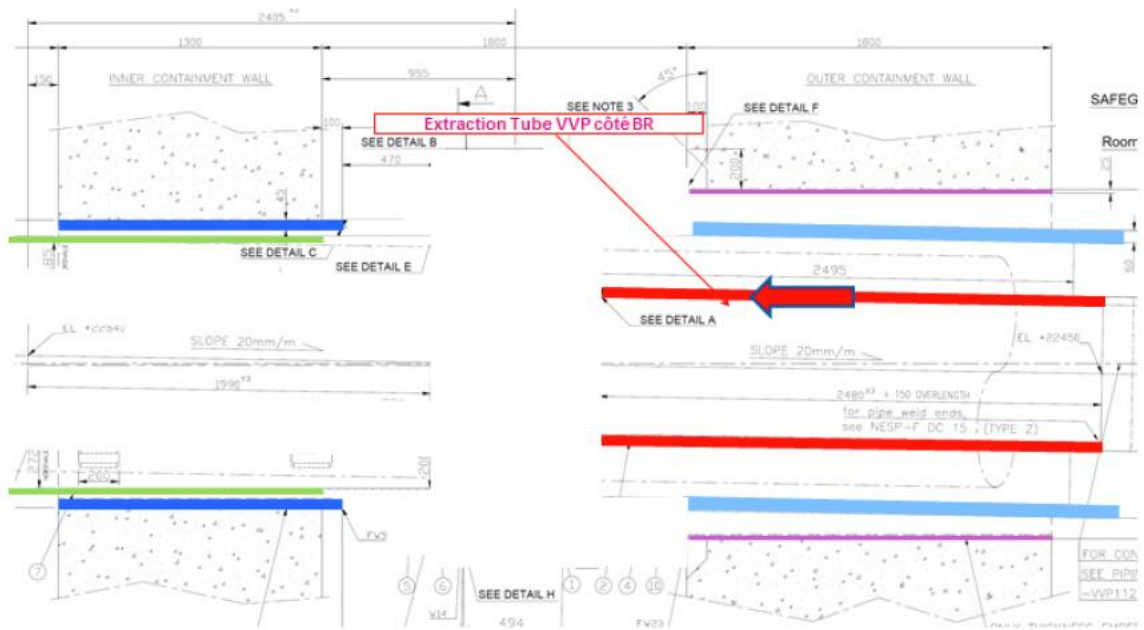


Figure 20 : Extraction de la traversée côté bâtiment réacteur

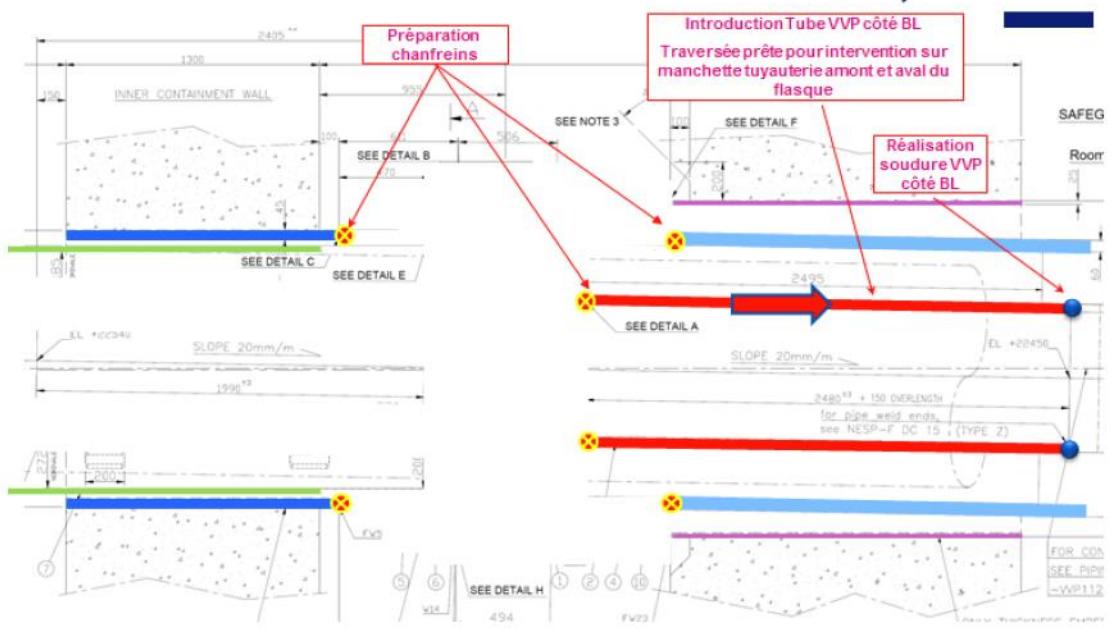


Figure 21 : Insertion et soudure de la tuyauterie VVP côté bâtiment électrique

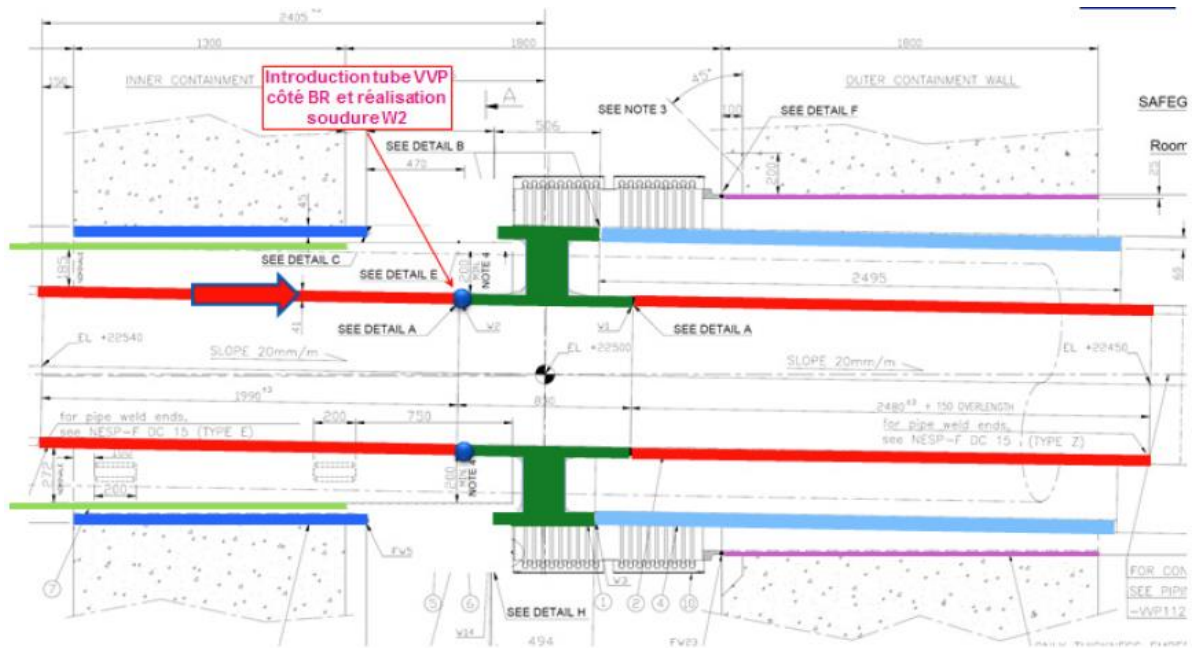


Figure 22 : Introduction du tube VVP côté bâtiment réacteur

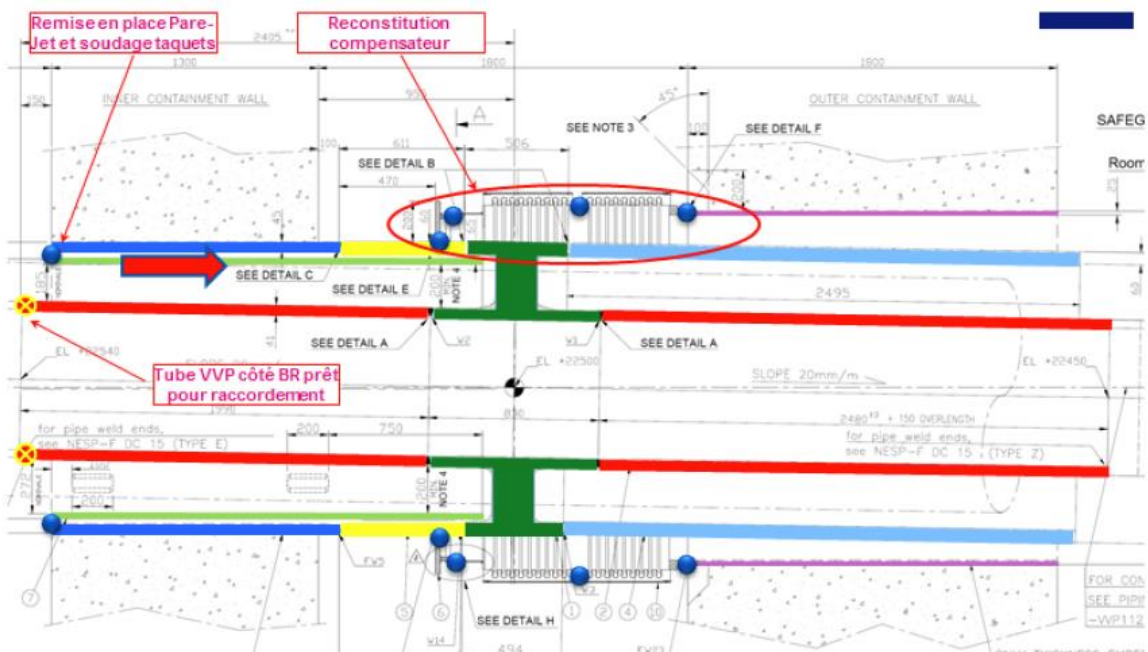


Figure 23 : Raccordement du tube VVP côté bâtiment réacteur, soudage et contrôle de la manchette puis du compensateur

6.1.3.1. Contraintes opérationnelles et risques associés

En complément des risques définis sur les opérations communes au premier scénario, le principal risque supplémentaire identifié par le fabricant dans ce deuxième scénario est l'impossibilité de réaliser un arasage interne sur les deux soudures liées au nouveau cintre VVP.

A contrario, ce scénario ne nécessite plus la réalisation d'un beurrage en inconel in-situ sur le chanfrein (W14) du flasque.

6.1.4. Troisième scénario : réparations des soudures de traversée avec conservation des passes de racine et de soutien des soudures

La note en référence [26] décrit l'ensemble des étapes de montage associées à cette réparation. Ce scénario consiste à affouiller les soudures de traversée en conservant les passes de racine et de soutien afin de maintenir le positionnement relatif des tuyauteries puis à remplir à nouveau les soudures avec un mode opératoire de soudage conforme aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture.

6.1.4.1. Enchaînement des opérations

Les opérations nécessaires à la réalisation de ce scénario de réparation s'enchaînent de la manière suivante :

- coupe automatique de la soudure entre le compensateur et le guard pipe afin de pouvoir conserver le compensateur ;
- dégagement du guard pipe ;
- retrait de la manchette ;
- la soudure de traversée W2 est réparée. Dans ce scénario la soudure n'est pas découpée mais affouillée en conservant les passes de racine et de soutien ;
- décalage du compensateur pour avoir accès au guard pipe ;
- coupe de la soudure entre le flasque et le guard pipe (W3) puis dégagement du guard pipe ;
- la soudure de traversée W1 est réparée. Dans ce scénario la soudure n'est pas découpée mais affouillée en conservant les passes de racine et de soutien ;
- réalisation de la soudure entre le flasque et le guard pipe (W3) ;
- mise en place, soudage et contrôle de la nouvelle manchette (approvisionnée en deux demi-coquilles) ;
- soudage du compensateur.

Les figures suivantes, extraites de la note en référence [26], permettent de schématiser les principales opérations réalisées sur site.

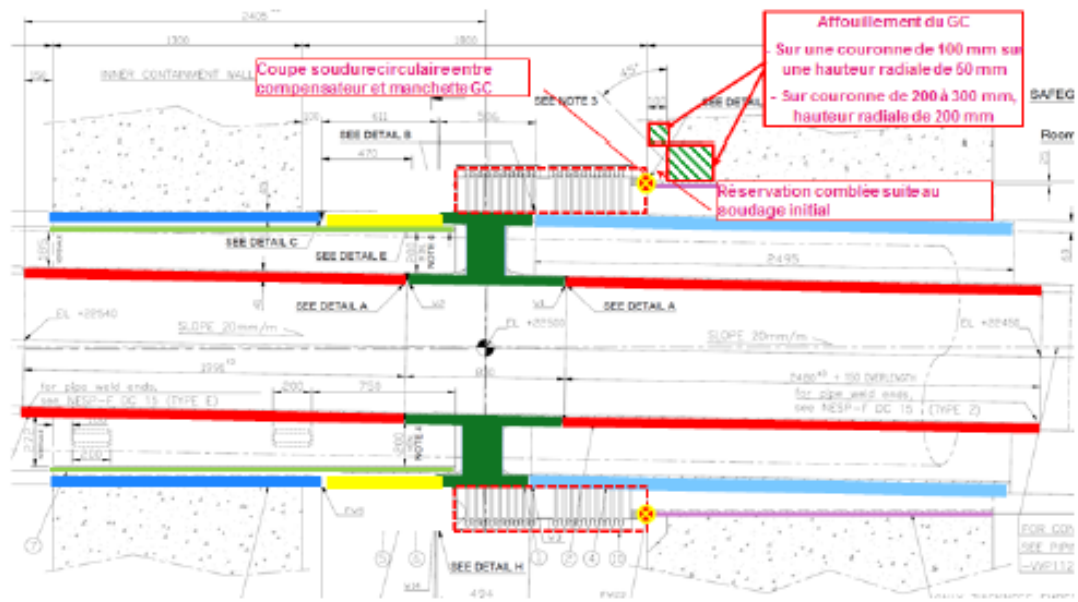


Figure 24 : Coupe de la soudure W23

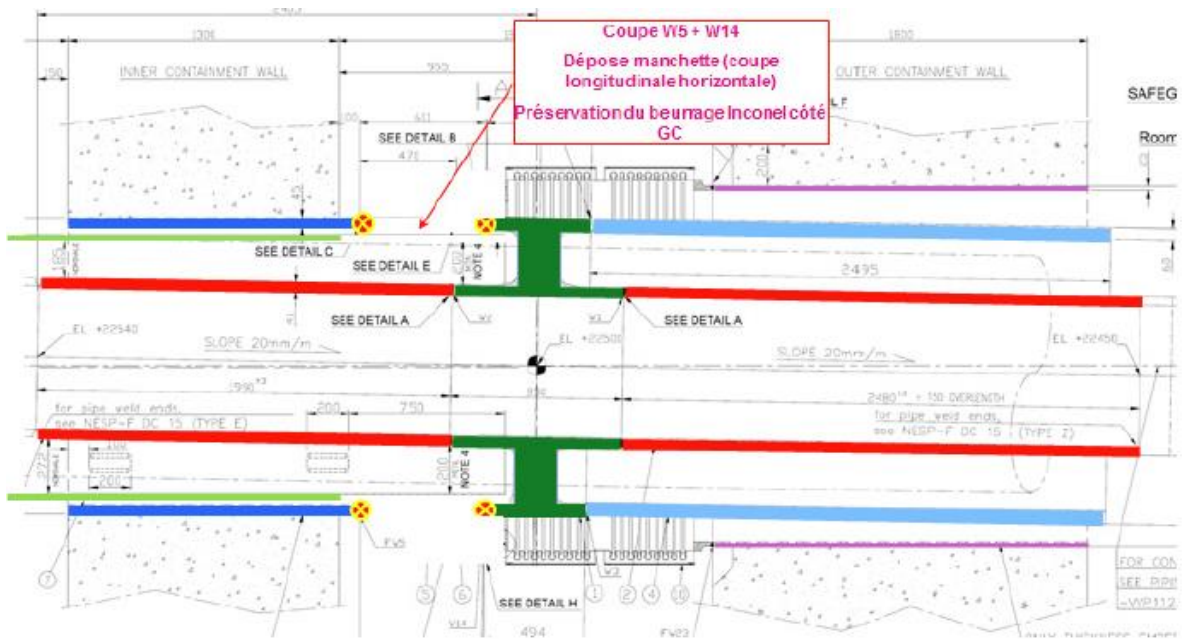


Figure 25 : Dégagement garde pipe et retrait de la manchette pour avoir accès à la soudure W2

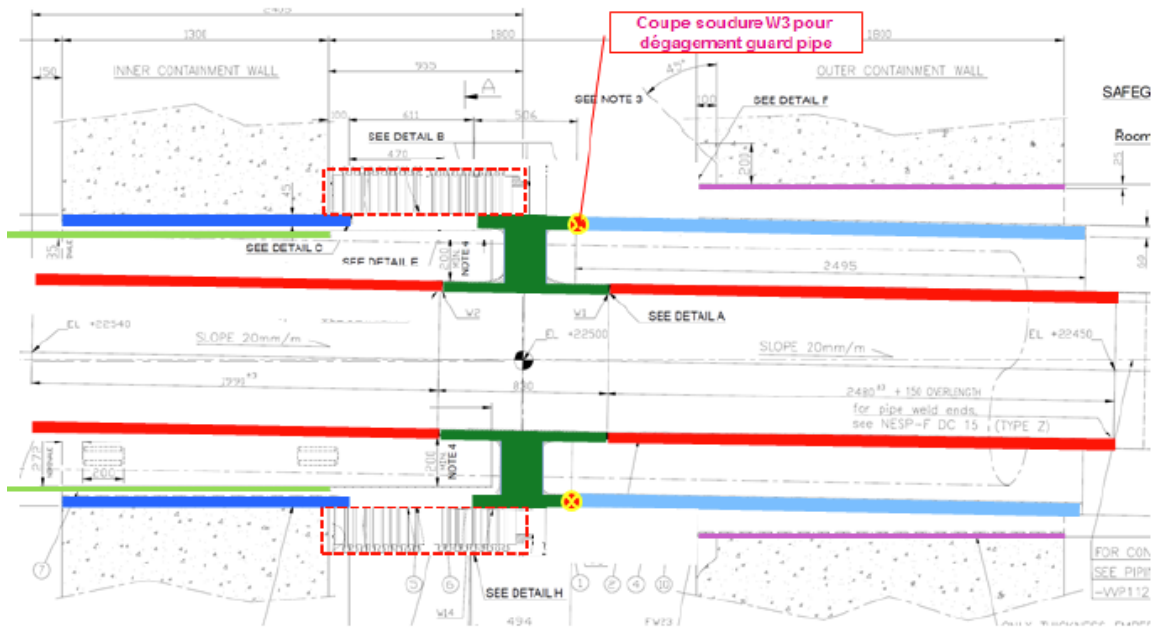


Figure 28 : Coupe de la soudure du guard pipe

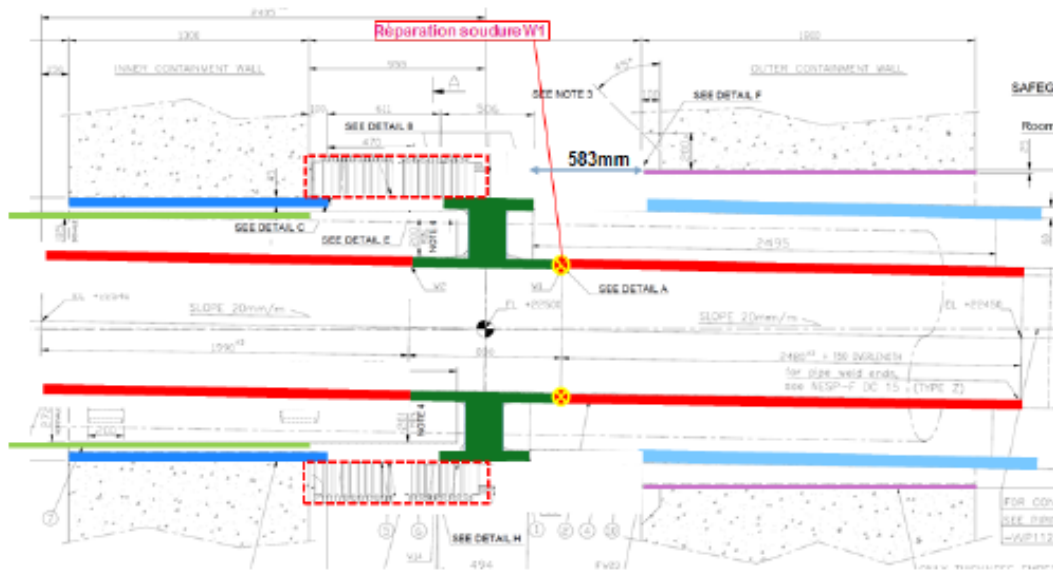


Figure 29 : Réparation de la soudure W1

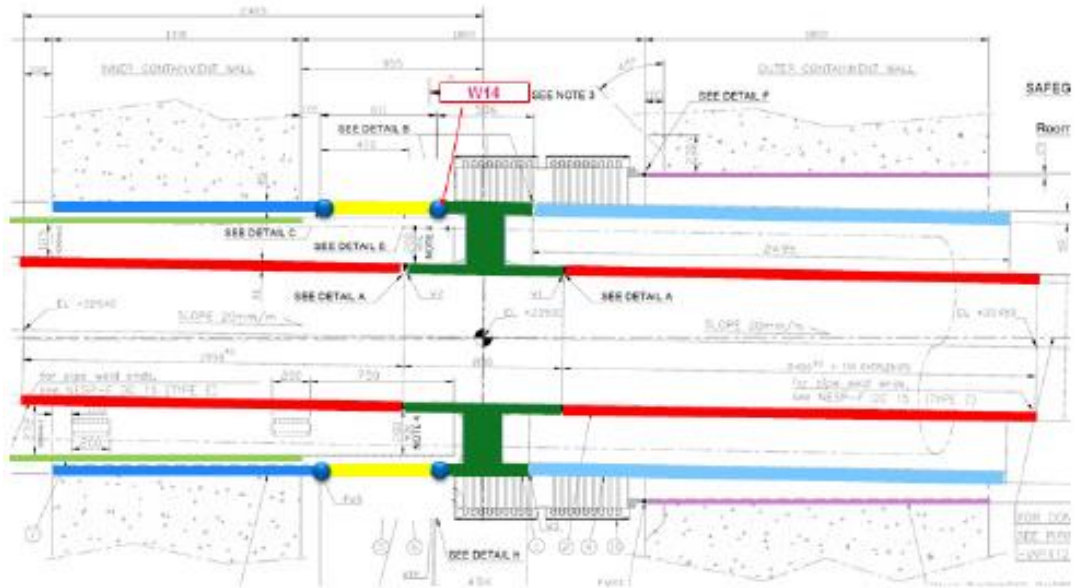


Figure 30 : Soudage de la nouvelle manchette (en deux demi-coquilles)

6.1.4.2. Contraintes opérationnelles et risques associés

La gamme opératoire relative au troisième scénario est différente des deux scénarios précédents notamment parce que les opérations suivantes ne sont plus nécessaires :

- retrait et remise en place du flasque (premier scénario) ;
- retrait et mise en place d'un cintre et d'un tube VVP (deuxième scénario) ;
- retrait du compensateur et mise en place d'un nouveau compensateur (premier et deuxième scénarios).

Compte tenu de la conservation des passes de racine et de soutien, ce scénario permet également d'éviter un décalage éventuel des tuyauteries VVP lié aux contraintes résiduelles probablement subsistantes entre le flasque et les tuyauteries VVP. L'absence de retrait du flasque ou du cintre et du tube VVP permet par ailleurs de limiter un certain nombre de manipulations de pièces.

Dans le cas présent le compensateur est décalé pour permettre l'accès aux soudures. Le fabricant précise qu'un risque résiduel pour l'intégrité du compensateur ne peut être exclu. Si le compensateur venait à être endommagé, un nouveau compensateur serait approvisionné et il serait alors nécessaire de retirer le flasque ou le coude cintré VVP suivant l'un des deux premiers scénarios afin de mettre en place le nouveau compensateur.

L'ASN a demandé en janvier 2019 à EDF d'établir une matrice d'analyse des risques pour chacun des scénarios identifiés afin notamment de préciser les contraintes associées et risques majeurs identifiés, les études de faisabilité et de réalisation nécessaires, les outillages et qualifications à développer, les parades identifiées pour chacun de ces risques ainsi que le risque résiduel évalué. Ainsi, en complément des risques identifiés dans la note en référence [26], l'exploitant a transmis une première matrice d'évaluation des risques liée à ce troisième scénario de réparation, présentée en annexe 8. EDF précise que cette matrice serait amenée à évoluer en ce qui concerne les risques résiduels après réalisation des différentes études détaillées.

Les risques résiduels majeurs identifiés par EDF dans cette matrice d'évaluation sont les suivants :

- un endommagement du compensateur lors de son dégagement hors du génie civil¹⁵ ;
- un désaccostage et désalignement des tuyauteries VVP. Ces risques sont liés à la présence de contraintes résiduelles importantes (qui seraient causées par un supportage insuffisant des deux côtés du flasque) et à une épaisseur résiduelle des passes de racine et de soutien insuffisante si un affouillement trop important était réalisé.

6.1.5. Approvisionnements

Les principaux composants à approvisionner identifiés dans les notes en référence [25] et [26] sont les suivants :

Composant	Scénarios de réparation
Cintre VVP	2
Tube droit VVP	2
Flasque	1
Compensateur	1, 2
Manchette en deux demi-coquilles	1,2,3
Plaque de fermeture (Closing plate)	1,2,3
Tôle laminée soudée (Welded rolled plate)	1,2,3
Ailette	1,2,3

Dans son courrier en référence [76], EDF précise, à ce stade, que les délais d'approvisionnement des composants relatifs aux scénarios 1 et 3 sont de 12 mois. Les composants identifiés comme nécessitant les plus longs délais d'approvisionnement sont la manchette en deux demi-coquilles et le compensateur.

Le scénario 2 nécessite les approvisionnements d'un cintre et d'un tube VVP, pour lesquels sont estimés des délais de 26 et 22 mois respectivement.

6.1.6. Durées de réalisation

Dans les scénarios en référence [25] et [26], les délais estimés par le fabricant pour les opérations de démontage et de remontage sur site sont précisées dans le tableau suivant :

¹⁵ Pour pouvoir dégager le compensateur hors du génie civil, il est nécessaire de découper la soudure FW23. Cette découpe nécessite au préalable la démolition d'une partie du génie civil. Par ailleurs, lors de cette démolition, il sera nécessaire de veiller à ne pas dépasser la zone de réservation prévue lors du montage initial de la traversée dans le génie civil.

Opérations de fabrication site ¹⁶	Délai estimé pour 4 trains en parallèle (mois)	Délai estimé pour 2 trains en parallèle (mois)	Remarques
Scénario 1 : Remplacement du flasque			
Démontage	1	2	Réalisé en parallèle des approvisionnements
Remontage	4	6	
Essais fonctionnels	1	1	Epreuve enceinte, ventilation
Durée totale estimée	6	9	
Scénario 2 : Remplacement d'un cintre et d'un tube VVP			
Démontage	2	2	Réalisé en parallèle des approvisionnements
Remontage	5	10	
Essais fonctionnels	1	1	Epreuve enceinte, ventilation
Durée totale estimée	8	13	
Scénario 3 : Réparation des soudures en conservant les passes racines			
Démontage	4	7	Réalisé en parallèle des approvisionnements
Remontage	1	1	
Essais fonctionnels	1	1	Epreuve enceinte, ventilation
Durée totale estimée	6	9	

Tableau 6 : Durées estimées des opérations sur site par le fabricant

Dans un courrier ultérieur en référence [76], EDF indique que le temps de réalisation relatifs aux scénarios 1 et 3 est estimé entre 12 à 18 mois. EDF n'y apporte pas d'explication complémentaire concernant ces durées, vis-à-vis de celles définies dans le Tableau 6.

EDF précise par ailleurs que ces durées ne prennent pas en considération les phases de préparation et de repli de chantier.

¹⁶Les hypothèses prises en compte pour estimer le délai de réparation sont les suivantes :

- le planning est basé sur le planning de montage du GMES FA3, en particulier concernant le séquencement détaillé du soudage et les essais non destructifs associés ;
- le travail est réalisé en 3x8 heures et 6/7 jours ;
- le personnel tuyauteur ainsi que la logistique (machines de soudage, dispositifs de manutention, ...) sont considérés comme disponibles ;
- un taux d'efficacité de 0,75 a été appliqué en 3x8h ;
- la réparation de la soudure est assimilée de manière conservative à une opération de coupe suivie d'une opération de soudage complète.

6.1.7. Avis du rapporteur

6.1.7.1. *Approvisionnements*

Dans un premier temps, dans son courrier du 2 février 2018 en référence [4], l'ASN demandait à EDF d'analyser la possibilité de réapprovisionner des tuyauteries pour une réparation éventuelle des soudures concernées par des écarts au référentiel d'exclusion de rupture.

Dans un second temps, dans son courrier du 2 octobre 2018 en référence [6], l'ASN précisait à EDF que la remise en conformité des soudures au référentiel de fabrication initial devait être privilégiée. Compte tenu des délais d'instruction associés à la démarche de maintien en l'état et des incertitudes sur son acceptabilité, elle invitait EDF à engager les actions préalables à la remise en conformité des soudures, notamment les approvisionnements de matériaux.

Lors d'une réunion technique début 2019, le fabricant a précisé à l'ASN qu'aucun appel d'offre n'avait été engagé et que ces délais estimatifs avaient été établis, pour la manchette en deux demi-coquilles et le compensateur, sur la base de la réponse d'un seul fournisseur.

Le fabricant Framatome a notamment transmis à l'ASN des éléments en provenance d'un fournisseur de compensateur ainsi que d'une manchette en deux demi-coquilles mentionnant un délai d'approvisionnement d'environ 4 à 6 mois. Ce délai concerne uniquement la phase de fabrication en « atelier » et ne tient pas compte de l'élaboration de la documentation associée (cahier des charges, passation de commande, etc.).

A la suite de la transmission de ces éléments, le rapporteur a demandé à EDF le 15 janvier 2019, d'engager sans délai l'approvisionnement de la manchette en deux demi-coquilles, nécessaire aux trois scénarios mentionnés précédemment.

Le rapporteur note que certains délais d'approvisionnement mentionnés dans des spécifications de fournisseur sont inférieurs à ceux annoncés par l'exploitant.

Par ailleurs ces délais d'approvisionnement font partie des principales difficultés identifiées par l'exploitant pour ces scénarios de réparation ou de remise à niveau.

L'acceptabilité du traitement des écarts affectant les soudures de traversée proposé par EDF qui envisage leur maintien en l'état est incertaine à ce stade et ne pourra être conclu qu'au regard d'une instruction des résultats de certains programmes d'essais (cf. partie 6.3). Par conséquent, le rapporteur considère que l'approvisionnement au plus tôt des composants critiques permettrait d'éviter d'amplifier ultérieurement les difficultés liées à ces délais. Le rapporteur considère qu'en tout état de cause l'exploitant ne peut se prévaloir des conséquences de son choix de ne pas avoir anticipé les opérations de réparation pour justifier de ne pas les mettre en œuvre.

Au regard de cette position du rapporteur, EDF a informé l'ASN, dans son courrier en annexe 13, avoir pris la décision de créer une structure projet dans l'objectif notamment de lancer au plus tôt les approvisionnements nécessaires. **Le rapporteur considère qu'une telle action est de nature à répondre aux demandes précédemment formulées par le rapporteur en matière d'approvisionnement des composants nécessaires aux scénarios de réparation ou de remise à niveau.**

6.1.7.2. *Faisabilité et risques associés :*

Dans son courrier en référence [6], l'ASN préconisait l'établissement d'un programme détaillé et jalonné décrivant les opérations à mener pour développer, qualifier et mettre en œuvre les dispositifs nécessaires pour accéder à ces soudures, éliminer ou extraire les parties à réparer, et procéder aux réparations.

Les premiers éléments apportés par EDF pour répondre à cette demande figurent dans la note en référence [7].

EDF mentionne dans cette note que l'analyse de la possibilité de remettre à niveau ces soudures est la première étape de la démarche de traitement des écarts (cf. Figure 8 du paragraphe 5.1).

Dans cette même note, EDF indique que les scénarios de réparation en référence [25] et [26] présentent des risques techniques et doivent être validés auprès d'un monteur mais que les réparations sont réalisables en tenant compte du délai complémentaire nécessaire pour compléter les études et qualifier le matériel.

En complément des échanges techniques concernant les scénarios de réparation en référence [25] et [26], une visite sur site a permis d'identifier les contraintes liées à l'environnement de travail, aux configurations des lieux de stockage, au cheminement des pièces, etc.

Le rapporteur considère que les scénarios de réparation des soudures de traversée VVP présentés par EDF présentent effectivement des risques techniques et qu'il est nécessaire de les évaluer précisément. Néanmoins, l'instruction n'a pas mis en évidence jusqu'à présent de contraintes rédhibitoires.

Le scénario de réparation qui serait privilégié par EDF, si une remise en conformité des soudures de traversée VVP était envisagée, est le troisième scénario. Ce scénario consiste à affouiller les soudures de traversée jusqu'aux passes de racine et de soutien puis à mettre en œuvre un mode opératoire de soudage conforme aux exigences d'exclusion de rupture pour les nouvelles passes de remplissage et de finition.

EDF identifie des risques résiduels majeurs. Le rapporteur recommande que l'exploitant définisse des parades complémentaires permettant de ramener ces risques résiduels à un niveau acceptable.

Dans ce cadre, le rapporteur considère que la réalisation d'une étude détaillée du procédé mis en œuvre pour démolir la zone de réservation du génie civil autour de la soudure FW23, ainsi qu'un dispositif de protection du compensateur, devraient permettre d'atteindre un risque résiduel acceptable pour l'intégrité du compensateur existant.

En complément des risques identifiés par EDF dans la matrice de risques présentée en annexe 8, le rapporteur identifie également les risques résiduels suivants :

- endommagement du beurrage en inconel du fourreau du génie civil, du côté de l'enceinte interne, lors de la découpe de la manchette ;
- risque de déformation des deux demi-coquilles constituant la nouvelle manchette lors de leur soudage.

Le rapporteur considère néanmoins que des qualifications d'outillages et de personnel, des études de réalisation, ou encore des maquettes d'entraînement pour les soudeurs doivent être réalisées dans l'objectif de réduire ces risques résiduels à un niveau acceptable. Ces mesures permettront également de ne pas endommager les autres matériels lors des opérations sur site et de garantir le respect de l'ensemble des exigences de sûreté applicable aux traversées, dont celles d'exclusion de rupture.

Moyennant l'analyse complémentaire des points listés ci-dessus, le rapporteur considère, parmi

les trois scénarios présentés, que la mise en œuvre du troisième scénario de réparation consistant à affouiller les soudures de traversée jusqu'aux passes de racine et de soutien puis à mettre en œuvre un mode opératoire de soudage conforme aux exigences d'exclusion de rupture, permettrait d'atteindre un niveau de risques et d'inconvénients techniques raisonnable. Le rapporteur considère ainsi qu'EDF doit finaliser les études techniques et les analyses de risques relatives aux réparations des traversées d'enceinte VVP

Au regard de cette position du rapporteur, EDF a informé l'ASN, dans son courrier en annexe 13, avoir pris la décision de créer une structure projet dans l'objectif notamment de lancer les activités nécessaires pour étudier en détails les risques associés au scénario de remise à niveau des soudures de traversée. **Le rapporteur considère qu'une telle action est de nature à répondre au besoin.**

6.2. Renonciation à l'exclusion de rupture

6.2.1. Analyse de l'exploitant

Le dossier d'EDF transmis en référence [7] mentionne que la possibilité de renoncer à l'hypothèse d'exclusion de rupture a été étudiée dans le document en référence [28] et conclut à de nombreuses difficultés potentielles dans ce cas de figure. EDF précise également que le renoncement à certains conservatismes propres aux études cœur ou aux études mécaniques, permettrait de limiter ces difficultés. Cependant, la justification de la tenue des casemates vapeurs et des locaux des bâtiments auxiliaires de sauvegarde (BAS), vis-à-vis de l'augmentation de pression induite par les masses et énergies libérées (MEL), ainsi que l'installation de dispositifs anti-fouettement pour la gestion des ruptures de tuyauterie haute énergie (RTHE) resteraient des difficultés majeures à ce stade du projet vis-à-vis de la prise en compte des ruptures de tuyauteries vapeur doublement débattues (RTV-2A).

Enfin, EDF mentionne qu'aucune évolution de conception ne permet de traiter la problématique de justification de la tenue des casemates vapeur et des locaux des BAS dans le cas de l'étude d'une RTV-2A localisée au niveau d'une soudure de traversée VVP.

EDF considère ainsi que le renoncement à l'exclusion de rupture est très complexe voire impossible pour les soudures de traversée VVP.

6.2.2. Avis du rapporteur

La démarche d'exclusion de rupture des tuyauteries principales des circuits secondaires vapeur VVP conduit à ne pas retenir les études de rupture de tuyauteries vapeur doublement débattues (RTV-2A) dans les conditions de fonctionnement de référence. L'impact des ruptures vis-à-vis de la tenue de la première barrière, de l'atteinte de l'état sûr et des agressions internes (rupture de tuyauteries haute énergie) sur l'intégrité des circuits et des composants ne sont pas étudiés.

Cependant, la RTV-2A d'une tuyauterie principale d'un circuit secondaire vapeur pour la partie située dans l'enceinte a été étudiée dans différents objectifs pour:

- définir un cas pénalisant pour le dimensionnement de l'enceinte ;
- établir un profil de qualification des matériels situés dans le bâtiment réacteur ;
- couvrir les scénarios de refroidissement du cœur consécutifs à toute rupture de tuyauterie d'eau secondaire (par exemple rupture de tuyauterie d'eau alimentaire).

Cette étude a été réalisée en puissance et à puissance nulle. L'étude en puissance couvre également les conséquences, sur le cœur, des ruptures doublement débattues d'une tuyauterie principale d'un circuit secondaire vapeur à l'extérieur de l'enceinte, en amont de la vanne d'isolement vapeur.

En application de la démarche d'exclusion de rupture, le rapport de sûreté joint à la demande d'autorisation de mise en service ne présente pas l'impact des effets de jet et de fouettement en cas de rupture doublement débattue d'une tuyauterie principale d'un circuit secondaire vapeur. De plus, la résistance des casemates vapeur et la qualification adéquate des matériels situés dans ces casemates n'est pas vérifiée pour ces cas de rupture qui libéreraient une énergie importante dans le bâtiment et conduit, sans dispositif spécifique, à augmenter très sensiblement la pression à l'intérieur de celui-ci.

Enfin, les études mécaniques, dont l'objectif est de vérifier l'intégrité des circuits et des composants ainsi que l'opérabilité des vannes, ne prennent pas en compte les chargements consécutifs à un cas de rupture doublement débattue d'une tuyauterie principale d'un circuit secondaire vapeur.

Le renoncement à la démarche d'exclusion de rupture devrait ainsi s'accompagner de l'étude des conséquences d'une rupture doublement débattue d'une tuyauterie principale des circuits secondaires vapeur VVP du point de vue des agressions internes, du point de vue thermo-hydraulique et du point de vue mécanique.

La démonstration de sûreté devrait donc être notablement complétée, sans garantie qu'elle puisse être établie en respectant les conservatismes considérés dans les études de conditions de fonctionnement de référence (cumul avec le manque de tension externe, prise en compte de l'aggravant le plus pénalisant, etc.).

Les conséquences d'un renoncement à la démarche d'exclusion de rupture pourraient être réduites par la relaxation de certaines pénalisations telles que la non-considération de la règle de l'aggravant unique à la fermeture des vannes d'isolement en cas de rupture vapeur et le cumul de chargements induits par le séisme. La justification et le succès de telles modifications des hypothèses d'études nécessiteraient un examen approfondi, tant du point de vue de leur acceptabilité en termes de démonstration de sûreté, que de la conformité au chapitre II.1 de l'article 2 du décret d'autorisation de création en référence [8].

EDF précise également dans sa note en référence [7], concernant la gestion des RTHE, que la faisabilité d'installation de dispositifs anti-fouettement pour le cas spécifique d'une RTHE localisée au niveau d'une soudure de traversée VVP est en cours d'étude.

Par son courrier en référence [76], EDF mentionne que cette étude sera transmise le 1^{er} mars 2019.

Le rapporteur considère que le renoncement à la démarche d'exclusion de rupture aurait ainsi un impact important sur la démonstration de sûreté de l'installation, nécessitant la reprise de plusieurs catégories d'études (thermo-hydrauliques, agressions internes, mécaniques, masses et énergie libérées), avec un résultat incertain. Il est probable que des modifications matérielles importantes (ajouts d'exutoires de pression dans les bâtiments des auxiliaires de sauvegarde, ajouts de dispositifs anti-fouettement et anti-débattement, ...) soient nécessaires pour démontrer la sûreté de l'installation, sans garantie de faisabilité de ces modifications. Les études et les modifications matérielles devraient faire l'objet d'études de conception et d'une instruction par l'ASN, dont la durée pourrait excéder le délai de réparation des soudures de traversée de l'enceinte.

6.3. Justification du maintien en l'état des soudures de traversée d'enceinte VVP

Dans son dossier en référence [7], EDF mentionne que les soudures de traversée d'enceinte VVP, par leur localisation, sont difficiles d'accès et qu'une réparation ou une remise à niveau présenteraient des risques. Par ailleurs, la possibilité de renoncer à l'hypothèse d'exclusion de rupture a été étudiée et présente des difficultés majeures.

La troisième étape considérée dans la démarche de traitement d'écart présentée par EDF vise à justifier que les huit soudures de traversée VVP peuvent être mises en service et sont en particulier conformes aux objectifs prescrits dans le décret d'autorisation de création en référence [8] pour garantir l'intégrité des lignes secondaires tout au long de la vie de l'installation.

L'exploitant précise, dans son dossier en référence [7], que la justification du maintien en l'état des soudures de traversée se fonde sur l'analyse de chaque écart vis-à-vis du risque de rupture brutale, vis-à-vis des autres modes d'endommagement et vis-à-vis du niveau de confiance dans la qualité de réalisation des soudures.

Ces différents aspects seront détaillés dans les paragraphes suivants.

En complément de cette démarche, EDF précise également dans les courriers en référence [5] et [7] que les études de robustesse détaillées au paragraphe 6.4 seront réalisées.

6.3.1. Démarche de traitement des écarts associés à des risques autres que celui de la rupture brutale

EDF précise dans sa note en référence [7] que, pour les écarts affectant les modes d'endommagement autres que le risque de rupture brutale, la justification sera apportée par le traitement des fiches de non-conformité (FNC) correspondantes. Les risques associés sont les endommagements par déformation excessive, déformation progressive et fissuration.

L'exploitant analyse, dans les matrices de conformité des soudures de traversée VVP, l'ensemble des écarts, le cas échéant leur cumul, vis-à-vis de la conformité aux référentiels techniques.

Par ailleurs, dans l'attente de la transmission de ces matrices, EDF avait transmis, le 4 février 2019 le document en référence [16] qui précise l'analyse de la typologie des écarts au RCC-M constatés lors des étapes de préfabrication et de montage sur les soudures VVP qui n'ont pas été résorbés ou qui ne pourraient pas être entièrement résorbés lors des opérations de réparations des soudures ou de remise à niveau.

Ces écarts, mentionnés au chapitre 4.1.7, font l'objet, pour certains, d'une analyse technique au paragraphe 8.1.5.

Le rapporteur, dans la suite du rapport, prend l'hypothèse que ces écarts restent mineurs.

6.3.2. Démarche vis à vis du risque à la rupture brutale

EDF construit sa démarche de justification autour d'une démonstration du caractère suffisant des propriétés des soudures de traversée par des calculs de mécanique à la rupture brutale.

Il est rappelé que le risque de rupture brutale 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 tenace¹⁷ ;
- la présence de chargements mécaniques ou thermiques importants.

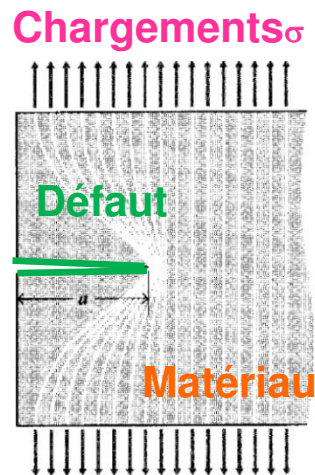


Figure 31 : Schématisation du risque de rupture brutale

Etant donné que ces calculs reposent sur ces trois paramètres essentiels, EDF base sa justification sur les volets d'analyse suivants :

- la caractérisation du matériau des soudures, notamment ses propriétés mécaniques, sur la base d'un programme d'essais;
- la caractérisation de la compacité (absent de défaut) ;
- la vérification de la présence de marges en cas de défaut hypothétique par des calculs de rupture brutale. Ces calculs, dont l'objectif est de démontrer le respect des critères du rapport de sûreté (annexe 7), prennent comme données d'entrée des caractéristiques mécaniques enveloppes de celles identifiées par les essais de caractérisation.

En fonction notamment de la représentativité des programmes d'essais servant à caractériser les propriétés mécaniques des soudures, EDF prévoit d'introduire des conservatismes complémentaires dans les données d'entrées des calculs de rupture brutale.

*

Les programmes d'essais ayant pour objectif de caractériser le matériau des soudures de traversée (ténacité, vieillissement sous déformation) et prévus par EDF font l'objet de la section suivante.

Le rapport abordera ensuite la compacité des soudures de traversée et rappellera la nécessité d'analyser les chargements thermomécaniques, ces paramètres venant compléter les caractéristiques mécaniques en tant que données d'entrée des calculs de mécanique à la rupture brutale.

Les marges à la rupture brutale calculées par EDF sur la base des données d'entrée analysées préalablement sont abordées dans un troisième temps.

¹⁷ 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.

6.3.3. Démarche vis-à-vis du risque de rupture brutale : caractérisation du matériau des soudures

L'analyse présentée par le rapporteur dans cette partie est basée sur l'instruction faite par l'IRSN en réponse à la saisine en référence [93], et synthétisée dans l'avis en référence [101].

Cette analyse concerne la démarche de justification présentée par EDF relative au maintien en l'état des soudures de traversée. Les premiers résultats obtenus sur la première soudure ARE Q3 expertisée ne font pas l'objet d'une instruction dans le cadre de ce rapport. Néanmoins, certains résultats de traction obtenus sur cette soudure sont pris en compte dans ce chapitre.

Comme indiqué au paragraphe 4.1, les essais mécaniques réalisés sur les assemblages témoins et les assemblages de qualification de modes opératoires ont montré des propriétés de résilience du matériau plus faibles qu'attendu. Les valeurs de résilience étant un bon indicateur de la ténacité du matériau, propriété intervenant en premier lieu dans la résistance à la rupture brutale, ces résultats pourraient remettre en cause la résistance des soudures de traversée d'enceinte VVP à la rupture brutale notamment aux basses températures.

Les calculs de mécanique à la rupture brutale abordés plus loin dans le rapport ont pour objectif de vérifier si ces propriétés mécaniques sont néanmoins suffisantes pour garantir l'intégrité des tuyauteries durant toute la vie de l'installation.

La vérification par les calculs que les valeurs prises en données d'entrée sont suffisantes pour garantir l'intégrité des tuyauteries durant toute la vie de l'installation doit être accompagnée d'une confiance dans l'atteinte effective de ces valeurs dans les soudures de production. Par conséquent plus ces valeurs sont basses et donc les marges vis-à-vis de la rupture brutale faibles, plus cette confiance doit être élevée.

EDF prévoit ainsi dans sa démarche un programme d'essais visant à renforcer cette confiance.

6.3.3.1. *Contexte : utilisation du procédé TIG manuel et fil flux*

Les soudures de traversée VVP sont des soudures de préfabrication qui sont classées ESPN de niveau 1 et de classe de qualité Q1¹⁸.

Au total 12 soudures de traversée ont été réalisées sur les circuits ARE et VVP du réacteur EPR de Flamanville :

- 8 soudures de traversée VVP de l'enceinte de confinement en exclusion de rupture ;
- 4 soudures des traversées ARE situés au niveau du bâtiment auxiliaire de sauvegarde.

Ces soudures ont été réalisées dans l'usine de Fives-Nordon à Nancy avec le procédé TIG manuel pour les passes de racine et de soutien suivi d'un remplissage par un procédé fil-flux (cf. paragraphe 2.1). Ce mode opératoire fait l'objet de la QMOS n° R147 AC. Cette QMOS couvre, par son domaine de validité, la réalisation des soudures de niveau Q1 mais aussi d'autres soudures de niveau Q3, selon les deux fiches de modes opératoires de soudage (FMOS) N104.1

¹⁸Classe de qualité « Q » : Pour chaque équipement sous pression (ESP), faisant l'objet d'un classement de sûreté mécanique et d'un classement au titre de l'arrêté ESPN du 30 décembre 2015 modifié, le fabricant Framatome a défini des classes de qualité de conception et de réalisation dénommées « Q » correspondant au niveau d'exigence le plus contraignant résultant du classement de sûreté mécanique et du classement ESPN. Les tuyauteries VVP, équipements classés N1 au titre de l'arrêté ESPN du 30 décembre 2015 modifié sont donc classées Q1.

et N104.2. Six assemblages témoins ont été réalisés en cours de la fabrication sur la période allant de 2012 à 2014. Les valeurs de résilience obtenues sur ces six assemblages sont en deçà de la valeur moyenne de résilience spécifiée à 0 °C par le fabricant au titre de l'exclusion de rupture (100 J en moyenne).

6.3.3.2. Démarche d'EDF

Dans son courrier du 23 juillet 2018 en référence [5], EDF s'est engagée, pour disposer d'une confiance suffisante dans la connaissance des propriétés mécaniques, à réaliser un programme d'essais permettant de vérifier les caractéristiques mécaniques considérées dans les analyses de résistance vis-à-vis de la rupture brutale pour les soudures des traversées VVP et s'appuyant sur :

- les résultats des assemblages témoins de préfabrication présentés dans le document en référence [29] ;
- les résultats d'essais mécaniques réalisés sur maquettes et présentés dans le document en référence [31] ;
- le programme d'essais décrit dans le document en référence [31] réalisé sur une soudure ARE Q3 dont la représentativité par rapport aux soudures de traversée est démontrée dans le document en référence [33].

Pour détailler sa démarche de caractérisation, EDF a défini dans son courrier en référence [32] une stratégie de justification de la tenue mécanique des soudures de traversée VVP en deux étapes :

- étape 1 : définition de caractéristiques mécaniques enveloppes des soudures fil-flux réalisées avec le fil de désignation commerciale Oerlikon OE S2 et le flux de désignation commerciale SAF AS 461 Si ;
- étape 2 : détermination de l'acceptabilité des résultats sur la base d'un logigramme décisionnel. Ce logigramme s'appuie sur les résultats d'analyses de résistance vis-à-vis de la rupture brutale prenant en données d'entrée les caractéristiques mécaniques enveloppes définies à l'étape 1.

EDF a retenu pour la première étape de procéder à des essais mécaniques sur des assemblages soudés et/ou d'utiliser des résultats déjà existants, afin de définir pour les soudures de traversée VVP, les caractéristiques suivantes :

- les courbes de transition en résilience minimale et moyenne ;
- la corrélation résilience-ténacité dans le domaine de transition ;
- la température de début de domaine ductile ;
- la ténacité dans le domaine ductile.

Les valeurs de ténacité déterminées à partir des résultats d'essais obtenus seront utilisées pour évaluer les marges vis-à-vis du risque de rupture brutale selon le logigramme ci-dessous (Figure 32).

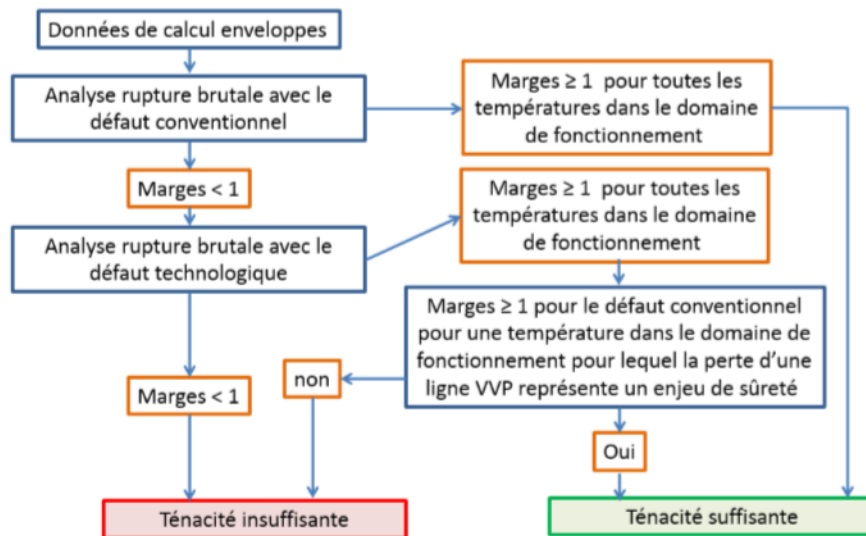


Figure 32 : Logigramme d'évaluation du caractère suffisant de la ténacité des soudures de traversée VVP

6.3.3.3. Assemblages soudés proposés par EDF pour la caractérisation du matériau

Afin de définir des caractéristiques enveloppes de celles des traversées VVP, EDF propose de procéder à des caractérisations sur les assemblages témoins, sur une soudure ARE Q3 réalisée avec le même lot de couple fil/flux que celui utilisé pour les soudures de traversée VVP et sur quatre maquettes réalisées au centre technique Framatome de Saint-Marcel.

i. Assemblages témoins de soudage

Les passes de remplissage et de finition des soudures de production ARE et VVP, réalisées à l'usine de Fives-Nordon à Nancy, ont mis en œuvre les matériaux d'apport suivants :

Type	Diamètre (mm)	Fournisseur	Désignation normalisée	Désignation commerciale
Fil	2.4	SAF	AWS A5.17 EM 12 K	AS 35
Fil	4	Oerlikon	AWS A5.17 EM 12 K	OE S2
Flux	/	SAF	AWS F7AP4-EM12 K	AS 461 Si
Flux	/	SAF	EN760 SA AB187 AC H5	AS 461 Si

Tableau 7 : Produits d'apport mis en œuvre lors des passes de remplissage et de finition des soudures de traversée VVP

Un recensement des valeurs de résilience obtenues sur les six assemblages témoins de production précédemment évoqués au paragraphe 6.3.3.1, les recettes de produit d'apport et l'assemblage de qualification de la QMOS R147 AC a été réalisé par Framatome dans la note en référence [33] et présenté dans le Tableau 8.

	Résilience en peau - KV à 0°C (en J) - Valeurs individuelles / Moyenne
	Lot : Fil 10/2458 - Flux 110280 = lot 1
Recette réalisée par Oerlikon [5]	134 J - 131 J - 144 J / 136 J
CT13-0010 (Q1) - FMOS N104.1 rev.E	Essai initial : 56 J - 64 J - 58 J / 59 J 86 J - 82 J - 58 J / 75 J 76 J - 70 J - 94 J / 80 J
CT13-0434 (Q1) - FMOS N104.1 rev.H	Essai initial : 52 J - 42 J - 54 J / 49 J 70 J - 62 J - 92 J / 74 J
CT12-0202 (Q3) - FMOS N104.2 rev.D	44 J - 68 J - 62 J (-20°C) / 58 J (-20°C)
	Lot : Fil 124887611 / Flux 27112102 = lot 2
Recette réalisée par Nordon	45 J - 82 J - 78 J / 68 J
Qualification R147 AC UM42	88J - 46 J - 70 J / 68 J
CT14-0016 (Q3) - FMOS N104.2 rev.E	38 J - 43 J - 46 J / 42 J
CT14-0173 (Q3) - FMOS N104.2 rev.E	42 J - 40 J - 31 J / 37 J 56 J - 64 J - 42 J / 54 J
CT12-0399 (Q3) - FMOS N104.2 rev.E	62 J - 50 J - 46 J / 52 J

Tableau 8 : Recensement des valeurs de résilience obtenues pour les soudures de préfabrication

Les deux assemblages témoins de production des soudures VVP sont le CT13-0010 et le CT13-0434. Ils ont été réalisés en 2013 puis dépouillés en 2014 sur des tubes de diamètre externe 764 mm et d'épaisseur 41 mm. L'assemblage de qualification de la QMOS R147 a été réalisé sur une tôle d'épaisseur 30 mm. Les recettes ont été réalisés sur des moules normalisés d'épaisseur 20 mm.

Les chutes de l'assemblage témoin CT13-0434 ont permis à EDF de réaliser en 2015 un programme complémentaire d'essais de résilience, afin de définir la température de début de domaine ductile et d'observer la présence ou non de microstructure brute de refroidissement.

ii. Maquettes

Quatre maquettes ont été réalisées au centre technique Framatome de Saint-Marcel à partir de deux tronçons de tuyauterie de nuance P355 NH, de diamètre DN 750 et d'épaisseur 38 mm assemblés par soudage bout à bout par le procédé fil-flux, suivant les procédures du GMES Nordon-Ponticelli.

Les lots de couple fil-flux utilisés sur les soudures de production figurant dans le Tableau 8 étant épuisés, Framatome a décidé de souder :

- les maquettes 1 et 2 avec des produits d'apports de mêmes désignations commerciales que les soudures de production ;
- les maquettes 3 et 4 avec des produits d'apport disposant de caractéristiques mécaniques dégradées (utilisation d'un produit d'apport rutile).

Le Tableau 9, issu de la note Framatome en référence [30], reprend les différents produits d'apport utilisés sur chacune des maquettes en lien avec ceux mis en œuvre sur les soudures de traversée VVP.

	Maquettes 1 et 2	Maquettes 3 et 4	Production	Comparaison
Fil TIG manuel	Böhler EMK 35Cr 100834 / lot FN 13642	Böhler EMK 35Cr 100834 / lot FN 13642	Böhler EMK 35Cr	Produit similaire Lot utilisé sur FA3
Fil (sous flux) Ø 2,4 mm	SAF FRO AS35 Lot 08685491	SAF FRO AS35 Lot 08685491	SAF FRO AS35 Lot CT124	Produit similaire mais lot différent de la production
Flux	Basique AS 461Si Lot 27115411	Basique AS 461Si Lot 27115411	Basique AS 461Si Lot 110280	Produit similaire mais lot différent de la production
Fil (sous flux) Ø 4 mm	Oerlikon OE-S2 Lot 10/2458	SAF FRO AS35 Lot 06567370	Oerlikon OE-S2 Lot 10/2458	Maquette 1 et 2 : fil utilisé pour CT-13-0434 Maquette 3 et 4 : produit similaire
Flux	Basique AS 461Si Lot 27115411	Rutile AS 231 Lot 27117190	Basique AS 461Si Lot 110280	Maquette 1 et 2 : Flux similaire au CT-13-0434 Maquettes 3 et 4 : Flux rutile aux propriétés « dégradées »



Tableau 9 : Présentation des soudures fil-flux des quatre maquettes du programme d'essais et comparaison avec l'assemblage témoin CT 13-0434 couvrant certaines soudures de production

EDF a élaboré son programme de caractérisation des soudures réalisées avec le procédé fil-flux dans l'objectif d'obtenir, à partir des maquettes :

- les courbes de transition de résilience en distinguant la peau et la mi-épaisseur des soudures ;
- la caractérisation du domaine de transition fragile-ductile à partir d'essais de ténacité réalisés selon la norme ASTM E1921 ;
- la caractérisation du domaine ductile avec des essais de déchirure ductile réalisés selon la norme ASTM E1820 à 300 °C et à une température proche du début du palier ductile ;
- la vérification du comportement en ténacité à -5 °C, température représentative du comportement à 10 °C après la prise en compte d'un décalage de 15 °C dû au vieillissement.

Le Tableau 10 synthétise le programme de caractérisation complémentaire des soudures fil-flux et identifie les maquettes utilisées.

Objectif	Maquettes	Éprouvettes	Nombre
Courbe de transition en peau externe et mi-épaisseur	1, 2, 3 et 4	Charpy	2x12 essais entre -100 °C et 200 °C 3 essais à 150 °C, 3 essais à 220 °C et 3 essais à 300 °C
Sensibilité au vieillissement sous déformation / exploitation des essais de ténacité en lien avec les autres caractéristiques mécaniques obtenues aux mêmes températures	1, 2, 3 et 4	Traction	6 essais pour la maquette 1 2 essais pour la maquette 2 5 essais pour la maquette 3 2 essais pour la maquette 4
Ténacité dans le domaine de transition	1 et 3	Ténacité CT25	10 essais
Ténacité dans le domaine ductile	2 et 4	Ténacité CT25	7 essais à 300 °C 7 essais à 30 °C pour la maquette 2 7 essais à 60 °C pour la maquette 4
Ténacité à -5 °C	1 et 3	Ténacité CT25	5 essais

Tableau 10 : Synthèse des essais de caractérisation complémentaires sur maquettes

iii. Soudure ARE Q3

EDF a retenu une soudure des circuits ARE pour compléter la caractérisation du métal fondu des soudures des traversées VVP. Cette soudure ARE Q3, référencé ARE3510TY-F02 S5, correspond à la soudure d'un coude sur une manchette du circuit ARE.

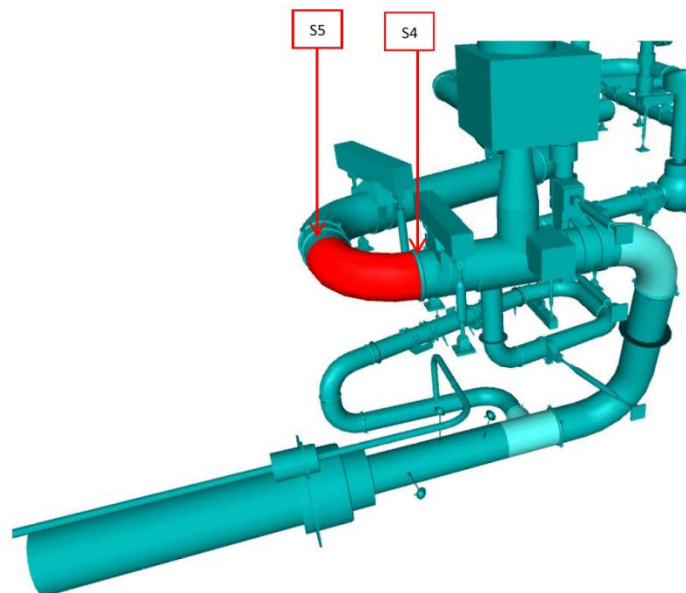


Figure 33 : Maquette numérique de la soudure S5 de l'ARE3510TY-F02

Cette soudure a été choisie par EDF sur la base d'une analyse menée par Framatome en prenant comme paramètres l'accessibilité pour la découpe et la réparation de la soudure ainsi que la

représentativité de la soudure vis-à-vis des soudures de traversée VVP. L'analyse réalisée est présentée dans le document en référence [34].

Cette soudure a été réalisée en utilisant les mêmes lots de produits d'apport que ceux mis en œuvre sur les soudures de traversée VVP et le mode opératoire de soudage qualifié par la même QMOS (R147 AC). Framatome a comparé les principaux paramètres de soudage mis en œuvre sur la soudure ARE Q3 avec ceux des soudures de traversée VVP. Cette comparaison est détaillée dans une analyse de représentativité en référence [33].

L'inventaire des paramètres de soudage de la soudure Q3 et des soudures de traversée VVP est présenté en annexe 9.

Les soudures de traversée VVP ont été réalisées sur la base du référentiel RCC-M niveau N1 et la soudure S5 (ARE niveau Q3) sur la base de la norme l'EN 13480. Le Tableau 11, issu de la note en référence [33], présente les différences de réalisation entre ces soudures.

	Soudure S5 ARE3510TY-F02	Soudures de traversées VVP Q1
Contexte		
Classe de qualité	Q3	Q1
Code de construction	EN 13480	RCC-M niveau 1
Matériaux de base	Pièce PP0516 (Tube Q3 EN10220 P355NH) Pièce PEO01512 (Coude formé Q3 P355NH EN10220)	Pièces PP00409 (Tube Q1 P355NH) suivant NESP-F DC 74 Pièces CP00010 (Forgé Q1 P355NH) suivant NESP-F DC 76
Géométrie	DN 508 mm Epaisseur 38 mm	DN 764 mm Epaisseur 41 mm

Tableau 11 : Caractéristiques géométriques et des matériaux de base de la soudure ARE Q3 et des soudures de traversée VVP

Framatome indique dans la note en référence [33] :

- que l'utilisation de référentiels différents n'a pas d'impact car ces deux référentiels font appel à la même norme harmonisée relative à la qualification de mode opératoire de soudage (ISO EN 15614-1) ;
- que la différence d'épaisseur de 3 mm entre les soudures de traversée VVP (41 mm) et la soudure ARE Q3 (38 mm) a une influence très limitée sur les caractéristiques obtenus (différence d'une couche, soit deux passes de soudage entre les deux types de soudures) ;
- que la « gamme » de soudage et les paramètres associés sont strictement identiques à l'exception de la géométrie du chanfrein (Figure 34). Sur ce point, Framatome conclut à l'absence de conséquence sur les caractéristiques du métal déposé en remplissage et à un effet de la dilution du métal de base sur le premier tiers de l'épaisseur par rapport au chanfrein des soudures des traversées VVP.

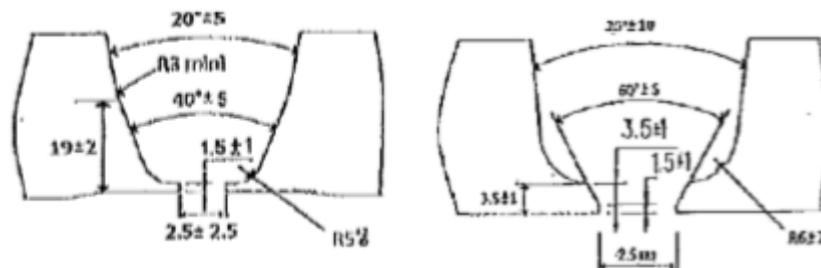


Figure 34 : Chanfrein de la soudure ARE Q3 (à gauche) et chanfrein des soudures de traversée VVP (à droite)

Sur cette soudure ARE Q3, EDF propose de réaliser un programme d'essais pour caractériser le métal fondu jugé représentatif de celui des soudures de traversée VVP.

Objectif	Éprouvettes	Nombre d'essais
Courbe de transition en peau externe et en racine	Charpy	2 x 20 essais
Sensibilité au vieillissement sous déformation	Traction	2 essais en peau
Température de début de domaine ductile en peau externe et en racine	Ténacité CT12.5	2 x 5 essais
Ténacité dans le domaine de transition en peau externe et en racine	Ténacité CT12.5	2 x 13 essais
Ténacité dans le domaine ductile en peau externe et en racine	Ténacité CT12.5	2 x 6 essais
Ténacité à -5 °C en peau externe et en racine	Ténacité CT12.5	2 x 5 essais

Tableau 12 Programme de caractérisation complémentaire sur la soudure Q3

6.3.3.4. Méthode de caractérisation

i. Courbes de transition en résilience

EDF prévoit dans sa démarche d'obtenir deux courbes de transitions en résilience : une courbe minimale et une courbe moyenne.

La première courbe minimale sera construite à partir des différentes données expérimentales disponibles en matière de résilience : assemblages témoins, maquettes, essais réalisés sur la soudure ARE Q3 expertisée. La deuxième courbe sera construite à partir de la première, en appliquant un facteur correctif 1/0.7, usuellement utilisé par EDF pour passer des valeurs individuelles aux valeurs moyennes.

ii. Corrélation résilience - ténacité dans le domaine de transition

Pour les lignes VVP, les propriétés de ténacité retenues à la conception pour les analyses de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale s'appuient sur les études menées pour les tuyauteries des circuits secondaires principaux des réacteurs de 1450 MWe, mentionnées dans la note en référence [30] :

- l'utilisation de la courbe de ténacité de l'annexe ZG 6110 du RCC-M, établie pour les aciers faiblement alliés et indexée sur une valeur de $60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ à 0°C pour une température de $T - RT_{\text{NDT}}$ (courbe à gauche de la Figure 35), est applicable aux aciers carbone-manganèse (C-Mn), en utilisant une indexation sur une valeur de $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ à 0°C pour une température de $T - TK_{4019}$ (courbe à droite de la Figure 35) ;

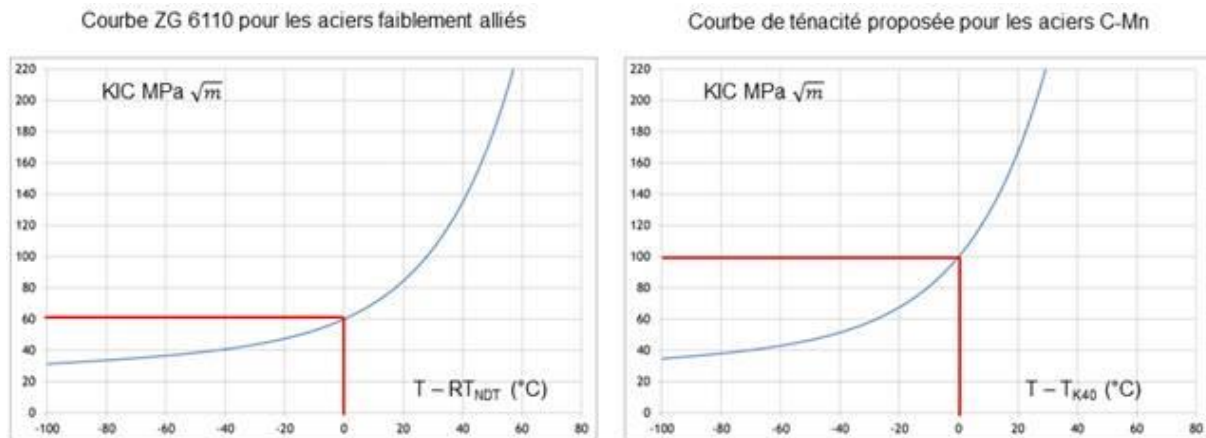


Figure 35 Evolution de la ténacité en fonction de la température pour les aciers faiblement alliés (courbe à gauche) et pour les aciers C-Mn (courbe à droite)

- une corrélation reliant la ténacité au niveau de la valeur de $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ à une résilience moyenne de 40 J est retenue par Framatome : $K_{JC} = 15,8 \cdot \sqrt{K_{vmoy}}$, sachant que les résultats expérimentaux avaient conduit à une corrélation « best fit » : $K_{JC} = 20 \cdot \sqrt{K_{vmoy}}$ (Figure 36). Sur cette figure, la courbe rouge est la courbe de corrélation retenue pour les réacteurs de 1450 MWe et la courbe noire est la corrélation « best-fit ».

¹⁹T_{K40} est la température pour laquelle la valeur de résilience moyenne est de 40 J.

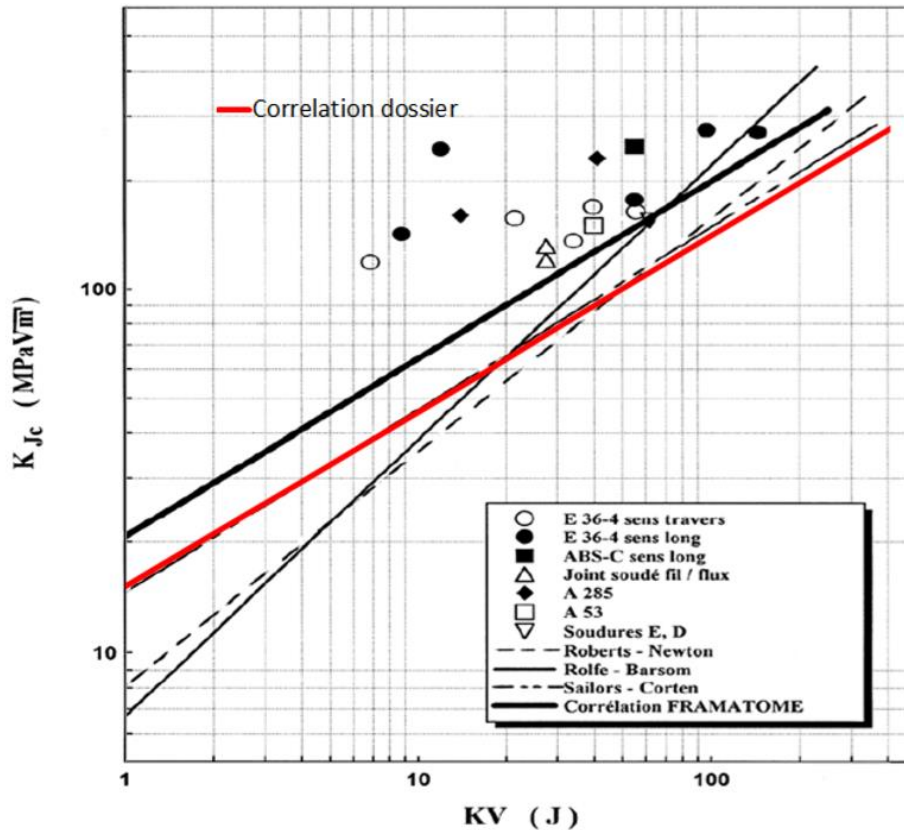


Figure 36 : Corrélation résilience-ténacité dans le domaine de transition

Pour le cas des soudures des traversées VVP du réacteur EPR de Flamanville, EDF souhaite reproduire la méthodologie utilisée pour les réacteurs de 1450 MWe pour définir les propriétés de ténacité. Pour cela, EDF envisage donc de déterminer :

- une corrélation minimale « best-fit » qui sera établie dans un premier temps sur la base des points expérimentaux disponibles pour les soudures de traversée : $K_{JC} = C \cdot \sqrt{K_{vmoy}}$;
- un facteur correctif appliqué sur la corrélation minimale « best-fit » pour obtenir une corrélation intégrant des marges. Afin de conserver la marge introduite dans le cas des réacteurs de 1450 MWe entre les données expérimentales et la transposition de l'annexe ZG, le facteur retenu est de 15,8/20, ce qui conduit à une corrélation de la forme : $K_{JC} = \left(\frac{15,8}{20}\right) \cdot C \cdot \sqrt{K_{vmoy}}$.

Cette nouvelle corrélation permettra de définir le niveau d'énergie moyen correspondant à une ténacité de 100 MPa√m et la température d'indexation pour la courbe ZG 6110.

Pour établir la nouvelle corrélation, EDF a prévu d'utiliser les données des maquettes et de la soudure ARE Q3.

iii. Température de début du palier ductile

Pour définir la température de début du palier ductile, EDF a prévu d'utiliser les essais de résilience complémentaires réalisés sur le coupon témoin CT 13-0434 présentés dans le Tableau 13 issu de la note en référence [33].

Repère	Temp. °C	KV ind. J	fibrosité %	KV moy. J
0434-KV/1	10	73,1	48	74,5
0434-KV/2	10	74,8	45	
0434-KV/3	10	75,6	48	
0434-KV/4	50	129,8	99	120,7
0434-KV/5	50	120,4	86	
0434-KV/6	50	111,9	89	
0434-KV/7	300	156,9	100	157,4
0434-KV/10	300	153,5	100	
0434-KV/11	300	161,8	100	

Tableau 13 : Résultats des essais complémentaires réalisés sur le CT 13-0434

Ces essais ont amené EDF, en retenant comme critère un taux de fibrosité de 100 %, à retenir une température de 60 °C comme température de début du palier ductile retenue dans les calculs de justification de la résistance des soudures de traversée VVP vis-à-vis du risque de rupture brutale. Cette température doit être consolidée par le programme d'essais en référence [31] prévu sur la soudure ARE Q3. Ce programme prévoit de réaliser 10 essais de ténacité (5 éprouvettes CT 12.5 en racine et 5 éprouvettes CT 12.5 en peau) à 60 °C. EDF précise, que pour valider la température du début palier ductile, aucun essai ne devra présenter d'instabilité par clivage en cours d'essai et les essais devront permettre de couvrir une propagation de fissure jusqu'à 2 mm pour la caractérisation selon la norme ASTM E1820. Si une instabilité par clivage devait survenir, EDF prévoit un arrêt des essais en cours et une nouvelle température d'essai sera définie à partir des essais de résilience. Les éprouvettes de ténacité restantes (entre 1 et 9 éprouvettes CT12.5) seront testées à la nouvelle température confirmée à partir de 5 essais de ténacité. Les éprouvettes déjà testées à 60 °C seront remplacées par des éprouvettes initialement prévues pour déterminer la ténacité dans le domaine de transition.

iv. Ténacité dans le domaine ductile

Dans le domaine ductile, le retour d'expérience du parc électronucléaire a permis d'établir une corrélation entre la résilience moyenne au palier ductile et la ténacité à 300 °C : $J_{0,2-300^{\circ}\text{C}} = K_{v \text{ moy, palier ductile}}$ présentée dans la Figure 37.

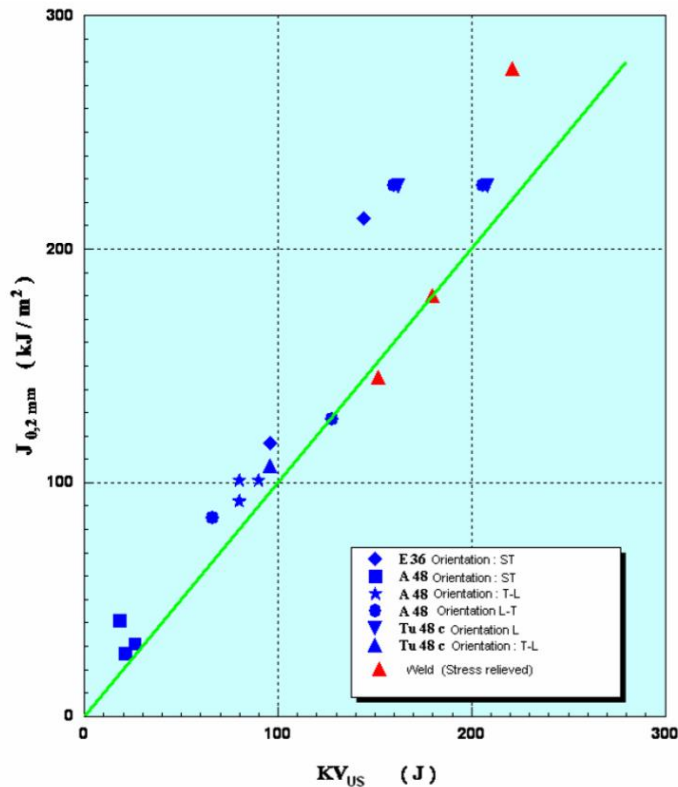


Figure 37 : Corrélation ténacité-résilience dans le domaine ductile

Sur la base de cette corrélation, il a été défini pour le réacteur EPR de Flamanville un critère de résilience moyenne à 0 °C de 100 J afin de pouvoir considérer dans les analyses de résistance vis-à-vis de la rupture brutale une ténacité de 100 kJ/m² dans le domaine ductile.

Dans sa démarche de caractérisation, EDF prévoit d'utiliser les données des maquettes et de la soudure ARE Q3 pour valider que la valeur de 100 kJ/m² est bien atteinte dans le domaine ductile.

6.3.3.5. Avis du rapporteur concernant la représentativité des matériaux caractérisés

Les essais mécaniques réalisés sur les assemblages témoins CT13-0010 et CT13-0434, ont mis en évidence, en octobre 2013, des écarts en matière de résilience à 0 °C par rapport à la valeur de résilience moyenne à 0 °C de 60 J requise par le code RCC-M. Ces valeurs sont en écart avec les valeurs attendues dans le cadre du référentiel technique d'exclusion de rupture tel que défini à la suite de l'avis de la SPN de 2005 et par le fabricant (valeur de résilience moyenne à 0 °C de 100 J).

Les conditions géométriques de réalisation des assemblages témoins sont identiques à celle des soudures de production (tube de diamètre 750 mm et épaisseur de 41 mm). Les essais de résilience réalisés au préalable lors des recettes des métaux d'apport (sur des moules conventionnels de 20 mm d'épaisseur) et de la QMOS (sur des tôles d'épaisseur 30 mm) ont été menés sur des assemblages soudés dans des conditions géométriques de réalisation différentes de celle des soudures de production.

Les valeurs de résilience à 0 °C obtenues, précisées dans le Tableau 8, indiquent que :

- les résultats d'essais de recette obtenus sur les métaux d'apport respectaient les critères du référentiel technique d'exclusion de rupture tel que défini à la suite de l'avis de la SPN de 2005 et par le fabricant ;
- la QMOS respectait le critère défini par le code RCC-M mais pas les spécifications du fabricant en lien avec le référentiel d'exclusion de rupture.

Ces différences de valeurs de résilience illustrent l'impact des conditions de fabrication sur l'atteinte des caractéristiques mécaniques. Le rapporteur rappelle donc qu'il est nécessaire que les assemblages témoins de soudage soient réalisés dans les mêmes conditions de fabrication que les soudures de traversée afin de garantir leur représentativité.

Comparaison des paramètres de fabrication entre les assemblages témoins et les maquettes

Le programme de caractérisation d'EDF prévoit d'exploiter les deux assemblages témoins des soudures de traversée, une soudure ARE Q3 réalisé par le GMES Nordon-Ponticelli (sous-traitant du fabricant Framatome) et quatre maquettes réalisées en 2017 par Framatome au centre technique de Saint-Marcel.

Les maquettes ont été réalisées en conformité avec les spécifications du sous-traitant. Néanmoins tous les paramètres régissant la réalisation effective des soudures et, par voie de conséquence leurs caractéristiques, ne sont pas définis par ces procédures. En particulier les pratiques de séquençement et d'empilage des passes peuvent être propres à chaque société. Le premier paramètre qui conditionne la validité d'une QMOS, et par conséquent les modes opératoires de soudage, est le fabricant (exigence du RCC-M et de la norme ISO 15614-1). La validité de la QMOS est également liée à l'atelier de réalisation, qu'il est nécessaire d'étendre par des transferts de qualification, selon le chapitre S6000 du code RCC-M. Dans le cas présent, deux sociétés sont intervenues dans des ateliers de réalisation et à des périodes différentes, d'une part le GMES Nordon-Ponticelli dans ses ateliers de Nancy entre 2012 et 2014 pour les assemblages témoins et d'autre part l'entité Framatome au centre technique de Saint-Marcel pour les maquettes en 2017. Les soudures de traversée VVP et la soudure ARE Q3 (cf. partie suivante) ont, quant à elles, été effectuées par le GMES Nordon-Ponticelli dans ses ateliers de Nancy entre 2012 et 2014.

Pour illustrer la différence de pratique entre les deux entités, il peut être noté que les pratiques internes du sous-traitant Nordon-Ponticelli permettent un recyclage du flux de 50 à 75 % alors que le centre technique du fabricant Framatome suit les prescriptions du code RCC-M qui déconseille le recyclage du flux (se référer au paragraphe 4.1.3.4).

L'examen comparatif des macrographies des assemblages témoins et des maquettes Figure 38, illustre les différences de morphologie entre ces soudures.

Ainsi les maquettes réalisées par le centre technique de Framatome ont des passes de remplissage centrées sur l'axe du chanfrein, ce qui peut être observé sur les macrographies qui indiquent notamment une zone de chevauchement (zone sombre) en partie centrale. Dans le cas des assemblages témoins, il peut être observé que ces zones de chevauchement sont pour la plupart décalées par rapport à l'axe du chanfrein. Par ailleurs, les macrographies indiquent trois passes de finition axées sur le chanfrein pour les maquettes alors que les assemblages témoins disposent de trois à quatre passes de finition finissant sur le bord du chanfrein. Ces points illustrent la différence de séquençement des passes entre les assemblages respectifs. Ce séquençement conditionne les structures métallurgiques dans les zones fondues des soudures et par voie de conséquence le comportement mécanique dans les zones de prélèvement des éprouvettes de résilience, qui dans le cas des maquettes seront situées majoritairement dans les zones recristallisées.

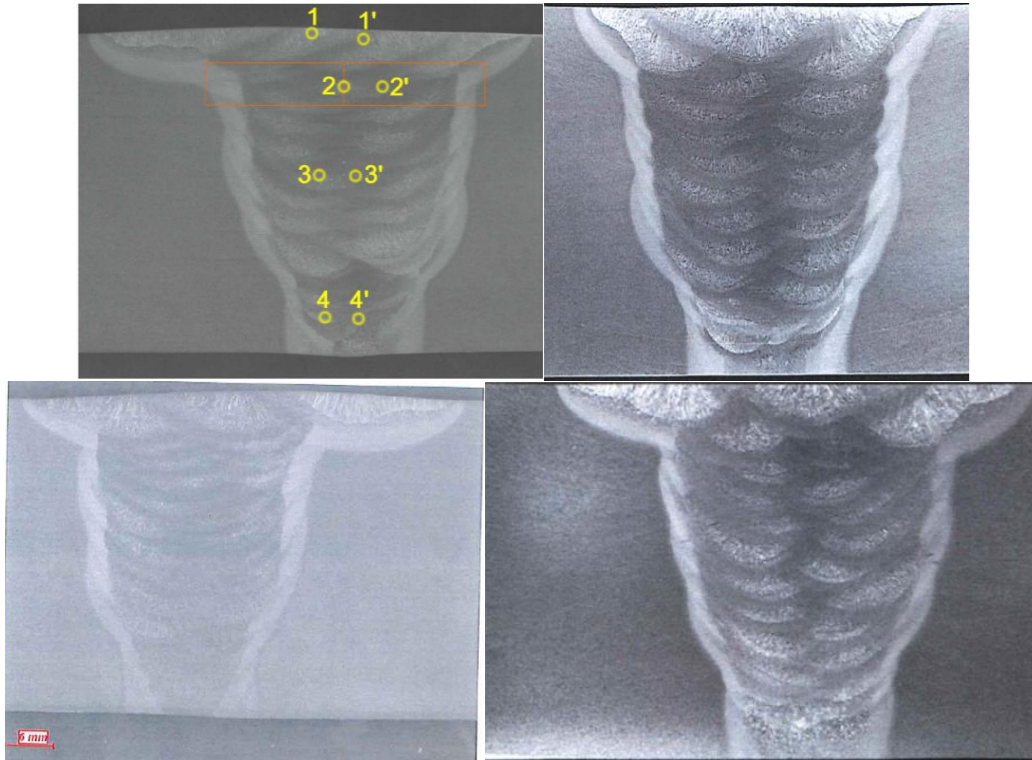


Figure 38 : Coupes macrographiques du coupon témoin CT 13-0434 (en haut à gauche), du coupon témoin CT 13-0310 (en bas à gauche), de la maquette 2 (en haut à droite) et de la maquette 4 (en bas à droite)

Les valeurs de résilience obtenues sur les maquettes sont d'ailleurs supérieures à celle relevées sur les assemblages témoins :

- les éprouvettes prélevées dans les maquettes 1 et 2 réalisées avec des produits d'apport de même désignation commerciale ont présenté des résiliences à 0 °C comprises entre 60 J et 120 J (valeur moyenne environ 85 J) (Figure 39) ;
- les éprouvettes prélevées dans les assemblages témoins des soudures de traversée ont présenté des résiliences comprises entre 42 J et 94 J (valeur moyenne 52,8 J) (Tableau 8).

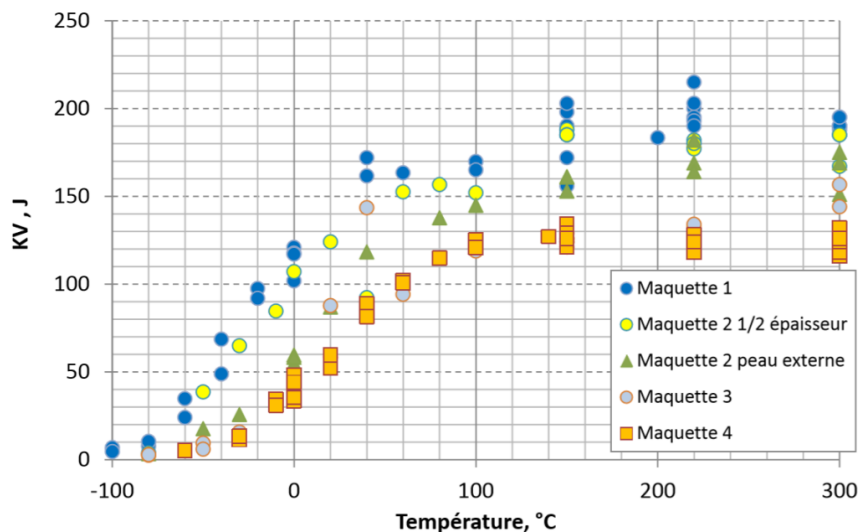


Figure 39 : Courbes de transition de résilience des maquettes 1, 2, 3 et 4 (extrait de la note en référence [30])

Ces deux constats, concernant la morphologie et la résilience, indiquent que ces maquettes ne peuvent pas être considérées comme représentatives des soudures de production et ne permettent pas de déterminer des caractéristiques mécaniques enveloppes. Ainsi, le rapporteur considère que l'exploitation seule de ces maquettes n'apporte pas d'information pertinente pour établir les propriétés mécaniques enveloppes à considérer dans les analyses du risque de rupture brutale des soudures de traversée VVP.

Comparaison des paramètres de fabrication entre la soudure ARE Q3 et des soudures de traversée VVP

Afin de compléter les données provenant de ces maquettes, EDF a choisi de prélever des éprouvettes dans une soudure Q3 du circuit ARE du réacteur EPR de Flamanville, réalisée avec le même lot de couple fil-flux que les soudures de traversée VVP et couverte par la même QMOS (RC 147 AC). Le comparatif des fiches de mode opératoire de soudage rassemblé dans l'analyse de la représentativité en référence [35] permet à EDF de définir les points communs de la soudure ARE Q3 avec les soudures de traversée VVP et d'en analyser la représentativité. Le rapporteur n'a pas de remarque sur la comparaison effectuée mais considère que l'analyse technique menée est insuffisante s'il s'agit d'encadrer les caractéristiques mécaniques des soudures de production. En effet les caractéristiques des soudures de production ne dépendent pas uniquement du lot de produit d'apport utilisé et de la QMOS retenue, mais d'autres conditions particulières de réalisation. L'analyse menée identifie notamment deux différences entre la soudure ARE Q3 et les soudures de traversée VVP:

- la géométrie du chanfrein, qui engendre une différence du nombre et de l'empilement des passes de soudage ;
- les conditions spécifiées de recyclage des flux (se référer au paragraphe 4.1.3.4. Le taux de recyclage du flux maximal autorisé par le RCC-M pour une soudure de qualité Q1 est de 50 % et de 75 % pour une soudure de qualité Q3).

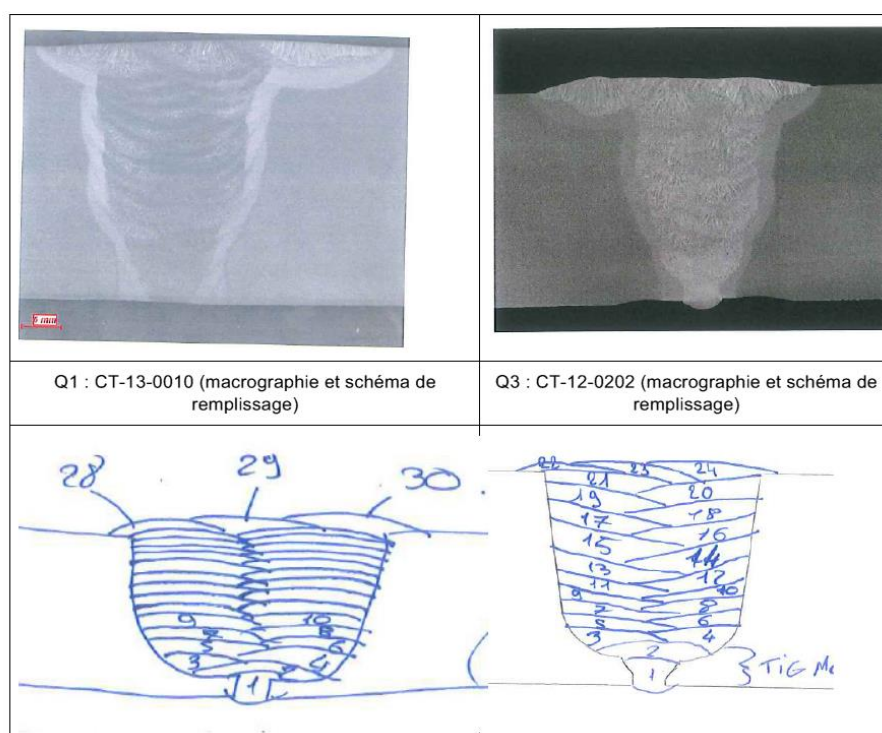


Figure 40 : Morphologie de coupon témoins Q1 et Q3

Le rapporteur considère ainsi que le caractère enveloppe des propriétés mécaniques déduites des essais menés sur des éprouvettes prélevées dans la soudure ARE Q3 n'est pas garanti par rapport à celles des soudures de traversée VVP.

L'analyse menée par l'IRSN indique que les caractéristiques de résilience des zones fondues de soudage dépendent notamment :

- des caractéristiques intrinsèques du produit d'apport utilisé ;
- des paramètres de soudage qui influent entre autres sur la proportion de zones recristallisées et de zones brutes de solidification dans la section des soudures.

Caractéristiques des matériaux d'apports

Les exigences spécifiques liées à la démarche d'exclusion de rupture n'avaient pas été transmises par le fabricant Framatome à son sous-traitant. Ainsi, en analysant le produit d'apport, il convient de noter que le flux utilisé présente un indice de basicité de 1,3. Comme précisé au paragraphe 4.1.3, le fabricant précise dans sa note en référence [15], que l'indice de basicité du flux utilisé pour les soudures de traversée VVP ne permet pas la désoxydation optimale du métal fondu et donc d'atteindre le niveau de résilience requis par le référentiel d'exclusion de rupture du fabricant. Il précise également, que pour améliorer les résiliences à basse température, un flux avec un indice de basicité de l'ordre de 3 aurait dû être sélectionné. Cette analyse est partagée par l'IRSN. Par ailleurs, concernant les appareils à pression de l'industrie nucléaire, le fournisseur du flux préconise l'emploi d'une autre référence de flux présentant un indice de basicité de 3. L'analyse de l'IRSN amène à considérer que les faibles valeurs de résilience obtenues pourraient notamment trouver leur origine dans le type de flux retenu par le fabricant.

Enfin, lors de la qualification et lors des essais de recette des lots de métaux d'apports, le RCC-M prévoit un certain nombre de précautions à prendre pour s'assurer des performances du produit d'apport. En analysant les conditions de recette, Framatome a conclu dans sa note en référence [33] à l'existence de trois écarts au référentiel RCC-M ayant un impact fort sur la résilience de la zone fondue :

- le moule de recette du couple fil/flux présente plus de trois passes par couche alors que le RCC-M (S 2533) exige trois passes par couche ;
- la recette a été réalisée en utilisant un courant alternatif alors que le dossier de qualification, requis par le RCC-M (paragraphe S 5000), et les soudures de production ont été réalisés avec un courant continu. Le RCC-M (paragraphe S 5230 et S 2110) précise que tout changement de nature de courant nécessite une reprise de l'essai de qualification et que les essais de recette sont destinés à s'assurer que les lots de produits d'apport utilisés en fabrication sont analogues à ceux ayant fait l'objet de la qualification ;
- la température entre passes mesurées (160 °C) lors de la recette est très inférieure à la température maximale admise en production (250 °C), ce qui est contraire aux recommandations du RCC-M (paragraphe S 2533).

Framatome déduit de cette analyse de la recette du couple fil-flux des soudures de traversée, que les paramètres influençant fortement la résilience de la zone fondue sont la disposition, le nombre et le taux de recouvrement des passes lors du soudage, l'emplacement des éprouvettes d'essais ainsi que la température entre passes.

L'IRSN précise que cette analyse est particulièrement avérée pour le cas des soudures réalisées mettant en œuvre le procédé automatique fil-flux puisque, compte tenu de la grosseur des passes possibles, l'étendue des zones brutes de solidification (ou recristallisées) peut concerner une bonne partie de la section efficace en fond d'entaille des éprouvettes de résilience de type KCV²⁰ et conduire à des résultats très dispersés.

Influence des paramètres de soudage et de mise en œuvre du mode opératoire de soudage sur la proportion de zones recristallisées et de zones brutes de solidification dans la section des soudures

Dans les soudures multi-passes, les zones fondues sont constituées d'une alternance de structures brutes de solidification (zone « blanche » sur la Figure 41) et de structures recristallisées sous l'effet du cycle thermique des passes ultérieures (zone grise foncée sur la Figure 41). Les caractéristiques de chaque structure ne sont pas identiques et la proportion relative de ces deux types de structure est liée aux conditions de mise en œuvre du soudage (procédé, énergie, diamètre du produit d'apport, séquençement, ...). Pour illustrer cette différence de proportion, la Figure 42 montre que le réglage « A » des paramètres de soudage de la soudure réalisée avec le procédé fil/flux amène une forte proportion de zone recristallisée, contrairement au réglage « B ».

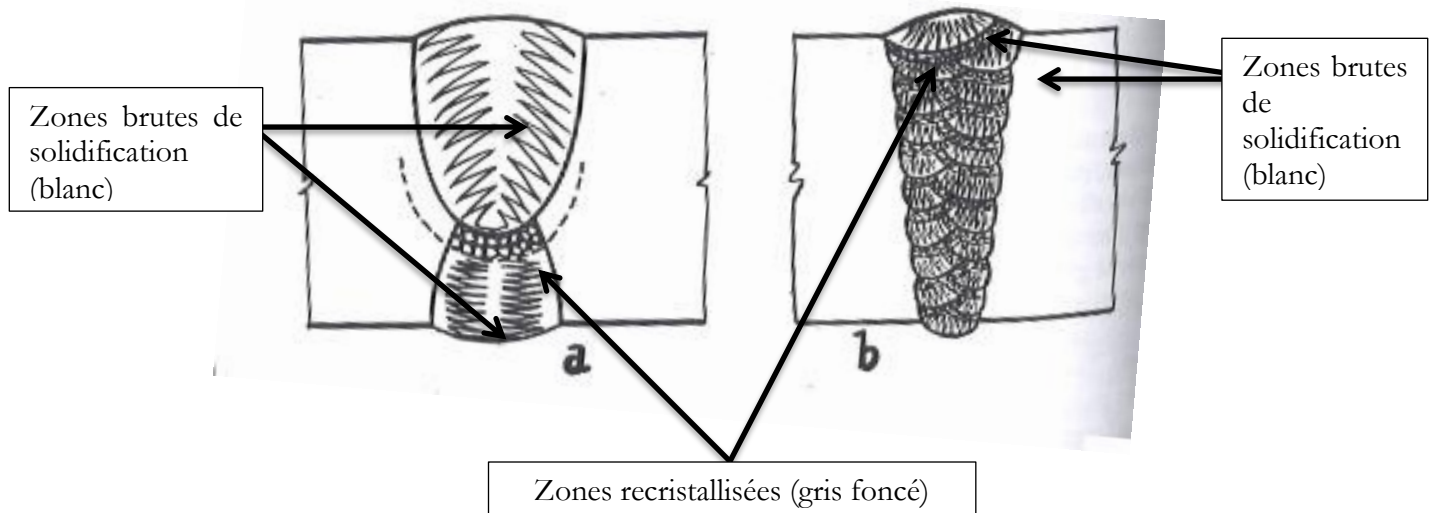


Figure 41 : Soudure sous flux réalisée en deux passes (à gauche) avec faible proportion de zones recristallisées, soudure multi-passes avec forte proportion de zones recristallisées (à droite)

²⁰ La dimension de l'éprouvette KCV est de 8×10mm.

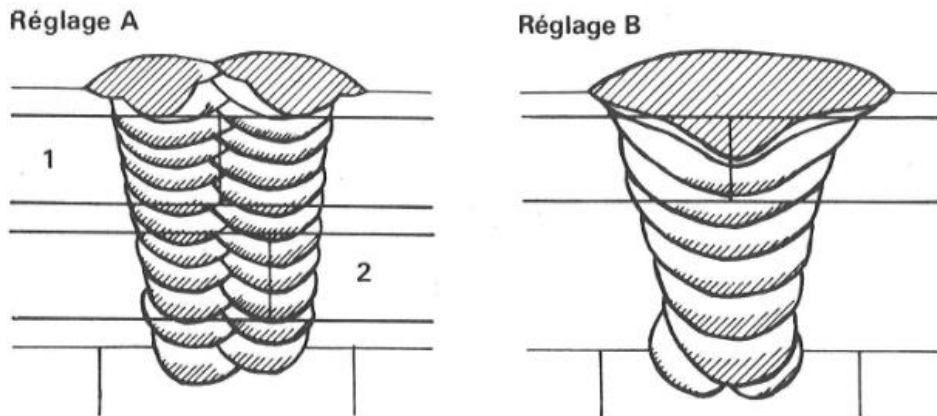


Figure 42 : Prélèvement des éprouvettes de résiliences dans des soudures réalisées en fil-flux (à gauche) forte proportion de zone recristallisée et à droite faible proportion de zone recristallisée)

Concernant les soudures réalisées avec le procédé automatique fil-flux, l'étendue des zones brutes de solidification (ou recristallisées) peut concerner une bonne partie de la section efficace en fond d'entaille des éprouvettes de résilience de type KCV. Comme précisé à la Figure 43, l'éprouvette 1, prélevée dans la soudure disposant du réglage « A », dispose d'un fond d'entaille avec majoritairement des zones recristallisées alors que l'éprouvette 2 contient plus de zones brutes de solidification. Les résiliences obtenues avec les éprouvettes de type 1 et 2 conduisent à des résultats différents. La Figure 43 indique qu'un facteur de 3 est observé sur les résiliences moyennes obtenues entre les soudures disposant du réglage « B » et celles réalisées avec le réglage « A ». Cette spécificité a d'ailleurs conduit à la prescription particulière dans le RCC-M (paragraphe S2533) qui autorise au maximum trois passes par couche lors des recettes réalisées sur moule.

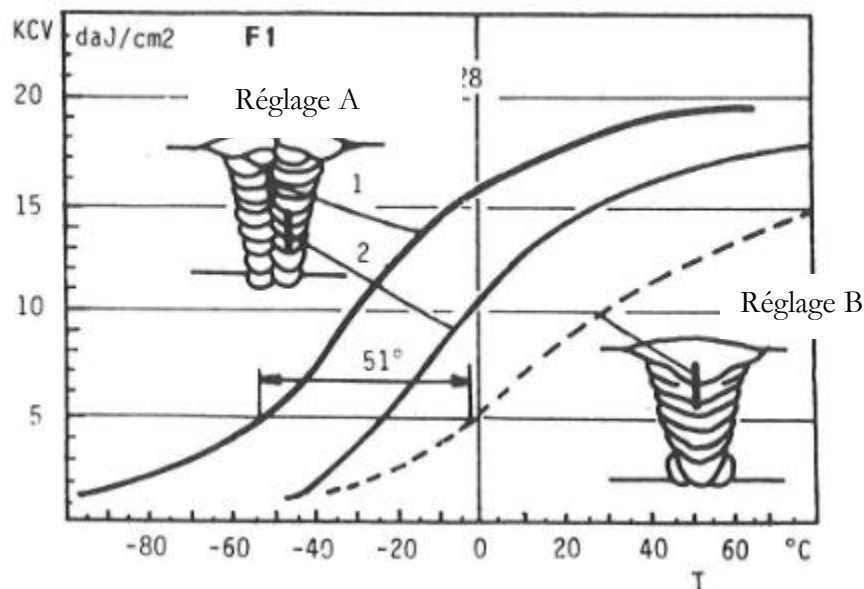


Figure 43 : Comparaison des courbes de résilience en fonction des zones de prélèvement de la Figure 42

Ainsi, l'analyse de l'IRSN conclut que la proportion de zones recristallisées et de zones brutes de solidification dans la section des soudures est un paramètre important à prendre en compte pour juger de la représentativité des échantillons exploités dans le cadre du programme de caractérisation.

Ce paramètre est d'autant plus important que la soudure de traversée EPP6208TWM-S1 présente par ailleurs la particularité de contenir un défaut plan situé en bord de chanfrein près de la peau externe de la soudure (cf. chapitre 7). La probabilité que l'extrémité de ce défaut soit située dans une zone brute de solidification est très forte compte tenu des pratiques observées sur ce procédé de soudage fil-flux (cf. macrographie des assemblages témoins présentée en Figure 38).

Haute confiance dans la suffisance des conservatismes considérés pour les caractéristiques mécaniques prises en données d'entrée des calculs de mécanique à la rupture brutale

Les éléments présentés ci-dessus soulignent certaines différences constatées dans la réalisation des maquettes, assemblages témoins et soudures de production qui peuvent notamment avoir un impact sur les structures brutes de solidification et donc *in fine* sur les propriétés mécaniques des soudures. Ces différences ne permettent donc pas de conclure à une représentativité suffisante des programmes d'essais prévus par EDF.

Au regard de ce constat et de l'instruction présentée ci-dessus, EDF a présenté sa nouvelle position dans son courrier du 15 mars 2019 en annexe 13.

EDF partage le besoin de renforcer la base de données permettant de définir les caractéristiques mécaniques pour les calculs de rupture brutale. Il indique, à ce titre, vouloir compléter sa base de données par les résultats d'essais réalisés sur deux autres soudures de qualité Q3 des circuits ARE, réalisées avec le même produit d'apport que les soudures des traversées VVP.

Ce faisant, EDF considère, malgré les différences pouvant exister entre les soudures de traversée VVP et les éléments de sa base de données expérimentale (maquettes, assemblages témoins, soudures ARE Q3 expertisées) que ces derniers apportent une connaissance pertinente sur certains paramètres influents sur les caractéristiques mécaniques (géométrie des chanfreins, recyclage du flux, répartition des passes de soudage et influence des zones brutes de solidification).

Tenant compte de ces éléments, le rapporteur rappelle que les données d'entrée des calculs de rupture brutale que souhaite retenir EDF doivent être enveloppes des caractéristiques réelles des soudures de traversée. De plus la confiance dans l'atteinte effective des caractéristiques mécaniques suffisantes doit être d'autant plus forte que les valeurs mesurées, notamment lors des programmes d'essais, seront basses.

Ainsi le rapporteur considère que pour pouvoir choisir des caractéristiques mécaniques enveloppes, il est notamment nécessaire d'apprécier les caractéristiques des zones fondues réalisées avec ce type de flux et présentant principalement une structure brute de solidification (non recristallisée).

En dépit des deux nouvelles soudures ARE Q3 qu'EDF prévoit d'expertiser, les caractérisations effectuées jusqu'à présent ou proposées par EDF portent sur des assemblages soudés réalisés dans des conditions ne permettant pas de garantir le caractère enveloppe des caractéristiques obtenues par rapport à celles des soudures de production.

Par ailleurs si les caractéristiques des structures brutes de solidification pourraient apporter un éclairage sur les valeurs basses de résilience, il convient de noter que l'exploitant n'apporte pas d'élément technique permettant d'expliquer d'autres phénomènes ou différences observés sur les différents assemblages et maquettes. C'est en particulier le cas de l'inversion de résistance à la traction R_m observée sur la première soudure ARE Q3 expertisée qui n'a été identifiée sur aucun assemblage témoin censé être représentatif des soudures réalisées avec le procédé fil/flux. Cette dernière différence souligne à nouveau la difficulté d'acquiescer une haute confiance dans la représentativité des assemblages témoins et maquettes vis-à-vis des soudures de production.

Afin d'acquiescer une haute confiance dans le choix de données d'entrée des calculs enveloppes des caractéristiques réelles des soudures de traversée, le rapporteur considère donc que les programmes d'essais proposés par EDF doivent être significativement renforcés en matière de représentativité.

Dans un premier temps, le rapporteur considère que la confiance dans la représentativité de la base de données expérimentales proposée par EDF ne peut être acquise sans une connaissance suffisante des phénomènes physiques entrant en jeu en fonction des variations possibles des propriétés physico-chimiques des matériaux d'apport et des différents paramètres de soudage et paramètres associés à la mise en œuvre du procédé fil/flux (comme le taux de recyclage de flux, les températures entre passes, les dispositions et le recouvrement des passes, etc.). Il est par conséquent nécessaire de prévoir un programme d'essais permettant d'obtenir une telle connaissance des phénomènes physiques entrant en jeu, qui doit notamment permettre d'expliquer et reproduire fidèlement les valeurs basses de résilience observées sur les assemblages témoins et l'inversion de R_m observée sur la première soudure ARE Q3 expertisée et qui n'est pas présente sur les assemblages témoins.

Dans un second temps, une fois cette connaissance acquise, afin d'obtenir des caractéristiques enveloppes des soudures de production (et notamment dans les zones brutes de solidification) pouvant être prises en données d'entrée des calculs, le rapporteur considère également nécessaire de réaliser des essais aux limites de l'ensemble des paramètres influents identifiés par le programme d'essais précédent, définis dans des conditions représentatives de la pratique industrielle de réalisation de ces soudures.

Le lot de matériau d'apport spécifique utilisé pour la fabrication n'existant plus, le rapporteur considère par ailleurs que ces programmes d'essais devraient intégrer un nombre significatif de lots de même désignation commerciale afin d'apprécier, par une analyse statistique le cas échéant, l'incertitude des caractéristiques des soudures de production des traversées VVP.

En conséquence, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 1

Le rapporteur recommande que la caractérisation des propriétés mécaniques des soudures de traversée proposée par EDF soit complétée par des programmes d'essais permettant d'une part d'acquiescer une connaissance du mode opératoire de soudage fil/flux associé au type de métaux d'apport utilisés suffisante pour notamment comprendre et reproduire les phénomènes observés et d'autre part d'obtenir, avec un haut niveau de confiance, des caractéristiques enveloppes de celles des soudures de production.

Ces programmes d'essai doivent permettre d'identifier les paramètres associés à la mise en œuvre du procédé fil/flux qui influent sur les caractéristiques mécaniques des soudures réalisées avec ce procédé et ainsi définir les valeurs « limites » de ces paramètres qui amènent à l'obtention des caractéristiques mécaniques les plus altérées en terme de résilience, de ténacité, de traction et de sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation.

Dans un second temps, des assemblages soudés pourront alors être réalisés avec ces valeurs « limites », à partir de plusieurs lots de couple fil/flux de même désignation commerciale que celui mis en œuvre pour les soudures de traversée et dans des conditions de soudage représentatives de ces soudures.

Le rapporteur recommande également que l'exploitant définisse les essais à réaliser sur ces assemblages qui permettront de caractériser de manière conservatrice le matériau, notamment dans les zones brutes de solidification.

Enfin, afin d'assurer également un haut niveau de confiance dans les résultats de ces essais complémentaires, le rapporteur considère que ces derniers devront être réalisés dans des laboratoires d'essais indépendants de l'exploitant et du fabricant, accrédités suivant une norme établissant les exigences générales de compétence des laboratoires d'essais. Ces essais devront par ailleurs faire l'objet d'une surveillance par une tierce partie.

Par rapport à cette dernière considération, EDF a précisé, dans son courrier en annexe 13, que le Centre Technique Framatome d'Erlangen :

- est déjà impliqué dans un programme en cours (essais sur la première soudure ARE Q3) ;
- dispose d'une expertise technique, notamment sur les essais à chaud de nature à apporter un haut niveau de confiance sur les résultats obtenus ;
- a déjà été impliqué dans différents programmes d'essais, notamment pour le sujet des calottes de cuve ;
- a fait l'objet d'une inspection par l'ASN et l'IRSN.

Ainsi, EDF souhaite, dans la mesure où l'ensemble des programmes d'essais fait systématiquement l'objet d'une surveillance par une tierce partie indépendante, que le centre technique d'Erlangen puisse continuer à réaliser des programmes d'essais.

Etant donné le retour d'expérience récent des programmes d'essais réalisés dans ce laboratoire et la surveillance par une tierce partie indépendante, le rapporteur ne formule pas d'objection à la demande de l'exploitant concernant le seul laboratoire d'Erlangen. L'emploi de ce laboratoire fera l'objet d'une surveillance particulière.

6.3.3.6. Avis du rapporteur concernant les formules de corrélation entre valeurs de ténacité et de résilience

Corrélation dans le domaine de transition fragile-ductile

Dans le domaine de transition fragile-ductile, EDF propose, pour déterminer la corrélation entre valeurs de ténacité et de résilience, d'utiliser la méthode appliquée au palier N4 en référence [45] décrite au paragraphe 6.3.3.4. L'application de cette méthode pour le réacteur EPR de Flamanville, et en particulier pour les soudures de traversée, repose sur plusieurs hypothèses :

- la forme analytique $K_{JC} = A \cdot \sqrt{K_{vmoy}}$ est adaptée pour décrire les propriétés des matériaux des lignes VVP du réacteur EPR de Flamanville ;
- la forme de la courbe d'indexation de l'annexe ZG 6110 du RCC-M permet de décrire convenablement les propriétés des matériaux des lignes VVP du réacteur EPR de Flamanville ;
- le niveau d'énergie moyen corrélé à une ténacité de $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ correspond à une température d'indexation de la courbe de l'annexe ZG 6110 du RCC-M permettant de couvrir effectivement les données de ténacité disponibles (modification de l'indexation en calant la ténacité de $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ sur la température à laquelle la résilience atteint 40 J).

L'IRSN comprend du programme de caractérisation proposé que la validité de ces trois hypothèses sera analysée par EDF au vu des résultats issus de ces programmes et que, si elles ne sont pas vérifiées, les modalités de traitement des résultats pourraient être ajustées le cas échéant. L'IRSN et le rapporteur attirent l'attention sur les conservatismes qu'il est nécessaire de préserver dans l'appréciation des caractéristiques des matériaux à prendre en compte pour les analyses du comportement mécanique (se référer à la recommandation précédente).

L'IRSN note que, dans cet objectif, EDF propose d'établir la corrélation entre la ténacité et la résilience à partir d'une courbe de transition de résilience établie à partir des valeurs minimales obtenues sur les assemblages soudés servant de support aux programmes d'essais (maquettes, coupons témoin, soudure ARE Q3). EDF propose ensuite de « remonter à une courbe moyenne enveloppe » en considérant un facteur usuel de 0,7. Ce facteur correspond au rapport entre les valeurs moyennes et les valeurs minimales des spécifications d'approvisionnement²¹.

L'IRSN ne remet pas en cause cette méthodologie mais note que, pour la mettre en œuvre, il est nécessaire de mener suffisamment d'essais de manière à décrire au mieux la dispersion des valeurs de résilience du matériau, et d'en apprécier l'incertitude afin d'en couvrir les valeurs les plus basses obtenues avec le couple fil (AS 35 ou OE S2)/flux (AS 461 Si). Des provisions sont ainsi nécessaires pour que cette méthodologie soit transposable aux soudures des traversées VVP.

EDF propose également de retenir un facteur correctif pour la corrélation entre ténacité et résilience, pour obtenir une corrélation enveloppe conservative, correspondant à celui adopté pour le palier N4 (15,8/20), mais sans analyser ni justifier la pertinence de ce coefficient pour le cas du matériau des soudures de traversée du réacteur EPR de Flamanville.

Aussi, le rapporteur considère que la méthode de caractérisation d'EDF doit prendre en compte les résultats issus des programmes d'essais réalisés sur les assemblages témoins, les soudures ARE Q3, les maquettes 1 et 2 réalisées avec des produits d'apport de même désignation commerciale ainsi que les essais issus du programme complémentaire mentionné dans la recommandation n° 1. Le rapporteur considère que les essais réalisés sur les maquettes 3 et 4, à partir de métaux d'apports d'autre désignation commerciale que celui mis en œuvre sur les soudures de traversée VVP, ne peuvent être considérées comme représentatifs (cf. paragraphe 6.3.3.3). EDF devra valider les hypothèses de sa méthode à partir des résultats obtenus.

Corrélation dans le domaine ductile

Dans sa démarche de caractérisation initialement transmise, EDF prévoit de vérifier que la valeur de la résistance à l'amorçage de la déchirure de 100 kJ/m² est bien atteinte dans le domaine ductile, sans préciser s'il sera vérifié que la corrélation entre la résilience moyenne au palier ductile et cette caractéristique à 300 °C définie pour le palier N4 reste valable : ($J_{0,2-300^{\circ}\text{C}} = K_{v\text{ moy,palier ductile}}$).

EDF a depuis précisé sa démarche, dans son projet de position n° 5 du courrier en annexe 13. La corrélation entre la résilience moyenne au palier ductile et la résistance à l'amorçage de la déchirure à 300 °C définie pour le palier N4 ne sera pas utilisée. EDF retiendra la résistance à l'amorçage de la déchirure évaluée sur les différentes soudures ARE Q3 expertisées et étudiera l'éventuelle variation de la résistance à l'amorçage de la déchirure entre 200 °C et 300 °C. Le rapporteur considère nécessaire qu'EDF vérifie que la corrélation entre la résilience moyenne au palier ductile et à la valeur de résistance à l'amorçage à la déchirure à 300 °C est cohérente avec celle déterminée pour le palier N4.

²¹La valeur minimale du RCC-M à respecter est 42 J en individuel et 60 J en moyenne soit un facteur de 0,7 pour passer de valeurs individuelles de résilience à des valeurs moyennes.

EDF devra également justifier les conservatismes retenus vis-à-vis des écarts non résorbés sur les soudures des traversées VVP.

En conséquence, au regard des considérations concernant les corrélations dans les domaines ductile et de transition fragile-ductile, en lien avec la recommandation n° 1, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 2

Le rapporteur recommande qu'EDF établisse la corrélation entre la ténacité et la résilience dans le domaine de transition à partir des valeurs obtenues lors du programme d'essais aux « limites » et des résultats issus de soudures représentatives des soudures de préfabrication. Le rapporteur considère que les résultats obtenus sur les assemblages témoins, les soudures ARE Q3 ainsi que sur les maquettes 1 et 2 peuvent compléter ceux qui seront obtenus par l'intermédiaire du programme d'essais aux « limites ».

Le rapporteur recommande qu'EDF valide les hypothèses de la méthode de détermination des propriétés de ténacité dans le domaine de transition fragile-ductile et justifie les provisions retenues compte tenu des écarts constatés lors de la réalisation des soudures des traversées VVP.

Enfin, le rapporteur recommande que, pour la détermination de la valeur de résistance minimale à l'amorçage de la déchirure au palier ductile prise en compte dans les analyses de rupture brutale, EDF prenne en compte les valeurs obtenues lors du programme d'essais aux « limites ». Le rapporteur recommande également qu'EDF vérifie que la corrélation entre la résilience moyenne au palier ductile et la valeur de résistance à l'amorçage à la déchirure à 300 °C est cohérente avec celle déterminée pour le palier N4.

6.3.4. Mise en évidence du phénomène de vieillissement sous déformation sur les soudures de traversée VVP

L'analyse présentée par le rapporteur dans cette partie est basée sur l'instruction faite par l'IRSN en réponse à la saisine en référence [93].

6.3.4.1. Caractérisation du phénomène de vieillissement sous déformation

Comme précisé au paragraphe 4.1.5.1, le vieillissement sous déformation est un phénomène qui intervient sur un grand nombre d'alliages métalliques. Il se traduit par une évolution du comportement mécanique du matériau au cours du temps²² et en fonction de la température.

Comme rappelé au paragraphe 4.1.5.2, les choix de conception et de fabrication des lignes secondaires du réacteur EPR de Flamanville devraient conduire à une maîtrise du phénomène de vieillissement sous déformation. Il avait été considéré lors de la SPN de 2005 qu'une telle maîtrise du phénomène pouvait se traduire par un décalage de la courbe de transition fragile-ductile en fin de vie du réacteur inférieur à 15 °C.

La problématique du vieillissement sous déformation est précisée au paragraphe 4.1.5 et détaillé en annexe 10. Ne sont repris dans ce paragraphe que les éléments relatifs aux procédés de soudage utilisés pour les soudures des traversées.

6.3.4.2. Vieillissement sous déformation sur les soudures de traversée VVP

Les modes opératoires de soudage utilisés pour la réalisation des soudures de traversée VVP ont été détaillés dans le chapitre 2.1.

Passes de racine et de soutien : matériaux d'apport EMK35Cr

Dans sa note du 1^{er} décembre 2017 en référence [19], EDF mentionne ne pas avoir constaté d'inversion des valeurs de R_m sur les résultats d'essais mécaniques réalisés sur les soudures de traversée. Les éprouvettes d'essais ayant été prélevées dans les passes de remplissage, les passes de racine et de soutien n'ont pas été caractérisées par ces essais.

Dans la note en référence [22] puis dans son courrier en référence [76], EDF précise qu'un programme de quantification du décalage de la courbe de transition lié au phénomène de vieillissement sous déformation est envisagé pour le fil EMK35Cr.

Passes de remplissage et de finition : matériaux d'apport « fil/flux » (SAF FRO AS35/ Oerlikon AS 461 Si et Oerlikon OE S2 / Oerlikon AS 461 Si)

²² A la différence du phénomène de vieillissement thermique qui peut intervenir pendant toute la durée de vie d'un équipement, le phénomène de vieillissement sous déformation peut, sous certaines conditions de sollicitations mécaniques et thermiques, intervenir suivant des cinétiques beaucoup plus rapides. Ainsi le vieillissement sous déformation des tuyauteries en acier carbone manganèse se produit dès la première montée en température et n'évolue plus ensuite sauf si de nouvelles déformations plastiques interviennent ensuite en service.

Dans un premier temps, dans sa note en référence [19], EDF mentionne ne pas avoir constaté d'inversion des valeurs de R_m sur les résultats d'essais mécaniques réalisés à partir d'éprouvettes de traction prélevées dans les passes de remplissage des assemblages témoins couvrant les soudures de traversée réalisées avec le procédé fil/flux. Ce constat a conduit EDF à considérer initialement que le mode opératoire fil/flux employé pour les soudures de traversée ne présentait pas de sensibilité particulière au phénomène de vieillissement sous déformation.

Dans un second temps, par son courrier en référence [88], EDF présente les premiers résultats acquis lors d'essais mécaniques réalisés sur la soudure première ARE Q3 expertisée (ARE3510TY-F02 S5). Les résultats des essais de traction obtenus sur des éprouvettes prélevées dans les passes de remplissage réalisées en fil/flux présentent une inversion de la valeur du R_m à 300 °C par rapport à celle mesurée à température ambiante, ce qui indique vraisemblablement une sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation.

Aucune explication n'avait été apportée initialement par EDF et Framatome sur l'origine de l'inversion de la résistance à la traction R_m à température élevée observée malgré la réalisation du traitement thermique de détensionnement. Dans son courrier en référence [76], EDF précisait néanmoins qu'un programme de quantification du décalage de la courbe de transition lié au vieillissement sous déformation n'était pas prévu pour les métaux d'apport utilisés avec le procédé fil/flux car la matière restante n'est pas suffisante pour réaliser les essais nécessaires à cette quantification. EDF retenait alors l'approche suivante:

- prise en compte d'un décalage forfaitaire de 40 °C de la courbe de transition fragile-ductile dans les calculs mécaniques ;
- confirmation, à partir des quantifications réalisées sur les autres produits d'apport, du caractère enveloppe de cette valeur de décalage.

EDF a depuis précisé, dans les position n° 6 et action n° 6 de son courrier du 15 mars 2019 en annexe 13, que l'« inversion des R_m » observée sur la soudure ARE Q3 expertisée était totalement représentative d'un phénomène de vieillissement sous déformation puisque ce phénomène présente les deux caractéristiques suivantes :

- un décalage vers les températures positives de la transition fragile-ductile ;
- un creux de ductilité dans le domaine de température 200 °C – 300 °C.

L'exploitant mentionne qu'il avait été considéré initialement qu'un programme de quantification de la sensibilité d'un matériau au vieillissement sous déformation devait être engagé uniquement lorsqu'une « inversion des R_m » était observée. Pour autant, EDF précise que l'analyse des résultats des assemblages témoins montre que, pour un procédé de soudage donné, une « inversion des R_m » n'est pas systématiquement constatée. En conséquence, EDF a décidé de quantifier la sensibilité au vieillissement sous déformation pour les métaux d'apport utilisés pour les soudures VVP en exclusion de rupture indépendamment d'un constat ou non d'« inversion des R_m ».

L'exploitant précise également, dans son courrier en annexe 13, que les causes de la présence ou non d'une « inversion des R_m » pour des matériaux présentant une possible sensibilité au vieillissement sous déformation ne sont pas clairement identifiées. A ce stade, l'hypothèse avancée par EDF, concerne la variabilité dans les conditions de réalisation du traitement thermique de détensionnement.

Ainsi, afin d'apporter des premiers éléments d'explication liés au constat de la présence d'« inversion des R_m » sur la première soudure ARE Q3 expertisée alors que cela n'avait pas été constaté sur les assemblages témoins de production, EDF mentionne dans son projet d'action n° 6 du courrier en annexe 13, qu'il comparera les résultats de l'ensemble du programme d'essais de quantification de la sensibilité au vieillissement sous déformation qui prend en compte de la matière d'origines différentes (assemblage témoin, maquette, soudures ARE « expertisées »).

Réparations par soudage :

Les soudures de traversée ont fait l'objet de plusieurs réparations par soudage. Sur ces huit soudures, deux ont pu être réalisées sans réparation, trois avec une réparation, deux avec deux réparations et une soudure a nécessité six réparations.

EDF a transmis à l'ASN les matrices de conformité des huit soudures de traversée VVP. Ces matrices n'indiquent pas de réparation mettant en œuvre des produits d'apports autres que ceux autorisés par la QMOS R147AC relative aux procédés TIG manuel et fil/flux (métal d'apport EMK35Cr pour les passes de racine et de soutien et métaux d'apport AS 35/OES2 et AS 461 Si pour les passes de remplissage et de finition).

Les considérations précédentes concernant les passes de racine, de soutien, de remplissage et de finition s'appliquent donc également aux réparations effectuées sur les soudures de traversée VVP.

6.3.4.3. Position du rapporteur

Identification des causes d'inversion de R_m

Le rapporteur considère qu'il est nécessaire, en préalable de la réalisation des essais, d'identifier les causes à l'origine de l'inversion de la résistance à la traction R_m à température élevée identifiée lors des premiers résultats acquis lors d'essais mécaniques réalisés sur la soudure ARE Q3 (ARE3510TY-F02 S5) et l'absence de cette inversion lors des essais réalisés sur les assemblages témoins de soudage.

Le rapporteur constate qu'EDF n'a pas identifié les causes de la présence ou non d'inversion de la résistance à la traction R_m , et ne fait état, à ce stade, que d'hypothèses. En lien avec la recommandation n° 1, le rapporteur considère, étant donné les propriétés mécaniques faibles observées pour les assemblages témoins des soudures de traversée et la première soudure ARE Q3 expertisée, que la haute confiance dans l'atteinte de propriétés mécaniques suffisantes ne peut être acquise sans une connaissance fine du matériau des soudures de traversée. Cette connaissance doit en effet permettre, dans ce cas où les propriétés mécaniques présentent peu de marge, d'apprécier le caractère conservatif ou non des données d'entrée prises dans les calculs.

Le rapporteur considère en particulier nécessaire de disposer d'une connaissance des phénomènes physiques permettant d'expliquer les causes de l'inversion de R_m et notamment l'influence des métaux d'apport, des conditions opératoires de soudage et du traitement thermique de détensionnement sur les paramètres physiques à l'origine de cette inversion. EDF considérant que le vieillissement sous déformation est à l'origine de cette inversion, l'influence des différents paramètres mentionnés sur la présence de dislocations et d'atomes interstitiels, leur densité et leurs interactions est à analyser et permettra de confirmer ou non le fait que le vieillissement sous déformation est bien à l'origine de l'inversion observée.

En conséquence, le rapporteur formule, en lien avec la recommandation n° 1, la recommandation suivante :

Recommandation n° 3

Le rapporteur recommande qu'EDF identifie les causes expliquant l'inversion de R_m identifié lors des premiers résultats acquis lors d'essais mécaniques réalisés sur la première soudure ARE Q3 expertisée (ARE 3510TY-F02 S5) ainsi que l'absence de cette inversion lors des essais réalisés sur les assemblages témoins de soudage.

Identification des métaux d'apport sensibles au VSD :

Les passes de racine et de soutien des soudures de traversée VVP ont été réalisées avec le procédé TIG manuel avec le métal d'apport EMK35Cr. EDF précise qu'un programme de quantification du décalage de la courbe de transition lié au phénomène de vieillissement sous déformation est envisagé pour le fil EMK35Cr.

Le rapporteur note qu'EDF prévoit un programme de quantification de la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation pour le fil EMK35Cr.

Concernant les passes de remplissage et de finition réalisées avec les métaux d'apport fil/flux décrits au paragraphe 6.3.4.2, EDF n'exclut plus la possibilité que ces métaux soient également sensibles à ce phénomène de vieillissement. Dans un premier temps, EDF prévoyait la prise en compte d'un décalage forfaitaire de 40 °C de la courbe de transition fragile-ductile dans les calculs mécaniques, puis la confirmation, à partir des quantifications réalisées sur les autres produits d'apport, du caractère enveloppe de cette valeur de décalage. EDF s'est depuis engagée, dans son projet d'action n° 7 du courrier en annexe 13, à quantifier sur l'une des deux nouvelles soudures ARE Q3 « expertisées », à échéance de fin septembre 2019, la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation.

Le rapporteur considère que des programmes d'essais sont nécessaires pour caractériser de manière robuste les propriétés mécaniques des soudures des tuyauteries VVP. Ainsi, concernant les passes de remplissage et de finition réalisées avec les métaux d'apport fil/flux, le rapporteur considèrerait que la démarche initiale proposée par l'exploitant, consistant à prendre en compte un décalage forfaitaire de 40 °C de la courbe de transition fragile-ductile dans les calculs mécaniques, ne permettait pas d'évaluer la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation des matériaux mis en œuvre avec le haut niveau de confiance attendu.

Concernant l'engagement d'EDF de quantification sur une des deux nouvelles soudures ARE Q3 « expertisées » de la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation, le rapporteur considère, qu'en l'absence d'identification des causes expliquant l'inversion du R_m tel que précisé dans la recommandation 3, le programme complémentaire prévu par l'exploitant sur une des nouvelles soudures ARE Q3, ne permet pas d'apporter la garantie d'une caractérisation enveloppe des propriétés mécaniques des soudures de production. Le rapporteur considère ainsi que la quantification du phénomène de vieillissement sous déformation devrait plutôt s'appuyer sur le programme d'essais aux « limites », objet de la recommandation n° 1.

Le rapporteur formule ainsi la recommandation suivante :

Recommandation n° 4

Le rapporteur considère que le phénomène de vieillissement sous déformation peut avoir un impact direct sur la suffisance des caractéristiques mécaniques des soudures. Ainsi il recommande qu'EDF évalue, après avoir identifié les causes de ce phénomène (cf. recommandation n° 3), cette sensibilité pour le métal d'apport fil/flux mis en œuvre dans les passes de remplissage des soudures de traversée VVP à partir d'un programme d'essai établi aux limites des paramètres influents vis-à-vis du phénomène de vieillissement sous déformation.

6.3.4.4. Quantification du phénomène de vieillissement sous déformation

a) Méthodologie de quantification

EDF envisage de quantifier le décalage de la courbe de transition fragile-ductile dû au phénomène de vieillissement sous déformation de certains métaux d'apports (cf. paragraphe 4.1.5) sur la base des programmes d'essais détaillés dans les notes en référence [22] et [48] à [50].

EDF a prévu, à partir de maquettes de soudure et/ou d'assemblages témoins de soudage, de déterminer la courbe de transition en résilience du métal fondu dans un état de référence et un état vieilli. Ces deux courbes permettront alors d'évaluer le décalage lié au phénomène de vieillissement sous déformation. Ce protocole expérimental est décliné pour les différents produits d'apport.

La note en référence [22] précise que pour ces essais, c'est la situation réelle des soudures sur site du réacteur EPR de Flamanville qui est pris comme état de référence, c'est-à-dire une soudure détensionnée par un traitement thermique de 80 min à 590 °C. Pour chaque produit d'apport pour lequel un programme d'essais est prévu, il est prévu 24 éprouvettes de résilience en peau et 24 éprouvettes de résilience en racine (Figure 44). En complément, des essais de traction à 20 °C et 300 °C sont prévus sur des éprouvettes de traction prélevées en peau.

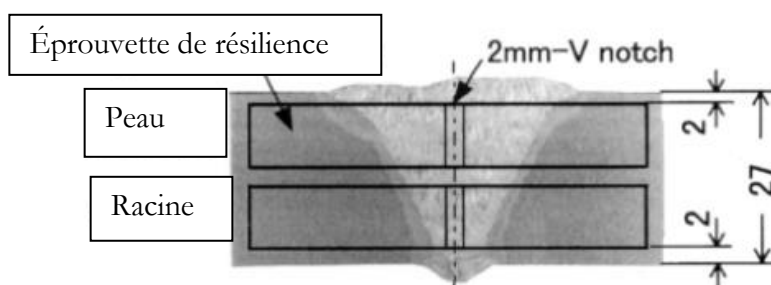


Figure 44 : Schéma d'un prélèvement d'éprouvettes de résilience en peau et racine de soudure

Dans ses programmes d'essais, EDF considère comme état vieilli un métal fondu détensionné par un traitement thermique de 80 min à 590 °C sur lequel une déformation de 5 % est appliquée suivi d'une sensibilisation de 30 minutes à 250 °C. La déformation de 5 % sera réalisée par un écrouissage en compression sur ébauche (bloc contenant plusieurs éprouvettes de résilience). Il est prévu 24 éprouvettes de résilience en peau et 24 éprouvettes de résilience en racine.

À l'issue des essais de résilience réalisés à des températures échelonnées, non précisées à priori par EDF, deux courbes de transition seront réalisées, permettant ainsi de caractériser le décalage de la courbe de transition fragile/ductile. Deux décalages seront déterminés, sans qu'EDF n'apporte de précisions sur leur traitement :

- le décalage entre la courbe de transition en peau à l'état de référence et la courbe de transition en peau à l'état vieilli ;
- le décalage entre la courbe de transition en racine à l'état de référence et la courbe de transition en racine à l'état vieilli.

b) *Avis du rapporteur sur la méthodologie de quantification du vieillissement sous déformation*

L'IRSN considère que la méthode proposée par EDF ne permet pas de caractériser le vieillissement sous déformation de manière conservative. Pour l'IRSN, le décalage de la courbe de transition fragile-ductile doit être obtenu entre un état « avant vieillissement » et un état « après vieillissement » du matériau, ces deux états étant définis comme suit :

- l'état « avant vieillissement » correspond à une zone ayant subi peu de déformation et passé peu de temps à haute température. Cette zone correspond à la partie de la soudure éloignée de la racine, à l'état brut de soudage non détensionné. La note d'EDF en référence [43] précise à cet égard que cet état n'est plus disponible sur les soudures VVP qui ont été détensionnées, ni sur leurs assemblages témoins. L'IRSN considère qu'en peau externe, l'effet du vieillissement sous déformation est faible et l'effet d'un traitement thermique de détensionnement reste limité. Ainsi, l'état avant vieillissement peut être étudié dans la partie supérieure des joints épais à l'état brut de soudage, ou à défaut à l'état détensionné ;
- l'état « après vieillissement » correspond à une soudure vieillie naturellement par les cycles thermiques de soudage puis détensionnée, et sur laquelle il y a eu création de dislocations par écrouissage puis diffusion des éléments interstitiels par un maintien à une température suffisante. L'état « après vieillissement » peut être considéré comme représentant l'effet total du vieillissement des soudures, puisque cet état intègre l'état du vieillissement « naturel » en cours de soudage complété par un vieillissement artificiel provoqué. Cet état peut être étudié au niveau de la racine de la soudure sur laquelle un vieillissement artificiel aura été appliqué.

Pour couvrir l'effet du vieillissement, il convient par conséquent de comparer les températures de transition entre l'état initial et l'état vieilli, c'est-à-dire entre la peau externe à l'état brut de soudage de préférence ou, à défaut, à l'état après traitement thermique de détensionnement, et la racine après un écrouissage et un maintien à 250 °C, et cela dans la même section de soudage.

EDF a, en réponse à cette considération de l'IRSN, précisé, dans son courrier en annexe 13, que le décalage des courbes de transition dû au vieillissement sous déformation doit être réalisé de manière indépendante en peau et en racine de la soudure car :

- les matériaux sont possiblement différents en peau et en racine de la soudure ;
- les états métallurgiques ne sont pas comparables (au moins en matière de géométrie de passes et d'écrouissage).

EDF précise, du fait d'un écrouissage lié aux opérations de soudage différent en peau et en racine (zone pour laquelle l'écrouissage est plus important), que les zones en peau et en racine des soudures, après traitement thermique de détensionnement, présentent un état initial vis-à-vis du vieillissement sous déformation différent. Il est donc important de caractériser l'impact du vieillissement sous déformation avec le même traitement de sensibilisation (avec un écrouissage très enveloppe des déformations attendues en service et une durée minimale de traitement thermique à 250 °C suffisante pour garantir une saturation des effets de vieillissement) dans ces deux zones afin d'en déduire l'effet maximum.

Ainsi, EDF considère que la méthode qu'il a proposée pour quantifier le décalage des courbes de transition dû au phénomène de vieillissement sous déformation en vue de la réalisation des calculs de rupture est pertinente et conservative.

Bien que le rapporteur ne remet pas en question le caractère enveloppe, en matière de déformations attendues en service, de la démarche proposée par EDF de détermination du décalage de la température de référence de transition fragile-ductile induit par le vieillissement sous déformation, il note néanmoins que la démarche reposant sur la comparaison de la courbe de résilience de l'assemblage soudé à l'état initial en peau à celle de l'assemblage soudé à l'état vieilli en racine dans la même section de soudage constitue une approche maximisante plus robuste.

Compte tenu des éléments relatifs à la méthode proposée par EDF pour quantifier les effets du vieillissement sous déformation, et notamment les éléments techniques issus de la note en EDF en référence [43], le rapporteur formule ainsi la recommandation suivante :

Recommandation n° 5

Le rapporteur recommande qu'EDF détermine le décalage de la température de référence de transition fragile-ductile induit par le vieillissement sous déformation en comparant la courbe de résilience de l'assemblage soudé à l'état initial en peau à celle de l'assemblage soudé à l'état vieilli en racine dans la même section de soudage.

Quant à l'indicateur retenu pour estimer le décalage de température de transition, EDF a également précisé, dans son courrier en annexe 13, qu'il retiendrait l'indicateur conduisant au résultat le plus sévère entre T_{K7}^{23} , T_{K28}^{24} , $T_{K0,9}^{25}$.

Enfin l'IRSN considère que les éprouvettes comparant les deux états doivent être prélevées dans la même section ou si cela n'est pas possible, dans la même « longueur soudée » afin que les résultats ne soient pas biaisés par un éventuel effet de prélèvement lié aux positions de soudage qui varient constamment autour des soudures réalisées.

²³ T_{K7} : température pour laquelle la courbe de transition de l'énergie moyenne de rupture rencontre une énergie de 56 J.

²⁴ T_{K28} : température pour laquelle la courbe de transition de l'énergie moyenne de rupture rencontre une énergie de 28 J.

²⁵ $T_{K0,9}$: température pour laquelle la courbe de transition l'expansion latérale rencontre la valeur 0,9 mm.

La démarche pour établir le plan de prélèvement proposée par EDF dans son courrier en annexe 13, devra tenir compte de cet aspect pour garantir une quantification appropriée du phénomène de vieillissement. À ce stade, seul le plan de prélèvement pour l'électrode enrobée Univers 2M est disponible et répond bien à la remarque de l'IRSN.

c) Programme de quantification du vieillissement sous déformation du matériau d'apport EMK35Cr

EDF a décliné la méthodologie détaillée au point précédent pour le produit d'apport EMK35Cr mis en œuvre avec le procédé TIG manuel pour les passes de racine et de soutien des traversées VVP.

Dans sa note en référence [22], EDF estime nécessaire de quantifier le vieillissement sous déformation du métal d'apport EMK35Cr.

A ce stade de l'instruction, EDF n'a pas émis de spécification relative aux essais prévus pour caractériser ce phénomène sur le métal d'apport EMK35Cr.

6.3.5. Atteinte des caractéristiques de compacité attendues

Comme évoqué précédemment dans le présent chapitre, la rupture brutale intervient lorsqu'il y a concomitance des trois paramètres suivants : des caractéristiques mécaniques du matériau insuffisantes, la présence de défauts de compacité ainsi que la présence de chargements thermomécaniques sollicitants.

La partie précédente a abordé la question des programmes d'essais mécaniques visant à apporter une confiance dans l'atteinte de caractéristiques mécaniques suffisantes.

Une autre ligne de défense pour prévenir le risque de rupture brutale consiste donc à garantir l'absence de défauts de compacité préjudiciables. Les paragraphes suivants détaillent donc les éléments apportés par l'exploitant pour garantir avec une haute confiance la bonne compacité des matériaux et l'analyse qu'en fait le rapporteur.

6.3.5.1. Rappel des exigences réglementaires

Elles figurent au paragraphe 3.3.

6.3.5.2. Exigences du code RCC-M

Contrôles de fabrication requis par le code RCC-M pour les soudures de traversée :

A l'issue de ces fabrications, des contrôles de fin de fabrication ont été réalisés, tels que requis par le code RCC-M au paragraphe S 7710. Les différents types de contrôles non destructifs mis en œuvre ont été les suivants :

- ressuage (ou magnétoscopie) pour les contrôles de surface ;
- la radiographie et les ultrasons pour les contrôles volumiques.

Critères de fabrication définis par le code RCC-M pour les soudures de traversée :

Le chapitre S 7714 du code RCC-M définit pour les ESPN de niveau N1 les défauts inacceptables dont l'élimination est exigée par le code. Concernant les contrôles par radiographie et par ultrasons, le code RCC-M considère comme inacceptables les défauts suivants :

- toute fissure, crique, manque de fusion (collage), manque de pénétration et morsure ;
- toute soufflure dont la plus grande dimension est supérieure à 3 mm ;
- toute inclusion isolée dont la plus grande dimension est supérieure à $e/3$ (e étant l'épaisseur de la pièce).

En outre le code RCC-M définit des critères de regroupement des soufflures et inclusions.

6.3.5.3. Exigences complémentaires spécifiques au référentiel d'exclusion de rupture

Sur la base du rapport en référence [1], la démarche d'exclusion de rupture a fait l'objet d'un avis de la Section permanente nucléaire (SPN) de la Commission centrale des appareils à pression le 21 juin 2005 et d'une lettre de suite en référence [2].

Le rapporteur de la SPN mentionne dans le rapport en référence [1] :

« Si la qualité de conception et fabrication peuvent globalement être acquises par l'application de codes habituels, la garantie de la qualité de la conception et de la fabrication, ainsi que le suivi en service, doivent être renforcés afin de rendre improbables d'une part l'apparition d'un défaut rédhibitoire et d'autre part son absence de détection à temps ».

6.3.5.4. Dossier défauts inacceptables

L'arrêté en référence [11] impose que le fabricant d'ESPN spécifie les défauts qu'il considère comme inacceptables au regard de la maîtrise de ses procédés de fabrication.

Ces défauts ne sont pas définis vis-à-vis des risques de défaillances et constituent davantage des indicateurs d'une qualité de fabrication. Le fabricant doit être en mesure de démontrer qu'il est capable de les détecter. La détection de tels défauts témoignerait alors d'une absence de maîtrise des procédés de fabrication qui doit conduire le fabricant à s'interroger sur la nécessité de réparer ou rebuter la pièce.

Concernant les soudures de traversée VVP, le dossier dit « défauts inacceptables » en référence [51] a été établi par le fabricant concernant le procédé de soudage fil/flux.

Dans ce dossier, le fabricant décline une méthodologie d'évaluation en 5 étapes utilisée pour les ESPN de niveau N1 de l'EPR de Flamanville :

- étape n° 1 : identifier les défauts susceptibles d'apparaître en fonction des procédés de soudage mis en œuvre ;
- étape n° 2 : identifier les précautions à prendre pour éliminer la cause d'apparition de ces défauts, accompagné du retour d'expérience existant sur l'efficacité de ces précautions ; il en résulte une liste de défauts résiduels pouvant apparaître malgré la mise en place de ces précautions, ce qui pourrait traduire un incident de fabrication ou une dérive des procédés ;
- étape n° 3 : définir et justifier pour chacun de ces défauts résiduels des bornes qualitatives (nombre, nature) et quantitatives (dimensions) au-delà desquelles ces défauts sont considérés comme inacceptables ;
- étape n° 4 : identifier pour chaque défaut inacceptable un procédé de contrôle non destructif pour le détecter, et dont le seuil de détection est compatible avec les bornes identifiées à l'étape n° 3 ; vérifier que les contrôles non destructifs requis par le référentiel technique (code RCC-M et spécifications d'équipement) sont suffisants pour la détection de ces défauts inacceptables ;
- étape n° 5 : si, à l'issue de l'étape n° 4, l'analyse montre que les contrôles non destructifs prévus par le référentiel technique ne sont pas suffisants, des contrôles ou mesures complémentaires (par exemple contrôles en service ou des justifications par des calculs vis-à-vis de l'intégrité du composant) seront identifiées.

A l'issue de cette analyse, le fabricant a précisé la liste des défauts résiduels qui pourraient apparaître malgré les précautions mises en œuvre (étape n° 2) :

- des cavités (soufflures et piqûres) ;
- des inclusions solides ;
- des manques de fusion.

La définition des caractéristiques « inacceptables » de ces défauts est donnée au Tableau 14. Celle-ci résulte du jugement des ingénieurs et techniciens soudeurs du fabricant et du retour d'expérience de la mise en œuvre des procédés de soudage à l'arc avec électrode réfractaire (141) et à l'arc sous flux avec fil (121).



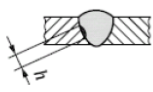
Type	Description	Caractéristiques	Définition quantitative et qualitative	
			Procédé TIG	Procédé Fil/Flux
Cavités	Soufflures		50 soufflures / piqûres de diamètre 4 mm sur la circonférence de la soudure. 10 soufflures / piqûres de diamètre > 4 mm sur la circonférence de la soudure.	
	Piqûres			
Inclusions	Débouchantes		5 inclusions de plus de 20 mm	
	Dans le volume			
Manque de fusion	Collage		5 manques de fusion de dimension égale à une hauteur de passe, de plus de 10 mm de long sur la circonférence de la soudure. Longueur cumulée de plus de ¼ de la circonférence, avec une hauteur égale à une hauteur de passe. (Nota : les défauts plans de type collage non débouchant et parallèles aux peaux sont acceptables).	

Tableau 14 : Définition des défauts inacceptables

6.3.5.5. Comparaison des critères définis dans le code RCC-M et ceux figurant dans le dossier « défauts inacceptables » du fabricant

Le fabricant a ensuite identifié les procédés de contrôles non destructifs capables de détecter les défauts considérés comme inacceptables au regard de la maîtrise des procédés de fabrication, en cours et en fin de fabrication, puis a comparé les caractéristiques de ces défauts inacceptables avec les critères de rejet précisés dans le code RCC-M pour ces procédés (Tableau 15).

Description	Caractéristiques des défauts inacceptables		Méthode CND	Seuil de détection	Critère de rejet du référentiel technique
	Procédé 121	Procédé 141			
Cavités Soufflures	50 soufflures / piqûres de diamètre 4 mm sur la circonférence de la soudure. 10 soufflures / piqûres de diamètre > 4 mm sur la circonférence de la soudure.		Radiographie	Défaut volumique ≥ 1 mm	Toute soufflure si sa plus grande dimension est supérieure à 3mm. Tout alignement (ou nid) de soufflures dont la somme des diamètres n'excède pas l'épaisseur, sur une longueur égale à 150 mm.
Cavités Piqûres			Ressuage	Défaut ≥ 1 mm	Les indications linéaires, Les indications arrondies dont la plus grande dimension est > 4 mm, Les indications alignées au nombre de 3 ou plus, distantes entre elles de moins de 3 mm bord à bord, Les indications groupées au nombre de 5 ou plus sur une surface rectangulaire de 100 cm ² choisie de façon la plus défavorable par rapport aux indications, sans que sa plus grande dimension ne dépasse 20 cm.
Inclusions	5 inclusions de plus de 20 mm		Ressuage	Défaut ≥ 1 mm	Les indications linéaires, Les indications arrondies dont la plus grande dimension est > 4 mm, Les indications alignées au nombre de 3 ou plus, distantes entre elles de moins de 3 mm bord à bord, Les indications groupées au nombre de 5 ou plus sur une surface rectangulaire de 100 cm ² choisie de façon la plus défavorable par rapport aux indications, sans que sa plus grande dimension ne dépasse 20 cm.
			Radiographie	Défaut volumique ≥ 1 mm	Toute inclusion isolée si sa plus grande dimension (l) est supérieure à 20mm. Tout groupement d'inclusions dont la somme des longueurs est supérieure à l'épaisseur sur une longueur égale à 12 fois l'épaisseur.
Manque de fusion	5 manques de fusion de dimension égale à une hauteur de passe, de plus de 10 mm de long sur la circonférence de la soudure. Longueur cumulée de plus de ¼ de la circonférence, avec une hauteur égale à une hauteur de passe.		Ressuage	Défaut ≥ 1 mm	Les indications linéaires
			Radiographie	Défaut plan hauteur ≥ 3 mm	Tout défaut plan.

Tableau 15 : Comparaison entre les caractéristiques des défauts inacceptables et les critères de rejet du référentiel technique pour les procédés de contrôles non destructifs mis en œuvre en fabrication

Position du rapporteur

Le rapporteur constate que, pour tous ces défauts, les critères de rejet du code RCC-M sont plus sévères que ceux identifiés par le fabricant dans son dossier « défauts inacceptables », et que le fabricant considère, en lien avec les performances des contrôles non destructifs qu'il a définies, que les procédés de contrôles non destructifs par radiographie et ressuage sont suffisants à eux seuls pour détecter les défauts qu'il a identifiés comme inacceptables.

Toutefois le rapporteur note que, pour les défauts non volumiques du type « manque de fusion », les orientations et profondeur des défauts ne sont pas définies par le fabricant, et que le code RCC-M ne précise pas non plus de dimensions pour ces défauts.

6.3.5.6. Recontrôles des soudures de traversée VVP

Historique

Comme précisé dans le chapitre 2, les soudures de traversée VVP ont été réalisées entre octobre 2012 et mars 2014 à Nancy dans les ateliers de la société Nordon, sous-traitant du fabricant Framatome. Les résultats des contrôles de fin de fabrication ont tous été déclarés conformes au code RCC-M par le fabricant.

Ces tronçons de tuyauteries ont ensuite été transportés sur le site du réacteur EPR de Flamanville puis raccordées aux autres tronçons des lignes VVP.

Lors des premiers essais non destructifs par ultrasons réalisés en mars 2018 dans le cadre de la visite complète initiale, EDF a constaté que des indications avaient été mises en évidence dans certaines soudures du circuit ARE alors que les contrôles de fin de fabrication étaient conformes. Ceci a conduit EDF à déclarer l'évènement significatif en référence [23], à en analyser les causes dans le document en référence [24], et a considéré que cet évènement pouvait aussi remettre en cause la confiance accordée aux résultats des contrôles non destructifs de fin de fabrication réalisés sur les soudures des lignes VVP.

Sur la base d'une analyse des facteurs organisationnels et humains, EDF a identifié cinq familles de causes relatives :

- à la préparation des contrôles ;
- à l'exécution des contrôles ;
- à l'enregistrement documentaire de la mise en œuvre et de l'exploitation des données acquises lors des contrôles ;
- au contrôle réalisé par Framatome sur ses sous-traitants ;
- à la surveillance réalisée par EDF sur Framatome et ses sous-traitants.

Il apparaît donc que ces causes traduisent des anomalies de nature organisationnelle, technique et documentaire.

Ce constat de contrôles de fin de fabrication défailants a conduit EDF à mettre en œuvre un plan d'actions, comportant notamment la mise en place d'un programme de recontrôles avec une surveillance renforcée, ainsi que de contrôles contradictoires réalisés par EDF, destinés à lever le doute sur la qualité des contrôles de fin de fabrication.

Il peut être noté que, conformément à la demande de l'ASN formulée dans son courrier en référence [6], ce plan d'actions a été étendu à d'autres soudures. Outre le fait que cette extension permet en premier lieu de vérifier la bonne réalisation des contrôles sur d'autres soudures que celles des circuits secondaires principaux, cette extension du périmètre des recontrôles permet également de vérifier sur un plus grand périmètre le niveau de maîtrise de la mise en œuvre de ce type de recontrôles sur le site du réacteur EPR de Flamanville.

Ce programme est détaillé par EDF dans le document en référence [55][54]. Il concerne :

- la relecture des films de contrôles par radiographie sur des soudures de niveau N1, dont les huit soudures de traversée ;
- la réalisation de recontrôles par ressuage par le fabricant et de contrôles contradictoires sous la responsabilité d'EDF sur un échantillon des soudures de niveau N1 avec les mêmes procédures qu'en fin de fabrication. Dans son courrier en annexe 13, EDF indique que les soudures de traversée n'ont pas fait l'objet de recontrôles ;
- la réalisation de recontrôles par ultrasons sur l'ensemble des soudures des lignes VVP en exclusion de rupture. Ce programme de recontrôles par ultrasons a été piloté par EDF avec des procédures identiques ou similaires à celles utilisées en fin de fabrication.

Comparaison des contrôles ultrasons mis en œuvre en fin de fabrication et lors des recontrôles

Le raccordement des tronçons de traversée préfabriqués en atelier avec le reste des lignes VVP a restreint l'accessibilité depuis la surface extérieure des tuyauteries, ne permettant alors plus d'utiliser la procédure de contrôle manuel utilisée en atelier, en référence [52].

EDF a alors décidé de mettre en œuvre pour les recontrôles sur site la procédure en référence [74] prévue pour la visite complète initiale et le suivi en service. Elle consiste en un examen utilisant un porteur mécanisé pour le déplacement des capteurs et une chaîne informatisée d'acquisition et de traitement des données. Cette procédure a été complétée par deux avis techniques de la direction industrielle d'EDF en référence [57] et [58], qui précisent notamment les conditions d'acquisition et de traitement des données de manière à les rendre similaires à celles de la procédure de contrôles de fin de fabrication en atelier en référence [52].

D'un point de vue matériel, deux différences principales peuvent être notées entre ces deux procédures.

D'une part, le déplacement mécanisé des capteurs de la procédure de recontrôle permet de garantir et assurer une traçabilité du respect des paramètres de déplacement (étendue et vitesse). La position des capteurs étant enregistrée en continu, la localisation des indications est plus fiable qu'avec un déplacement manuel des traducteurs. *A contrario*, en cas de détection d'une indication avec la procédure manuelle, il est possible pour l'opérateur d'optimiser la position du capteur vis-à-vis de l'indication pour atteindre l'amplitude maximale d'un écho, ce qui n'est pas le cas pour un contrôle mécanisé pour lequel la configuration géométrique est figée.

D'autre part, lors des recontrôles avec la procédure automatique, l'ensemble des formes d'ondes est enregistré. Les paramètres de dépouillement sont ensuite appliqués de manière automatisée, ce qui rend cette phase plus fiable et reproductible que l'interprétation par un opérateur humain effectuée dans le cadre des contrôles manuels en atelier. Pour le procédé automatique, cette phase d'analyse peut être complétée par des expertises complémentaires à partir des mêmes données brutes, en cas de présence d'une indication.

Malgré ces différences, le rapporteur constate que les principaux paramètres de contrôles suivants sont identiques ou similaires :

- caractéristiques physiques des capteurs (fréquence, diamètre, angle de réfraction) ;
- niveau de référence provenant d'un trou de 2 mm de diamètre vu suivant la génératrice ;
- critère de notation à 6 dB sous le niveau de référence (la procédure initiale de recontrôle prévoyait un seuil à 12 dB sous la référence, mais celui-ci a été ramené à 6 dB, sur recommandation de l'avis technique en référence [58], afin de faciliter la comparaison entre les 2 contrôles) ;
- méthode de dimensionnement par la chute à -6 dB ;
- classification du défaut en fonction de son caractère volumique ou non volumique suivant une procédure en « cascade » ;
- critères de classement pour les défauts inacceptables au titre du code RCC-M.

La procédure utilisée en atelier a fait l'objet d'un avis d'EDF en référence [59] ne faisant pas état de remarques majeures vis-à-vis du code RCC-M version 2007. L'évaluation par le rapporteur des performances de la procédure utilisée pour les recontrôles fait l'objet du paragraphe 6.3.5.9.

Position du rapporteur sur la comparaison entre les deux procédures

Le rapporteur considère que les paramètres de contrôle de ces deux procédures sont suffisamment similaires pour qu'une comparaison des résultats puisse être menée.

A noter qu'EDF considère, dans son courrier en annexe 13, que les résultats obtenus lors des recontrôles sur les soudures de traversée donnent confiance sur la qualité des contrôles mis en œuvre en usine, étant donné qu'une seule indication de faible dimension non conforme a été identifiée lors des recontrôles sans avoir été détectée lors des contrôles en usine.

Le rapporteur souligne que cet argument, qui appuie certes la justification de la comparabilité des deux procédés, n'apporte en revanche aucune confiance supplémentaire dans les contrôles mis en œuvre en usine, tant que les justifications des performances des contrôles et donc de la garantie de détection des indications de faibles dimensions, objets des recommandations n° 6 et 7 au paragraphe 6.3.5.9, n'auront pas été apportées.

Résultats du programme de recontrôle

L'avancement de ce programme de recontrôle a été transmis à l'ASN par les courriers en références [88] et [99]. Les résultats obtenus sont les suivants :

- en ce qui concerne le ressuage, sur le périmètre élargi à d'autres soudures que celles des circuits secondaires principaux (soit au total 566 recontrôles effectués en ressuage), un seul écart concernant une soudure du circuit RPE a été constaté et est en cours de traitement par une fiche de non-conformité ;
- en ce qui concerne la relecture des films radiographiques des soudures de traversée, EDF indique que cette relecture n'a pas permis de retrouver l'indication détectée par ultrasons dans la soudure EPP6208TWM S1, ni de mettre en évidence d'autres indications. Par ailleurs la relecture des radiogrammes concernant- les autres soudures des circuits ARE et VVP a conclu à la non-conformité de certaines soudures alors que l'analyse initiale de ces mêmes radiogrammes en fin de fabrication avait conduit à leur conformité. Toutes ces soudures déclarées non conformes à la relecture des radiogrammes avaient néanmoins déjà été signalées non conformes à l'issue des recontrôles par ultrasons ;
- en ce qui concerne les contrôles contradictoires par ultrasons :
 - au total 101 indications ont été notées dans les huit soudures de traversée ;
 - compte tenu du seuil en amplitude défini dans la procédure à partir duquel les indications font l'objet d'une caractérisation plus poussée, quatre indications ont fait l'objet d'une telle caractérisation ;
 - parmi ces quatre indications, trois ont été caractérisées comme volumiques, avec des caractéristiques acceptables vis-à-vis des exigences du code RCC-M ;
 - une indication a été détectée et caractérisée comme non-volumique dans la soudure de traversée EPP6208TWM-S1 du train 2. La caractérisation et le traitement de cette indication sont précisés au paragraphe 7.2.

6.3.5.7. Démarche d'EDF pour justifier la conformité de la compacité des soudures

Dans son courrier en référence [7], EDF présente sa démarche de justification de la conformité des soudures de traversée VVP aux exigences prescrites par le décret d'autorisation de création du réacteur EPR de Flamanville en référence [8].

Concernant la compacité des soudures de traversée, EDF précise les éléments suivants :

- au paragraphe 3.2.1: « Pour chaque soudure, l'analyse réalisée devra permettre de statuer sur la compacité de la soudure et la conformité des caractéristiques mécaniques au référentiel applicable » ;
- aux paragraphes 3.2.2 et 3.3.2 : « La rédaction pour chaque soudure d'une fiche d'identité comprenant l'historique de sa fabrication, le résultat des contrôles réalisés pendant et en fin de fabrication, la liste des écarts constatés et l'avancement de leur traitement ; elle devra statuer sur la conformité de la compacité au référentiel applicable (réglementaire et exclusion de rupture) ».

Concernant l'indication détectée dans la soudure EPP6208TWM-S1 lors des recontrôles, EDF propose de compléter la démarche ci-dessus par deux actions supplémentaires :

- la justification du maintien en l'état de cette indication par des calculs de rupture brutale spécifiques ;
- l'ajout d'un contrôle par ressuage « à chaque arrêt simple pour rechargement au droit de l'indication existante afin de vérifier que le défaut reste non débouchant, ce qui conduit à suivre cette indication tous les arrêts par ultrasons en visite partielle et visite décennale ou par ressuage en arrêt simple pour rechargement ».

L'avis du rapporteur sur ce dernier point est donné au paragraphe 7.5.

Dans son courrier en référence [79] la division industrielle d'EDF a émis un avis concernant les contrôles non destructifs de fin de fabrication et les « exigences relevées par rapport à celles appliquées pour le parc en exploitation ». EDF liste, pour chacune des méthodes de contrôle non destructif mises en œuvre (ressuage, radiographie et ultrasons), les compléments au code RCC-M qui constituent pour EDF la justification de la recherche d'un haut niveau de confiance vis-à-vis de la compacité des soudures.

6.3.5.8. Evaluation de la performance des recontrôles ultrasons

Qualification de la procédure mise en œuvre lors des recontrôles ultrasons

La méthode de contrôle mise en œuvre lors des recontrôles des soudures de traversée est le procédé UT36 utilisé par EDF pour réaliser les contrôles prévus lors de la visite complète initiale et du suivi en service. Le procédé UT36 est complété par deux avis techniques de la direction industrielle d'EDF en référence [57] et [58] qui précisent les évolutions des conditions d'acquisition et de traitement des données. Ces évolutions permettent de rendre les critères d'acquisition et de traitement des données du procédé de contrôle mis en œuvre lors des recontrôles suffisamment proches de ceux utilisés lors des contrôles de fin de fabrication, sans notablement modifier les performances.

Conformément aux dispositions de l'article 8 de l'arrêté du 10 novembre 1999 en référence [94] concernant la qualification des procédés d'essais non destructifs utilisés par l'exploitant pour son suivi en service, le procédé UT36 initial a fait l'objet d'une procédure de qualification par la commission de qualification d'EDF, qui a émis l'attestation de qualification en référence [60]. Cette attestation liste les performances garanties dans le cadre de cette qualification. Il est notamment indiqué, concernant le seuil de notation, que le procédé garantit la détection d'une indication dont la réflectivité est au moins équivalente à celle d'un trou à fond plat de diamètre 7.1 mm (surface 39.6 mm²) orienté perpendiculairement à l'axe du faisceau ultrasonore. D'autres performances sont exclues du périmètre reconnu par la qualification. Il s'agit de :

- l'expression de la sensibilité au seuil de caractérisation ;
- la classification volumique / non volumique des indications ;
- la mesure de longueur et de hauteur des indications ;
- l'illustration des performances ;
- les performances du procédé dans les zones réparées ;
- le suivi des indications ;
- la discrimination entre indications parasites et défauts.

EDF a réalisé une synthèse de qualification en référence [61] présentant des éléments permettant de justifier certaines de ces performances, notamment la garantie que, toutes causes d'erreur ou de perturbation confondues, **le procédé permet la détection et le dimensionnement de défauts plans de dimensions 3 x 15 mm situés à proximité des parois internes ou externes. La détection et le dimensionnement de défauts de plus petites dimensions est possible, mais avec un niveau de confiance moindre.**

Saisine de l'IRSN sur les performances des recontrôles ultrasons

Dans la saisine en référence [62], l'ASN a sollicité l'appui de l'IRSN pour « *évaluer les performances des examens non destructifs par ultrasons réalisés à l'occasion de la reprise de ces contrôles sur les soudures des lignes VVP en exclusion de rupture* ».

Cette évaluation a conduit l'IRSN à assister à la mise en œuvre d'opérations de recontrôles ultrasons sur les traversées VVP et à relire les acquisitions de données enregistrées lors de ces recontrôles.

Dans ce cadre, l'IRSN a émis son avis en référence [63] qui conclut que la procédure mise en œuvre pour ces recontrôles contradictoires présente des avantages décisifs par rapport aux contrôles de fin de fabrication, notamment grâce à l'enregistrement de la totalité des informations (sans seuil) qui améliore la traçabilité et permet de mettre en œuvre *a posteriori* des traitements spécifiques complémentaires.

Toutefois l'IRSN a noté que certains paramètres de mise en œuvre de ces recontrôles pouvaient affecter leurs performances. Il s'agit de :

- la présence de peinture en paroi extérieure à proximité des soudures, dans une zone non autorisée par la procédure de mise en peinture en référence [80], et en dehors de l'état de surface attendu « surface d'exploration non revêtue » pris en compte dans la qualification du procédé UT36 en référence [61] ;
- la présence d'échos parasites provenant de l'état de surface interne (bourrelet de pénétration des soudures), de l'état de surface externe (cordon de soudure), et de la présence d'eau résiduelle en paroi interne.

Dans son courrier en référence [81], EDF a fourni des éléments de réponse concernant ces questions, et conclut à l'absence de risques de non-détection d'indications suite à ces constats.

EDF a également précisé sa position concernant l'impact sur les contrôles ultrasons des perturbations de surfaces externes dans le projet de position n° 11 de son courrier en annexe 13. EDF y indique que « *la surveillance lors de la mise en œuvre des UT des critères de suivi de l'insonification (écho de fond, bruit...) permet de s'affranchir des conséquences des perturbations de surfaces externes* » et que « *les modalités d'analyse de la procédure permettent de discriminer les échos de géométrie des éventuels échos de défaut* ».

Le rapporteur considère que, bien que ces éléments tendent à garantir l'absence de dégradation du couplage acoustique du capteur sur la surface et la distinction entre échos parasites de géométrie et véritables indications métallurgiques, ils ne permettent pas de garantir qu'une indication qui serait localisée dans le voisinage de cette perturbation géométrique pourrait être distinguée et correctement caractérisée.

Dans son courrier en référence [64], EDF a précisé sa position concernant l'absence de détection de l'indication dans la soudure de traversée EPP6208TWM-S1 lors des contrôles non destructifs ultrasonores de fin de fabrication. EDF précise que cette absence de détection peut s'expliquer par la reproductibilité de chacune des 2 procédures employées qui conduirait à ce que l'amplitude de l'écho puisse être dans un cas supérieure au seuil de notation (recontrôle), et dans l'autre cas inférieure au même seuil (contrôles de fin de fabrication). EDF en conclut que cet écart « *ne relève pas d'un écart d'interprétation de résultat lors de la mise en œuvre des CND initiaux.* ». En conséquence « *EDF maintient que ces (re)contrôles ont été réalisés au titre d'une surveillance et qu'ils n'ont pas vocation à être considérés comme contrôles de fin de fabrication.* »

6.3.5.9. Avis du rapporteur sur la compacité des soudures de traversée

Le rapporteur a examiné les éléments techniques mis en avant par EDF pour garantir la compacité de ces soudures, notamment au regard de ce qui peut être attendu au titre des exigences liées à la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création en référence [8] ainsi que par lettre de suite de la SPN de 2005 en référence [2].

i. Compacité des soudures au regard des exigences du code RCC-M

Les contrôles de compacité de fin de fabrication ont été réalisés par radiographie et ultrasons, respectivement selon les procédures en référence [52] et [53]. Les contrôles ultrasonores ont fait l'objet de contrôles contradictoires suivant la procédure en référence [74] modifiée par l'avis de la division industrielle d'EDF en référence [57]. Les procédures en référence [52] et [53] mettent en référence le code RCC-M pour ce qui concerne les paramètres de contrôles, de notation et d'acceptation. La procédure en référence [74] utilisée pour les recontrôles par ultrasons a fait l'objet d'une analyse par l'IRSN à l'occasion de la saisine en référence [62] de l'ASN. Dans son avis en référence [63], l'IRSN conclut à la conformité au code RCC-M de cette procédure modifiée.

Le référentiel technique définit les différents paramètres que les procédures de contrôles doivent satisfaire, mais également l'environnement dans lequel ces contrôles doivent être réalisés. Il est décrit notamment aux paragraphes MC 2141 et MC3141 du code RCC-M par :

- un bon état de surface (arasage, alignement des surfaces de part et d'autre des soudures) ;
- l'absence de dépôt adhérent en surface pour les ultrasons.

Comme indiqué au paragraphe précédent, l'IRSN a signalé dans son avis en en référence [63] la présence de zones recouvertes de peinture à proximité des soudures et d'irrégularités de surface en paroi interne et externe ayant entraîné la détection d'échos ultra sonores « parasites » et la présence d'eau résiduelle en paroi interne pour l'une des traversées ayant entraîné également la détection d'échos parasites. Certains de ces points avaient déjà fait l'objet de demandes dans le cadre de l'inspection de l'ASN du 10 avril 2018 en référence [75]. Les réponses d'EDF à l'ensemble de ces demandes sont toujours en cours d'instruction. Le rapporteur note que l'analyse de l'origine de ces échos parasites a fait l'objet d'expertises complémentaires au moyen d'autres contrôles ou d'expertise spécifique.

La conformité au code RCC-M des procédures de contrôles non destructifs utilisés en fin de fabrication n'appelle pas de remarque de la part du rapporteur. Toutefois il constate que certaines conditions de mise en œuvre de ces contrôles présentent des écarts au code RCC-M., comme par exemple la présence d'états de surface à proximité des soudures provoquant l'apparition d'échos parasites lors de la mise en œuvre des contrôles ultrasons.

ii. Compacité des soudures au regard des exigences réglementaires de l'arrêté ESPN

Conformément aux dispositions de l'arrêté ESPN en référence [11], le fabricant a rédigé un dossier dit « défauts inacceptables » en référence [51] découlant de son analyse des défauts résiduels pouvant subsister après la mise en œuvre de parades au stade de la fabrication et des contrôles non destructifs. Les défauts considérés comme inacceptables par le fabricant constituent alors un indicateur de la bonne maîtrise des procédés de fabrication mis en œuvre.

Le rapporteur note que les critères définis par le fabricant dans son dossier sont peu différents, voire moins contraignants que ceux définis par le code RCC-M, et que pour les défauts plans :

- les orientations et profondeur de ces défauts ne sont pas définies par le fabricant ;
- le fabricant affirme, en lien avec les performances des contrôles non destructifs qu'il a définies, que les procédés de radiographie et de ressuage sont suffisants à eux seuls pour détecter les défauts qu'il a identifiés comme inacceptables.

EDF indique dans son document en annexe 13 que :

« Pour les défauts plan, nocifs vis-à-vis du risque de rupture brutale, il est utile de noter que le dossier défauts inacceptables pour les traversées (note Framatome D02-ARV-01-128-589 rév. B – défauts inacceptables Tuyauteries secondaires Carbone – Traversée d'enceinte) s'appuie sur les contrôles radiographiques et les contrôles US onde droite 0° pour détecter une dérive de fabrication. Les contrôles radiographiques permettent de détecter les défauts plan en bord de chanfrein et les contrôles US onde droite 0°, permettent de détecter les défauts plan entre passe typiquement d'orientation privilégiée parallèle à la peau ».

Le rapporteur considère que la mise en œuvre de contrôles ultrasons en OL0° ne permet pas de détecter avec un haut niveau de confiance des manques de pénétration en bord de chanfrein qui ne seraient pas parallèles à la peau, ce qui est d'ailleurs le cas de l'indication détectée en OT45° dans la soudure EPP6208TWM S1.

Le rapporteur note qu'à ce stade, l'analyse menée par EDF concerne la mise en œuvre de ces contrôles mais ne se prononce pas sur leur adéquation avec les exigences applicables, en termes d'objectifs et de capacité à détecter de manière fiable des défauts jugés inacceptables par le fabricant et le code RCC-M. Ainsi, le rapporteur considère que la justification des performances réelles des procédures ultrasons employées lors des contrôles de fin de fabrication reste à fournir. A cet égard, le rapporteur considère que la comparaison entre les résultats des contrôles de fabrication et les caractéristiques des indications tel qu'obtenues lors des affouillements, lorsqu'une réparation a été jugée nécessaire, apporterait une information utile.

A la suite de la découverte par EDF d'écarts concernant les résultats des contrôles de fin de fabrication des soudures réalisées sur site (cf. paragraphe 4.2.9), EDF a mis en œuvre un programme de recontrôles décrit dans son document en référence [55] concernant les soudures de traversée, les soudures réalisées sur site mais également d'autres soudures présentant des analogies avec celles des lignes VVP.

Le rapporteur note qu'il n'y a pas eu de recontrôle par ressuage sur site et qu'en conséquence EDF n'apporte pas toutes les garanties de la bonne mise œuvre de ces contrôles en atelier.

A contrario, EDF indique, dans ses documents en références [56] et [89], que la relecture des radiogrammes a conduit à classer « non-conformes » des soudures réalisées sur site pour lesquelles l'exploitation initiale de ces radiogrammes en fin de fabrication avait conclu sur leur conformité.

Bien que ce constat ne concerne pas directement les soudures de traversée, le rapporteur considère qu'il interroge sur le niveau de confiance dans la compacité des soudures que ces contrôles par radiographie permettent d'acquérir.

Concernant les contrôles par ultrasons, à l'origine du déclenchement de ce programme de recontrôles, le rapporteur a examiné l'analyse faite par EDF des résultats obtenus, ainsi que la justification de leur cohérence avec l'ensemble des exigences décrites au chapitre 3.

Le rapporteur note que les contrôles ultrasons de fin de fabrication, basés sur une procédure manuelle et les critères du RCC-M, n'apportent pas les mêmes garanties que celles apportées par le dossier de qualification de la procédure de recontrôle basée sur le procédé automatique UT 36, notamment parce que les performances chiffrées n'ont pas été établies pour la procédure manuelle.

En ce sens, le rapporteur considère que les recontrôles basés sur le procédé automatique apportent une meilleure confiance dans la détection des défauts par rapport aux contrôles manuels de fin de fabrication.

Concernant les défauts de type « manque de fusion », les caractéristiques identifiées comme « inacceptables » par le fabricant dans le document [51] sont :

- la présence de plus de cinq défauts d'une longueur unitaire supérieure à 10 mm ;
- une hauteur supérieure à une passe de soudure, soit 2 à 3 mm ;
- une longueur cumulée de tous les défauts détectés supérieure à 25 % de la circonférence de la soudure.

Le rapporteur constate que ces dimensions sont inférieures à celles figurant dans le dossier de qualification du procédé UT36 mis en œuvre pour les recontrôles (détection garantie d'un défaut plan de 3 x 15 mm). La détection et le dimensionnement de défauts de plus petites dimensions restent possibles, mais avec un niveau de confiance amoindri.

Le rapporteur note que le fabricant ne valorise que les contrôles par radiographie et par ressuage et donc pas les contrôles par ultrasons dans son dossier « défauts inacceptables » pour la détection de ces derniers. Cependant les contrôles par radiographie n'ont pas permis de détecter en fin de fabrication l'ensemble des défauts inacceptables sur les soudures réalisées sur site. Le rapporteur considère donc que les contrôles par ultrasons mis en œuvre en fin de fabrication doivent également contribuer à la détection des défauts considérés comme « inacceptables » par le fabricant, notamment les défauts non-volumiques qui ne sont pas parallèles à la paroi, et que le dossier « défauts inacceptables » en référence [51] doit être modifié en conséquence.

Etant donné que la procédure de contrôle ultrasons de fin de fabrication apporte moins de confiance dans la détection des défauts que celle employée pour les recontrôles et que pour cette dernière la détection et le dimensionnement de défauts d'une taille considérée comme inacceptable ne sont pas garantis, le rapporteur considère que la capacité de la procédure de contrôle ultrasons mis en œuvre en fin de fabrication à détecter un défaut inacceptable n'est pas acquise.

Sur ce point, EDF a depuis exprimé sa position au point 3 du projet de position n° 10 figurant dans le courrier en annexe 13 : « *La cible de détection pour ces contrôles renforcés, pour les défauts plans, est calée sur la taille des défauts définis dans le dossier défaut inacceptable, soit hauteur 3 mm, longueur 10 mm* ». Dans le même document, EDF s'est engagé, dans son projet d'action n° 10, à « [vérifier] que les défauts détectés par les moyens de contrôles US mis en œuvre lors des recontrôles et qui n'auraient pas été détectés par les radios ou les contrôles US OLO° ne rentrent pas dans la catégorie des défauts inacceptables définies à l'étape 3 [du dossier défauts inacceptable]. ».

Le rapporteur constate que ces éléments de réponse ne concernent pas la radiographie, et ne décrivent pas les moyens ni les méthodes qui seront mis en œuvre pour justifier ces performances.

En conséquence, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 6

Le rapporteur recommande qu'EDF justifie que les procédés de contrôle non destructifs volumiques (par radiographie et par ultrasons), ont la capacité de détecter et d'identifier les indications possédant les caractéristiques définies par le fabricant pour les défauts inacceptables, et que le dossier « défauts inacceptables » du fabricant mentionne la mise en œuvre de contrôles ultrasons pour la détection de défauts non-volumiques non-parallèles à la paroi.

iii. Compacité des soudures au regard du haut niveau de confiance attendu pour des soudures en exclusion de rupture

Dans ce paragraphe, le rapporteur évalue le niveau de confiance que la mise en œuvre de ces contrôles non destructifs permet d'acquérir quant à la qualité de réalisation de ces soudures.

Dans son document en référence [71], EDF justifie que « *des exigences renforcées ont été prises en compte pour les soudures classées en exclusion de rupture, permettant ainsi d'aboutir à un haut niveau de confiance vis-à-vis de la compacité des soudures concernées* ». Ces exigences consistent en :

- l'arasage de l'ensemble des soudures en paroi externe et également en paroi interne (lorsque la cinématique de montage le permet)
- la relecture de 100 % des radiogrammes réalisés ;
- s'agissant des paramètres des contrôles ultrasonores :
 - l'abaissement du seuil de notation à 12 dB sous le niveau de référence alors que celui requis par le RCC-M est de 6dB sous le niveau de référence;
 - l'utilisation de deux angles de réfraction en ondes transversales espacés d'au moins 15° ;
 - la réduction de la zone morte en paroi externe par l'utilisation de capteurs bi-éléments ;
 - l'arasage des soudures ;
- la surveillance renforcée d'EDF lors des recontrôles ;
- la vérification des performances réelles en comparant les résultats de ces recontrôles (détection et caractéristiques des indications) avec celles obtenues lors d'affouillements pour réparation. Pour les soudures de traversée, ce point concerne les réparations qui auraient été réalisées en atelier à la suite de la détection d'indications inacceptables avec la procédure ultrasons en référence [52].

Le rapporteur note qu'EDF associe à ce « *haut niveau de confiance* » des « *exigences renforcées* » destinées à :

- améliorer les performances intrinsèques de ces contrôles par rapport aux requis du code ;
- améliorer la confiance dans la mise en œuvre de ces contrôles.

Toutefois, le rapporteur note qu'une partie de ces exigences renforcées n'apparaissent pas comme significativement différentes de celles déjà requises par le code RCC-M.

Ainsi, par exemple :

- s'agissant des contrôles par ressuage, les exigences prévues par EDF sont identiques à celles prévues par le paragraphe MC4000 du code RCC-M ;
- s'agissant des contrôles par radiographie, l'arasage des soudures est requis par le paragraphe MC 3141 du RCC-M ;
- s'agissant des contrôles par ultrasons :
 - l'utilisation de deux angles de réfractions en ondes transversales espacés d'au moins 15° est requise par le paragraphe S 2634 du code RCC-M ;
 - l'arasage des soudures est déjà requis par le MC 2141 du code RCC-M ;

EDF a transmis, dans son document en référence [90], une comparaison des résultats des caractéristiques d'indications détectées lors des contrôles par ultrasons avec celles obtenues lors des affouillements dirigés correspondants. Cette comparaison porte au total sur six indications (quatre non volumiques et deux volumiques) des circuits VVP et ARE.

Le rapporteur note que la correspondance est satisfaisante concernant les informations de position. Concernant la longueur des indications, le rapporteur note que, pour les indications non volumiques, la comparaison entre affouillements et contrôles ultrasons pour une longueur de défaut comparable avec celle définie dans le dossier « défauts inacceptables » en référence [51] ne porte que sur un seul cas de longueur 14 mm²⁶. En conséquence, le rapporteur considère qu'il est nécessaire qu'EDF complète ce type de comparaison lors des affouillements qui seront réalisés pour les réparations à venir.

Le rapporteur note l'engagement d'EDF pris dans son projet de position n° 11 figurant dans son courrier en en annexe 13 qui précise que « [...] *des affouillements dirigés, sur des indications choisies des soudures site, pourront être réalisés pour compléter le dossier d'illustration des performances UT* ». Le rapporteur souligne que cette action est nécessaire et non pas facultative, et que ces indications choisies devront encadrer, dans la mesure où les affouillements réalisables le permettraient, les dimensions et caractéristiques (position et nature) des indications définies dans le dossier « défauts inacceptables ».

²⁶ Cette comparaison a montré une bonne correspondance en termes de longueur d'indication.

Par ailleurs, le rapporteur constate que certaines soudures de traversée ont fait l'objet de plusieurs réparations en cours de fabrication (cf. paragraphe 4.1.7.1). Le rapporteur s'interroge sur les conséquences de ces réparations (réparations dans la même zone, microstructure, ...) sur les performances des contrôles, notamment par ultrasons. A cet égard, EDF indique dans son projet de position n° 11 de son courrier en annexe 13 que « *le RCC M n'introduit pas de distinction entre les zones soudées réparées ou non. En effet, le métal fondu de l'acier ferritique est réputé homogène, isotrope et aucun effet particulier (atténuation, bruit...) n'a pas été relevé lors de la mise en œuvre des recontrôles ce qui confirme la bonne contrôlabilité de ces zones.* ». Le rapporteur considère que ces informations sont de nature à justifier l'absence de perturbations des contrôles ultrasons dans les zones réparées de ces soudures.

Le rapporteur constate également que, lors de la relecture des radiogrammes obtenus lors des contrôles des soudures réalisées sur site, une partie de ces soudures ont été déclarées non-conformes alors que le PV initial statuait sur un état conforme. Bien que la mise en œuvre de ces contrôles ait été réalisée dans un contexte différent (lieu, équipes), ce point interroge sur le niveau de confiance qu'il est possible d'attribuer à la lecture des films radiographiques vis-à-vis des exigences applicables.

S'agissant de la surveillance renforcée, le rapporteur constate qu'elle ne concerne que les contrôles ultrasonores qui ont fait l'objet de recontrôles avec une surveillance effectivement renforcée. En particulier il n'a pas été réalisé de nouveaux tirs radiographiques et EDF ne peut donc pas valoriser de surveillance renforcée pour accroître la confiance dans les conditions de mise en œuvre des contrôles par radiographie (paramètres de tir, position de la source, etc.).

Enfin, comme indiqué au paragraphe 4.1.6.1, les contrôles non destructifs (ultrasons et radiographie) de fin de fabrication avaient conclu initialement à la conformité de ces soudures. Une indication non volumique correspondant à un défaut de compacité a cependant été détectée dans la soudure EPP62808TWM-S1 lors des recontrôles par ultrasons, ce qui remet en cause la fiabilité des résultats des contrôles initiaux. Le rapporteur note qu'EDF s'est engagée, au point 3 du projet de position n° 10 de son courrier en annexe 13, à ce que ces recontrôles renforcés soient valorisés pour apporter les garanties de compacité dans le cadre du dossier de justification des traversées.

Le rapporteur note qu'EDF indique, dans son projet de position n° 11 du même courrier, que le haut niveau de confiance dans les résultats des contrôles par radiographie apporté par la relecture des radiogrammes provient des vérifications suivantes :

- *« la densité, la qualité d'image IQI ;*
- *la couverture de zone soumise à examen ;*
- *la présence d'indications notables. »*

Le rapporteur estime que ces vérifications permettent de justifier en partie la bonne mise en œuvre de ces contrôles, mais ne permettent pas de garantir que les performances de ces contrôles sont adaptées aux caractéristiques des défauts considérés comme « inacceptables » par le fabricant au regard de la maîtrise de ses procédés de fabrication, notamment compte tenu de leur inclinaison.

Le rapporteur note qu'EDF s'engage, dans son projet d'action n° 11 du courrier en annexe 13, à « *compléter le dossier d'illustration des procédés END UT30 et UT36 afin d'y apporter des éléments permettant de revendiquer que les défauts inacceptables retenus par le fabricant sont couverts. Ces illustrations, s'appuieront sur des simulations numériques CIVA et des essais de performances sur maquettes contenant des défauts. Ces compléments d'illustration permettront de couvrir les géométries des différentes réparations (collage en bord de chanfrein). Ces éléments seront transmis en juillet 2019* ».

Le rapporteur considère que cet engagement est satisfaisant pour les contrôles ultrasons. Les éléments de justification transmis par EDF devront néanmoins faire l'objet d'une instruction ultérieure. Dans l'attente de cette instruction, le rapporteur réserve sa position quant à la justification que les contrôles ultrasons mis en œuvre lors des recontrôles de fin de fabrication permettent d'atteindre le haut niveau de confiance dans la compacité de ces soudures, tel qu'exigé par le référentiel d'exclusion de rupture.

Concernant les contrôles par radiographie, le rapporteur considère par ailleurs que le fait que des indications notables aient pu être détectées lors des relectures des radiogrammes pour certaines soudures réalisées sur site, alors que ces indications avaient été détectées au préalable lors des recontrôles ultrasons, ne permet pas de justifier que les performances des contrôles par radiographie sont satisfaisantes vis-à-vis des exigences de l'exclusion de rupture. Bien que le caractère complémentaire de ces deux méthodes de contrôles non destructifs puisse être mis en avant, notamment pour des indications désorientées par rapport aux orientations de contrôles, le rapporteur considère que ces éléments ne sont pas suffisants pour justifier les performances des contrôles par radiographie.

Le rapporteur considère qu'une démarche de justification des performances similaire à celle proposée par EDF pour les contrôles ultrasons doit être proposée pour les contrôles par radiographie.

En conséquence, au regard des points soulevés ci-dessus, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 7

<p>Le rapporteur recommande qu'EDF justifie le haut niveau de confiance qu'il attribue aux contrôles non destructifs par radiographie des soudures de traversée, en suivant une démarche de justification similaire à celle proposée pour les contrôles par ultrasons.</p>

L'avis du rapporteur sur les mesures compensatoires prévues par EDF pour le suivi en service de l'indication détectée dans la soudure EPP6208TWM-S1 est donné au chapitre 7.

6.3.6. Chargements

Par le courrier du 2 octobre 2018 en référence [6], l'ASN demandait à EDF de préciser les situations sollicitant les lignes VVP en exclusion de rupture, en particulier les conditions de pression et de températures associées. Ces éléments ont été transmis par EDF le 25 janvier 2019 par le courrier en référence [76].

L'analyse de ces situations n'est pas abordée dans le présent rapport, le temps nécessaire à l'instruction de ces situations étant incompatible avec la rédaction du rapport. A ce stade, le rapporteur identifie néanmoins qu'EDF, dans son courrier en référence [76], mentionne l'introduction de conservatisme dans la définition des situations et charges sans préciser les valeurs de ces conservatismes.

Le rapporteur considère que, dans l'hypothèse où le maintien en l'état de ces soudures serait envisagé, le caractère exhaustif et conservatif des situations vis-à-vis du référentiel exclusion de rupture devrait être démontré et évalué. A ce titre, il sera nécessaire qu'EDF complète son dossier par des éléments concernant les contraintes mécaniques qui ne sont pas liées à la pression ni à la température, comme par exemple les contraintes résiduelles liées à l'installation des équipements, le mouvement relatifs des bâtiments, les déplacements différentiels.

6.3.7. Marges à la rupture brutale

6.3.7.1. Démarche établie

Dans sa démarche de traitement des écarts vis-à-vis du risque de rupture brutale, EDF entend démontrer le caractère suffisant des propriétés des soudures pour garantir l'intégrité des tuyauteries secondaires pendant toute la vie de l'installation, en identifiant des marges par des calculs de mécanique à la rupture brutale.

Dans sa note en référence [7], EDF précise que les données expérimentales produites par les différents programmes d'essais décrits dans les paragraphes précédents doivent permettre de définir de manière enveloppe les données d'entrée de ces calculs suivantes :

- les courbes de transition en résilience minimale et moyenne ;
- la corrélation résilience – ténacité dans le domaine de transition ;
- la température de début de domaine ductile ;
- la ténacité dans le domaine ductile.

En fonction notamment de la représentativité des programmes d'essais, EDF prévoit d'introduire des conservatismes complémentaires dans la définition des données d'entrée.

EDF précise que le caractère suffisant des valeurs de ténacité vis-à-vis du risque de rupture brutale considérées pour les soudures de traversée VVP sera évaluée selon le logigramme présenté à la Figure 32 du paragraphe 6.3.3.2.

L'IRSN a effectué la comparaison de la démarche proposée d'EDF avec celle d'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale de l'annexe ZG du code RCC-M pour les composants de niveau 1.

Le code RCC-M préconise de commencer par une analyse dite « conventionnelle » qui consiste à démontrer la tolérance de la structure en présence d'un grand défaut hypothétique (défaut conventionnel de quart-épaisseur pour des composants d'épaisseur supérieure à 40 mm). La justification est acquise si les marges à l'amorçage obtenues sont supérieures à 1 pour toutes les situations de fonctionnement.

Dans le cas contraire, une seconde analyse dite « détaillée » peut être effectuée afin de démontrer l'absence du risque de rupture brutale en postulant un défaut « technologique ». Toutefois, dans ce cas, EDF doit justifier, sur la base d'une étude détaillée du procédé de fabrication et des contrôles en fabrication et en service, que le défaut technologique retenu est enveloppe au sens où tout risque de présence de défauts plus grands est exclu. L'absence du risque de rupture brutale est démontrée si les marges à l'amorçage obtenues par cette analyse détaillée sont supérieures à 1 pour toutes les situations de fonctionnement.

L'IRSN souligne que le logigramme décisionnel d'EDF correspond à la démarche d'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale du RCC-M pour les matériels de niveau 1, explicitée ci-dessus, mais EDF indique, dans le cas où l'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale n'aboutit pas à une conclusion favorable pour l'ensemble des situations, qu'il limite son analyse du défaut conventionnel au domaine de fonctionnement où la perte d'une ligne VVP représente un enjeu de sûreté. Pour l'IRSN, cela signifie qu'EDF, pour étayer sa démonstration, tient compte du résultat obtenu avec le défaut conventionnel dans le domaine des hautes températures, correspondant en principe au domaine de comportement ductile du matériau.

6.3.7.2. Avis du rapporteur

Le rapporteur considère, sur la base de l'avis de l'IRSN, que le caractère enveloppe des défauts retenus dans l'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale des soudures des lignes VVP de l'EPR FA3 en application du code RCC-M, nécessite d'être justifié au regard des écarts constatés en réalisation.

Le rapporteur considère également, compte-tenu du fait que la démarche du défaut conventionnel pourrait être limitée au seul domaine associé aux enjeux de sûreté, qu'EDF doit justifier le domaine des températures correspondant aux enjeux de sûreté.

Le rapporteur rappelle enfin que la démarche de justification d'absence d'amorçage des défauts postulés dans des calculs de rupture brutale ne peut constituer à elle seule une démonstration de l'atteinte des objectifs d'une démarche d'exclusion de rupture et constitue une vérification nécessaire et non suffisante. A ce titre, au regard des objectifs de la démarche d'exclusion de rupture mentionnés dans le rapport préliminaire de sûreté, le rapporteur considère notamment que l'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale proposée par l'exploitant doit considérer au minimum le défaut dit de « référence » défini dans le rapport préliminaire de sûreté et non pas le défaut technologique.

En réponse à ces différentes considérations, EDF s'est engagée, dans son projet d'action n° 12 du courrier en annexe 13, à :

- apporter les éléments de justification du domaine de température présentant un « enjeu pour la sûreté » en cas de rupture des lignes VVP avant fin mai 2019. EDF considère que ce domaine se situe au-delà de 100 °C. EDF précise qu'en dessous de 100 °C, les générateurs de vapeurs ne sont plus efficaces, ce qui implique qu'un refroidissement engendré sur le fluide primaire en cas de brèche d'une tuyauterie vapeur sera lent et faible et que les effets énergétiques associés aux ruptures de tuyauteries à haute énergie (RTHE) n'ont pas à être considérés ;
- intégrer dans sa méthodologie que le plus petit défaut qui puisse être retenu dans l'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale soit de dimensions supérieures au défaut dit de « référence » défini dans le rapport préliminaire de sûreté (5 mm x 20 mm).

Le rapporteur considère recevable cet engagement d'EDF. Ces éléments techniques devront néanmoins faire l'objet d'une instruction approfondie.

6.3.8. Suivi en service renforcé

6.3.8.1. *Evaluation préliminaire du programme de suivi en service*

La démarche d'exclusion de rupture, en particulier les contreparties qu'elle nécessite, a fait l'objet, sur la base du rapport en référence [1], d'un avis de la section permanente nucléaire (SPN) de la commission centrale des appareils à pression le 21 juin 2005. Concernant le suivi en service, le rapporteur avait identifié plusieurs points qui nécessitaient des précisions ou des évolutions de la part du fabricant et de l'exploitant.

Dans ce rapport, le rapporteur avait résumé cette doctrine par :

« Si la qualité de conception et fabrication peuvent globalement être acquises par l'application de codes habituels, la garantie de la qualité de la conception et de la fabrication, ainsi que le suivi en service, doivent être renforcés afin de rendre improbables d'une part l'apparition d'un défaut rédhibitoire et d'autre part son absence de détection à temps ».

Les conclusions de cette instruction par l'ASN ont fait l'objet de la lettre de suite en référence [2] qui définit globalement les exigences relatives à l'inspection en service par :

« Inspection en service :

- *établissement de l'accessibilité et l'inspectabilité de l'ensemble des zones, (...);*
- *définition d'actions d'inspection en service, en complément des actions de surveillance en exploitation, en principe indépendantes des dommages mécaniques évalués (sauf cas exceptionnels des zones sensibles), dont la nature et la périodicité permettent de détecter toute perte d'intégrité (...).* »

A l'issue de la SPN de 2005, EDF a fait évoluer son plan initial de maintenance (état préliminaire) dans le document en référence [66]. Il intègre explicitement l'hypothèse d'exclusion de rupture en s'appuyant sur les documents en référence [13] et [37].

La doctrine EDF en référence [66] met en avant les évolutions ou les précisions suivantes qui s'appliquent notamment aux soudures de traversée :

- EDF n'identifie pas de zones sensibles ni de modes d'endommagement. Le programme d'inspection en service couvrira essentiellement les zones jugées les plus représentatives, au titre de la défense en profondeur, avec une périodicité basée sur la requalification du circuit secondaire principal (10 ans) ;
- concernant l'accessibilité et la contrôlabilité, le document en référence [38] indique que toutes les soudures de traversée sont contrôlables à 100 %. Toutefois ces contrôles devront être réalisés avec des moyens mécanisés, qui diffèrent donc des contrôles manuels réalisés en fabrication ;
- une plus grande harmonisation des seuils de notation est visée, lorsque c'est possible, entre les contrôles de fabrication et les examens de visite complète initiale ;
- EDF a pour objectif de renforcer l'harmonisation du programme d'inspection en visite complète initiale avec le programme d'inspection en service.

6.3.8.2. *Démarche proposée par EDF en 2018*

Suite à l'information donnée par EDF, début 2017, de l'existence de fiches de non-conformité concernant les exigences du référentiel d'exclusion de rupture, l'ASN avait demandé à EDF par son courrier en référence [4], de *« préciser et de justifier les mesures compensatoires qu'EDF prévoit, notamment en ce qui concerne le suivi en service des équipements ».*

Lors d'une réunion le 14 mars 2018, EDF a présenté à l'IRSN et l'ASN les principes de surveillance qu'il envisageait pour les équipements des circuits primaire principal et secondaires principaux. Une synthèse de cette présentation a fait l'objet du document EDF en référence [40]. A cette occasion, EDF envisageait une augmentation significative du nombre d'examens proposés pour les soudures VVP par rapport à ceux réalisés sur les réacteurs de 1450 MWe, avec le contrôle de l'ensemble des soudures à chaque visite décennale. Toutefois l'ASN avait noté que la prise en compte de mesures compensatoires proposées dans le cadre de l'instruction de l'événement significatif déclaré par le document en référence [23] n'apparaissait pas dans ces principes.

La définition de ces mesures compensatoires et leurs conséquences sur le programme envisagé pour le suivi en service de ces soudures figurent dans le document EDF en référence [79]. Pour les soudures de traversée, EDF décrit ces mesures par :

« Afin de renforcer la confiance quant à l'absence de défaut préjudiciable vis-à-vis du risque de rupture brutale, EDF renforcera le programme de suivi en service de ces soudures en réalisant un premier suivi dès la première visite complète du CPP puis à chaque visite partielle et visite décennale ».

Le procédé retenu par EDF pour réaliser ces contrôles en service demeure le procédé UT36 objet de la procédure en référence [74] (cf. paragraphe 6.3.5.6).

6.3.8.3. Avis du rapporteur concernant la doctrine de suivi en service

Les évolutions du plan initial de maintenance devraient découler des orientations définies par EDF dans les documents en référence [40] et [7]. Elles concernent essentiellement l'augmentation de la fréquence de ces contrôles avec la réalisation d'interventions supplémentaires lors des visites partielles entre chaque visite décennale.

Le rapporteur note que ce document prend en compte certaines des recommandations figurant dans le rapport du BCCN en référence [1] présenté à la SPN de 2005 :

- validation de l'accessibilité et de l'inspectabilité des soudures (évoquée dans le document en référence [38]) ;
- augmentation de la fréquence des contrôles ;
- contrôles de l'ensemble des soudures à chaque campagne de contrôle.

Le rapporteur constate que l'augmentation de la fréquence des contrôles et le contrôle de l'ensemble des soudures des lignes VVP en exclusion de rupture à chaque campagne de contrôle constituent un renforcement par rapport aux pratiques actuelles sur les composants équivalents du parc en exploitation. Ces mesures contribuent à détecter de manière plus rapide une éventuelle évolution de défauts préexistants. A ce titre ils améliorent la connaissance de l'évolution de l'état de ces soudures par rapport à l'état de référence résultant de la visite complète initiale.

Toutefois, le rapporteur considère qu'au titre d'une démarche d'exclusion de rupture, l'exploitant doit démontrer que les dispositions qu'il prévoit lors du suivi en service permettent de garantir le maintien, durant toute la durée de vie de l'installation, du haut niveau de qualité attendu en fin de fabrication.

Le procédé UT36 a été identifié par EDF comme devant être utilisé lors de la visite complète initiale puis pour le suivi en service des soudures de traversée tout au long de la vie de l'installation. Il a fait l'objet d'une qualification de type conventionnelle en référence [59] par la commission de qualification d'EDF. Le rapporteur constate qu'il n'y pas d'évolution notable entre les critères et performances du procédé UT36 qualifiés pour le réacteur EPR de Flamanville et ceux qualifiés pour les paliers P4, P'4 et N4, tel que décrits dans la procédure d'examen en référence [67] et la fiche de performances en référence [68].

Le rapporteur note qu'EDF, dans son projet de position n° 13 figurant dans le document du 15 mars 2019 en annexe 13, considère que les actions qu'elle a prévues dans le cadre de son projet de position n° 11 (voir le paragraphe 6.3.5.9) sont également de nature à justifier les performances des contrôles ultrasons pour le suivi en service.

Le rapporteur note que pour ce qui concerne le suivi en service, compte-tenu des difficultés d'accès en paroi externe de ces soudures, EDF n'envisage pas de contrôle par radiographie. Ce point ainsi que le fait qu'EDF a dû mettre en œuvre une expertise et des moyens complémentaires au procédé UT36 pour caractériser l'indication dans la soudure EPP6208TWM-S1 détectée en fin de fabrication, dont les dimensions sont peu différentes de celles considérées comme inacceptables par le fabricant (cf. paragraphe 7.2.3), rendent d'autant plus nécessaires les justifications à apporter pour les contrôles ultrasons.

Dans la mesure où ce procédé UT36 mis en œuvre pour le suivi en service est similaire à celui mis en œuvre lors des recontrôles ultrasons, le rapporteur considère que les observations et recommandations qu'il a formulées au paragraphe 6.3.5.9 s'appliquent également pour le procédé mis en œuvre pour le suivi en service. Le rapporteur considère qu'il est également nécessaire de justifier pour le suivi en service des performances en résolution et reproductibilité permettant de détecter sans ambiguïté une éventuelle évolution des indications dépassant le seuil de notation. Le rapporteur note par ailleurs que ce seuil de notation est exprimé en termes d'amplitude de l'écho reçu par rapport à une référence, et qu'il y a lieu d'établir une équivalence entre ce seuil et les dimensions de l'indication. Le rapporteur reconnaît que cette équivalence ne peut être commune à tous les types de défauts, mais qu'elle doit au moins concerner les défauts considérés comme inacceptables par le fabricant dans le document en référence [51]. Le rapporteur considère ainsi nécessaire qu'EDF complète sa démonstration décrite dans le projet de position n° 13 sur les points mentionnés ci-dessus.

Le rapporteur note qu'EDF, dans son projet de position n° 13 figurant dans le document en annexe 13, affirme que « *L'état de l'art sur les conditions de caractérisation d'indications en UT montre sur tous les dossiers qu'il est très difficile de dimensionner des défauts de hauteur inférieure à 3mm. En effet, le moyen de caractérisation consiste à exploiter le phénomène de diffraction en extrémité de défaut (tête/pieds). La diffraction est difficilement exploitable pour des hauteurs inférieures à 3mm (les échos de tête et de pieds sont confondus).* ». Le rapporteur partage cette affirmation qui concerne la hauteur des défauts non-volumiques.

Toutefois le rapporteur considère qu'EDF doit démontrer que les performances du procédé ultrasons en matière d'évaluation de la longueur des indications permettent de justifier de manière robuste les marges existantes par rapport aux dimensions des défauts considérées comme inacceptables aussi bien vis-à-vis de la rupture brutale que de la qualité de fabrication.

Le rapporteur considère donc que l'exploitant doit définir, en justifiant ses choix, les paramètres pour lesquels il estime qu'une amélioration des performances permettra d'améliorer de manière suffisante le niveau de confiance dans l'intégrité de ces équipements. Ces performances devront faire l'objet de qualification permettant de les quantifier. Le rapporteur note, qu'à ce stade, EDF indique que les critères d'évolution des indications lors du suivi en service seront ceux requis par le code RSE-M²⁷. Toutefois le rapporteur note qu'EDF, dans son projet de position n° 13 s'engage à tirer « à l'issue de ces actions [de justification du niveau des performances], [...] les conclusions pour adapter, éventuellement, les modalités du contrôle END définies pour les procédés qualifiés. ».

Dans l'hypothèse d'un maintien en l'état des écarts affectant les soudures de traversée, le renforcement du suivi en service évoqué par EDF a vocation à renforcer davantage le deuxième niveau de défense en profondeur. Le rapporteur estime que la confiance dans l'atteinte de bonnes caractéristiques, notamment de compacité des soudures, doit être d'autant plus grande, et le renforcement du contrôle par conséquent d'autant plus fort, que les propriétés mécaniques des soudures présentent peu de marge par rapport aux propriétés minimales suffisantes pour garantir l'intégrité des tuyauteries tout au long de la vie de l'installation.

Le rapporteur considère que la synthèse de qualification en référence [61] et les compléments fournis par EDF dans ses documents en référence [79] et [98] n'apportent pas à ce jour les éléments techniques justifiant que ces contrôles non destructifs sont renforcés et permettent d'atteindre le niveau de garantie attendu, compte tenu des écarts constatés lors de la réalisation de ces soudures. Le rapporteur note que l'engagement pris par EDF dans son projet de position n° 13 figurant dans le document en annexe 13 concernant la démonstration des performances de ces contrôles constitue une démarche nécessaire. Toutefois il considère que cette démonstration devra également permettre de justifier, vis-à-vis des enjeux du suivi en service rappelés ci-dessus :

- les performances en termes de résolution et de reproductibilité ;
- l'équivalence entre le seuil de notation en amplitude et les dimensions pour une série de défauts réalistes.

En ce qui concerne « la mise en conformité des états de surface par rapport à la procédure de mise en peinture et des exigences du procédé ultrasonore » demandée par l'ASN à la suite des recommandations émises par l'IRSN dans son avis en référence [63], notamment parce que la présence de cette peinture n'est pas conforme à la procédure en référence [80], l'ASN a demandé à EDF de justifier l'absence de perturbations lors du suivi en service.

Conformément à ce que prévoit la procédure de contrôle ultrasons en référence [67], EDF propose notamment de réaliser une opération de brossage à partir de la VC1, destinée à éliminer la couche de peinture qui se serait dégradée. Les conditions de réalisation de cette opération de brossage ont été précisées par EDF dans le projet de position n° 13 du document en annexe 13. Le rapporteur considère que les critères définis par EDF pour détecter la présence de perturbations de ces contrôles causées par une dégradation de la couche de peinture ou par l'oxydation des surfaces, ainsi que l'élimination de ces couches par brossage, sont satisfaisants. Le rapporteur considère également que le contrôle visuel télé-opéré envisagé par EDF dans ce même projet de position, doit être systématiquement réalisé avant chaque intervention dans le cadre du suivi en service.

²⁷ 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).

Concernant le cas particulier de l'indication détectée dans la soudure EPP6208TWM-S1, l'avis du rapporteur sur les modalités définies par l'exploitant pour son suivi en service dans l'hypothèse de son maintien en l'état est donné au paragraphe 7.4.4.

Au regard de l'ensemble des considérations ci-dessus, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 8

Le rapporteur recommande qu'EDF complète, vis-à-vis des enjeux du suivi en service, la démonstration des performances du procédé de contrôle non destructif UT36 avec :

- l'équivalence entre le seuil de notation en amplitude et les dimensions des indications pour une série de défauts réalistes ;
- la résolution et la reproductibilité des mesures effectuées, en termes d'amplitude et d'évaluation des dimensions ;
- la justification des performances pour les mesures de longueur des indications.

Cette démonstration pourrait conduire EDF à faire évoluer les paramètres de contrôle et d'analyse pour ce procédé, de manière à ce qu'ils permettent d'atteindre les exigences de l'exclusion de rupture. Le rapporteur recommande que le contrôle visuel télé-opéré envisagé par EDF dans les zones où une opération de brossage aura été réalisée dans le but d'éliminer des résidus présents en surface, soit systématiquement réalisé avant chaque intervention en contrôle par ultrasons dans le cadre du suivi en service.

6.4. Etudes de robustesse

Dans les courriers en référence [5] et [7], EDF précise que certaines dispositions sont définies en compensation des écarts au référentiel d'exclusion de rupture et notamment la réalisation des études de robustesse suivantes :

- études thermo-hydrauliques pour vérifier la couverture des études cœur de RTV-2A pour la RTV100, la RTV0 sans aggravant sur la fermeture de la vanne d'isolement vapeur, les essais de premier démarrage ;
- études de la tenue mécanique des lignes et des composants pour un chargement lié à la rupture d'une tuyauterie vapeur.

Par ailleurs, afin de réduire les conséquences d'une rupture d'une soudure de traversée, EDF précise que la faisabilité d'installation de dispositifs anti-fouettement pour le cas spécifique d'une rupture de tuyauterie haute énergie localisée au niveau d'une soudure de traversée VVP est en cours d'étude.

L'analyse de ces documents ne fait pas l'objet du présent rapport.

6.5. Conclusion

Les soudures de traversée des lignes VVP du réacteur EPR de Flamanville sont impactées à la fois par des écarts aux exigences définies à la suite de la SPN de 2005 pour répondre aux objectifs liés à la démarche d'exclusion de rupture et par des écarts qui altèrent le haut niveau de confiance dans l'atteinte de la qualité de réalisation.

Il en résulte que l'exploitant ne peut se prévaloir du respect du référentiel issu de la SPN de 2005 pour démontrer l'atteinte des objectifs liés à la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création en référence [8].

L'exploitant a établi une démarche de traitement des écarts constituée de trois étapes qui sont, par ordre de priorité : la réparation des soudures, le renoncement à la démarche d'exclusion de rupture et la justification en l'état.

i. Réparation

S'agissant de la réparation, le rapporteur considère que les scénarios proposés ne présentent pas de contraintes rédhibitoires mais qu'il est nécessaire que l'exploitant poursuive le développement des études et réalise les qualifications afin de rendre acceptable les risques résiduels identifiés. Après examen des différents scénarios, le rapporteur note que le troisième scénario de réparation consistant à affouiller les soudures de traversée jusqu'aux passes de racine et de soutien semble être celui présentant le moins de risques et d'inconvénients techniques.

ii. Renonciation à la démarche d'exclusion de rupture

S'agissant d'un renoncement à la démarche d'exclusion de rupture, le rapporteur note que cette démarche a un impact important sur la démonstration de sûreté et nécessite la reprise de plusieurs catégories d'études avec un résultat incertain. Par ailleurs, le délai associé à l'établissement de ces études, à leur instruction puis aux modifications matérielles importantes qui en découleraient pourraient conduire à des durées excédant le délai de réparation des soudures.

iii. Maintien en l'état

Enfin, le rapporteur a examiné la troisième étape, qui consiste, en dernier recours, à justifier le maintien en l'état des soudures de traversée.

Il s'agit d'une instruction de la démarche. Certains éléments déjà disponibles ont été intégrés dans l'analyse du rapporteur, les autres éléments (notamment les chargements thermo-hydrauliques) ont vocation à être transmis et analysés ultérieurement. En tout état de cause, l'analyse déroulée dans le rapport est menée sous réserve des éléments à venir.

Ne pouvant se prévaloir du respect du référentiel issu de la SPN de 2005 pour démontrer l'atteinte des objectifs du décret d'autorisation de création en référence [8], cette démonstration doit alors être apportée par la justification de l'obtention d'une qualité suffisante pour garantir l'intégrité des lignes VVP tout au long de la vie de l'installation et cela avec un haut niveau de confiance.

La position du rapporteur concernant l'obtention avec un haut niveau de confiance d'une qualité suffisante des soudures se fonde sur l'examen des propriétés mécaniques et de compacité obtenues ainsi que sur la démarche de calculs de marge à la rupture brutale proposée par EDF. Le rapporteur rappelle que l'analyse de l'exhaustivité des chargements identifiés et des conservatismes considérés constitue également un élément important dans la démonstration d'une qualité suffisante des soudures.

Propriétés mécaniques

Le rapporteur considère que la représentativité des programmes d'essais de caractérisation des propriétés mécaniques des soudures de traversée n'est pas suffisante. Par ailleurs, la compréhension des causes, aussi bien liées aux caractéristiques physico-chimiques du matériau qu'aux paramètres de soudage, expliquant les valeurs basses de résilience, la sensibilité au vieillissement sous déformation ainsi que la dispersion des valeurs constatées sur et entre les assemblages témoins et la première soudure ARE Q3 expertisée n'est pas apportée. A titre d'illustration, le fait qu'une inversion de R_m , témoignant *a priori* d'une sensibilité au vieillissement sous déformation, ait été observée sur la soudure ARE Q3 sans être observée ni sur les assemblages témoins de soudage ni sur les maquettes réalisées souligne l'absence d'une connaissance suffisante du matériau et le manque de représentativité des assemblages témoins.

Le rapporteur considère par conséquent que la démarche proposée par l'exploitant ne permet pas à ce stade d'apporter la garantie que les propriétés mécaniques issues des programmes d'essais et qui constituent une donnée d'entrée de l'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale, seront conservatives et encore moins représentatives vis-à-vis des propriétés réelles des soudures.

Le rapporteur considère nécessaire d'acquérir une compréhension fine des phénomènes entrant en jeu pour pouvoir prédire de manière représentative le phénomène de vieillissement sous déformation observée lors des programmes d'essais et les autres propriétés mécaniques.

La rupture brutale faisant intervenir les propriétés locales d'un matériau, il est également nécessaire d'avoir une haute confiance dans le fait d'avoir intercepté les valeurs les plus basses de ténacité au travers des essais réalisés. Le rapporteur recommande donc à l'exploitant de réaliser des programmes d'essais aux conditions limites vis-à-vis des différents paramètres de soudage entrant en jeu.

De plus, le rapporteur note que le programme d'essais prévu par l'exploitant sur une soudure ARE Q3 destiné à évaluer la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation ne répond pas à la nécessité de quantifier ce phénomène à partir de paramètres influents pris dans des conditions « limites ». Etant donné qu'EDF n'est pas non plus en mesure d'expliquer l'observation d'une inversion de R_m pour la première soudure ARE Q3 expertisée absente pour les assemblages témoins, le rapporteur considère que cette démarche ne permet pas d'estimer avec un haut niveau de confiance son impact dans les calculs vis-à-vis de la rupture brutale.

Propriétés de compacité

S'agissant des propriétés de compacité, le rapporteur constate que la capacité des procédés de contrôle volumique à détecter avec un haut niveau de confiance les défauts définis comme inacceptables par le fabricant en application de l'arrêté en référence [11] n'est pas acquise. Le rapporteur considère qu'EDF doit compléter sa justification du fait que les contrôles mis en œuvre permettent d'atteindre un haut niveau de confiance dans la compacité des soudures de traversée.

Démarche de calcul de marge à la rupture brutale

Le rapporteur rappelle que la démarche de justification d'absence d'amorçage des défauts postulés dans des calculs de rupture brutale ne peut constituer à elle seule une démonstration de l'atteinte des objectifs d'une démarche d'exclusion de rupture et constitue une vérification nécessaire et non suffisante.

En cohérence avec la position de l'ASN exprimée dans le courrier en référence [6], considérant que le scénario de remise en conformité doit être privilégié et, au regard de l'ensemble des considérations précédentes, le rapporteur considère nécessaire qu'EDF poursuivent l'analyse et la préparation de la mise en œuvre de ces scénarios afin d'identifier tous les risques et les parades associées.

Le rapporteur considère également que la démarche proposée par EDF pour justifier le maintien en l'état des soudures de traversée, qui doit rester une démarche de repli, doit être significativement complétée afin notamment de démontrer que les propriétés des soudures de traversée sont suffisantes et connues avec un haut niveau de confiance.

7. Défaut détecté sur la soudure de traversée EPP6208TWM-S1

7.1. Démarche de l'exploitant

La démarche de l'exploitant concernant la soudure de traversée EPP6208TWM-S1 s'inscrit dans le même cadre que celle relative aux autres soudures de traversée présentée au chapitre 6. Un défaut a été détecté dans cette soudure lors des recontrôles par ultrasons réalisés en 2018. L'objet de ce paragraphe est de présenter la démarche de justification spécifique d'EDF tenant compte du défaut détecté.

Dans la note en référence [5], EDF précise les trois volets d'analyse concernant l'indication détectée dans la traversée EPP6208TWM-S1 :

- la caractérisation de l'indication ;
- la possibilité de réparer cette indication ;
- l'analyse la nocivité de cette indication.

Sur la base des éléments de caractérisation mécanique disponibles à date, EDF entend établir la justification de la tenue mécanique de la soudure vis-à-vis du risque de rupture brutale en présence du défaut détecté.

Dans le courrier en référence [5], EDF envisage, dans l'attente des résultats du programme d'essais mécaniques sur la première soudure ARE Q3 expertisée, de démontrer que cette soudure respecte les exigences du référentiel d'exclusion de rupture en calculant les marges à la rupture brutale et en démontrant l'absence de transitoire sollicitant les soudures en dehors du palier ductile.

Par ailleurs EDF mentionne que la détection de ce défaut conduit à ne pas respecter l'exigence de haute qualité de fabrication qui sera compensée par un suivi en service renforcé.

La démarche prévue par EDF est cohérente avec la démarche globale présentée au chapitre 5 qui a pour objectif d'une part de justifier par calcul la tenue mécanique de la soudure vis-à-vis du risque de rupture brutale et d'autre part à renforcer le suivi en service pour tenir compte des écarts affectant le niveau de confiance dans la réalisation.

Les paragraphes qui suivent exposent les trois volets d'analyse d'EDF, les modalités de suivi renforcé envisagées par EDF, l'analyse portée par le rapporteur, ses conclusions et recommandations.

7.2. Caractérisation de l'indication

7.2.1. Caractérisation initiale : comparaison entre les contrôles de fin de fabrication et les contrôles contradictoires

Dans le document en référence [71], EDF a réalisé la synthèse des résultats des contrôles contradictoires par ultrasons et les a comparés à ceux obtenus en fin de fabrication.

Toutes les soudures de traversée contrôlées en fin de fabrication sont conformes aux exigences du RCC-M pour des soudures de niveau Q1.

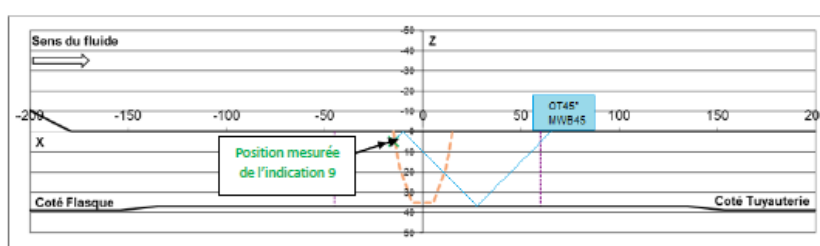
Les résultats des contrôles contradictoires concluent que, parmi ces 8 soudures, 7 sont conformes aux exigences du RCC-M en la matière, et qu'une, la soudure EPP6208TWM-S1 située du côté externe de la traversée du train 2, comporte une indication notable référencée n° 9 dans le rapport d'examen EDF/DI/DISA en référence [72].

Les caractéristiques de cette indication établies dans ce rapport d'examen sont les suivantes :

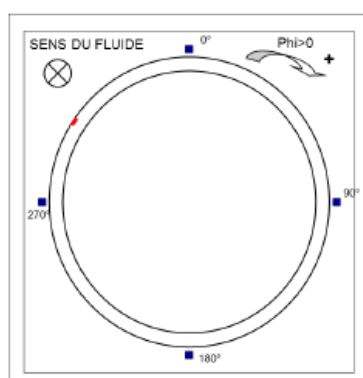
N° Indication	Caractéristiques ultrasonores		Localisation de l'indication				Classification	
	H _m /H ₀ (dB)	PS (mm)	X (mm)	Phi _{début} (°/mm)	Z (mm)	Longueur à -6dB (mm)	Volumique	Non Volumique
9	-3.3	107.9	-15.67	303.3/202 3.0	2.9	13.3(2°)		X

Tableau 16 : Caractérisation de l'indication de la soudure EPP6208TWM-S1

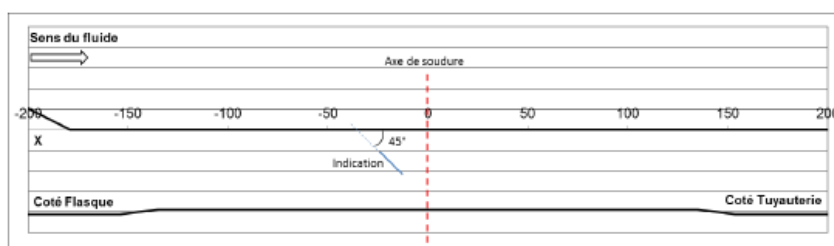
L'indication a été détectée par un traducteur en ondes transversales à 45° (OT45°) tirant vers le flasque (sens de tir 1-5). Sa localisation, établie dans le document EDF en référence [73] est donnée à la Figure 45.



Localisation de l'indication suivant l'axe X et Z relevée avec le traducteur OT45°-F



Localisation de l'indication suivant l'axe Phi



Orientation de l'indication par rapport à la surface de l'appareil

Figure 45 : Localisation de l'indication n° 9 située dans la soudure de traversée EPP6208TWM-S1 (extrait de l'annexe 1/4 du document EDF en référence [73]).

Les dimensions de la soudure de traversée EPP6208TWM-S1 sont données à la Figure 46.

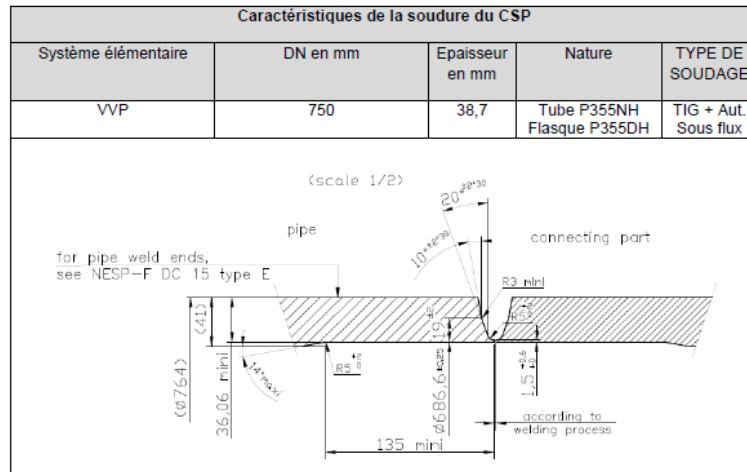


Figure 46: Caractéristiques géométriques de la soudure EPP6208TWM-S1

Cette indication est située à proximité de la peau externe sur le bord du chanfrein de la soudure et n'est pas débouchante.

La procédure d'évaluation des indications en référence [58] mise en œuvre lors des contrôles contradictoires, pour les indications dont l'amplitude dépasse le seuil d'évaluation fixé à -6 dB, conduit à attribuer à cette indication :

- une longueur maximale de 13 mm (qui correspond à la dimension du faisceau du traducteur) ;
- une profondeur de 3 mm ;
- un caractère « non volumique » (basé sur le fait que l'amplitude de l'écho provenant de cette indication lors de l'utilisation d'autres angles (ici 0° et 60°) est beaucoup plus faible, ce qui indique une inclinaison préférentielle de l'ordre de 45° par rapport à la normale à la surface).

Ce classement « non volumique » figure dans le rapport d'examen EDF/DI/DISA en référence [72]. Comme indiqué dans le paragraphe 4.1.6.1, ce classement conduit à rendre inacceptable cette indication en application du code RCC-M.

7.2.2. Expertise complémentaire

Une expertise complémentaire a été menée par EDF. Celle-ci fait l'objet de l'avis technique EDF référencé [73]. Elle décrit les examens et analyses complémentaires réalisés sur cette indication et conclut aux résultats suivants :

- l'utilisation de capteurs bi-éléments à 4 MHz en $OT45^\circ$, $OT60^\circ$ et $OT70^\circ$ a confirmé la présence et la localisation de l'indication ;
- la comparaison des amplitudes des échos reçus par les traducteurs en $OT45^\circ$ et $OL0^\circ$ bi-éléments (sans zone morte), respectivement -3 dB et -23.9 dB par rapport à la même référence, conduit à confirmer le caractère non volumique de l'indication ;
- l'examen télévisuel en paroi externe et l'examen par ressuage n'ont mis en évidence aucune singularité géométrique pouvant être associée à l'indication, ce qui conforte son caractère non débouchant ;
- l'utilisation du capteur bi-éléments en $OL0^\circ$ a confirmé la présence d'une indication non débouchante. Toutefois, du fait de la présence de signaux parasites provenant de l'état de surface du cordon de soudure, il n'a pas été possible de réaliser une mesure directe du ligament entre l'indication et la surface ;

- la recherche de cette indication sur les radiogrammes a été négative. Les dimensions et de l'orientation de l'indication sont peu compatibles avec les paramètres de contrôles radiographiques qui privilégient la détection d'indications quasi perpendiculaires à la surface ;
- l'utilisation d'un traducteur bi-éléments en OT45° possédant un diamètre de faisceau plus petit que le traducteur initial (8 mm au lieu de 13 mm) conduit à attribuer à l'indication une longueur inférieure ou égale à 8 mm ;
- l'analyse de second niveau réalisée à l'aide du diagramme AVG (amplitude distance gain dimension) conduit à attribuer à l'indication une surface réfléchissante équivalente à un trou à fond plat de 2 mm de diamètre orienté perpendiculairement à l'axe du faisceau, ici 45°. En prenant l'hypothèse simplificatrice d'une indication de section rectangulaire de longueur 8 mm, l'équivalence avec la surface d'un trou à fond plat de 2 mm de diamètre conduit à une largeur (parallèlement à un plan incliné de 45° par rapport à la normale à la surface) de 0.4 mm. Une modélisation réalisée à l'aide du logiciel CIVA, qui effectue un calcul complet incluant les phénomènes de réflexion et de diffraction confirme cette évaluation.

En conclusion, EDF estime que, de manière conservatrice, l'indication a un caractère non volumique, et que ses dimensions sont décrites par un rectangle de 8 mm (longueur maximale) par 2 mm (largeur maximale selon une inclinaison de 45°).

7.2.3. Avis du rapporteur

Capacité des contrôles de fin de fabrication et des recontrôles à répondre aux exigences réglementaires et de l'exclusion de rupture

Se référer aux conclusions mentionnées dans le paragraphe 6.3.5.9.

Détection de l'indication

Concernant l'absence de détection de cette indication lors des contrôles ultrasons de fin de fabrication, EDF s'appuie sur les fluctuations d'amplitude des échos reçus lors de la mise en œuvre de chacune des deux procédures employées (celle de fin de fabrication et celle de recontrôles) pour justifier que l'amplitude de l'écho, qui est proche du seuil de notation, ait pu passer sous ce seuil dans le cas des contrôles de fin de fabrication, et passer au-dessus dans le cas des recontrôles.

EDF a, dans son projet de position n° 14 du courrier en annexe 13, apporté des éléments supplémentaires pour expliquer la non-détection de cette indication lors des contrôles initiaux de fin de fabrication en usine. Il s'agit des arguments suivants :

- a : le RSE-M évalue la reproductibilité des mesures d'amplitude à ± 3 dB. L'amplitude de l'écho provenant de cette indication lors des recontrôles est de -3.3 dB. Le seuil de notation étant à -6 dB, il est possible que cette amplitude soit mesurée au voisinage du seuil de notation, voire en dessous lors du premier contrôle en usine ;
- b : la faible longueur de l'indication (estimée à 8 mm de manière conservatrice) peut rendre sa détection aléatoire ;
- c : la localisation en profondeur de l'indication (proche de la paroi externe) conduit à un trajet acoustique important (double rebond) correspondant à 2 épaisseurs de la soudure. Cette distance conduit à un affaiblissement supplémentaire qui tendrait à se situer à la borne élevée des incertitudes.

La position du rapporteur sur ces arguments est la suivante :

- a : la reproductibilité citée par le RSE-M concerne la mise en œuvre de la même procédure ultrasons à deux moments différents sur la même indication. Cette notion doit être distinguée de l'incertitude de mesure qui décrit les variations possibles d'une mesure à un endroit donné en intégrant les conséquences des paramètres influents identifiés. Or ici, il s'agit de comparer des mesures obtenues dans des conditions de mises en œuvre différentes. A ce sujet, le rapporteur note une différence importante entre les deux procédures :
 - le contrôle de fin de fabrication en usine était du type manuel : faute d'un codage en position, il ne peut pas être garanti que le traducteur a été positionné à toutes les positions requises par le maillage des points de mesure. En contrepartie, l'opérateur a la possibilité, quand il a identifié un écho, d'affiner la position du traducteur pour atteindre l'amplitude maximale ;
 - la procédure utilisée lors des recontrôles est du type mécanisé : le codage précis de la position du traducteur garantit que le maillage des points de mesure est conforme au requis. En contrepartie il ne peut pas être garanti que l'amplitude mesurée est maximale.

Sur ce point, le rapporteur considère que, faute d'information sur la reproductibilité ou l'incertitude des mesures pour les deux procédures, l'origine de la non-détection de l'indication ne peut pas être expliquée uniquement par ces paramètres ;

- b : en ce qui concerne la faible longueur de l'indication, le rapporteur constate que l'image CSCAN (vue de dessus) de l'indication, telle qu'elle est présentée dans l'avis technique de l'IRSN en référence [63] montre que l'indication est vue durant au moins trois balayages au-dessus du seuil de notation à -6 dB lors des recontrôles. Les caractéristiques géométriques des faisceaux ultrasonores étant similaires entre les deux contrôles, le rapporteur considère qu'il est probable que l'indication aurait dû être visible sur au moins un balayage lors du contrôle en usine ;
- c : en ce qui concerne la localisation de l'indication, le rapporteur constate que le parcours acoustique est identique entre les deux contrôles et que les caractéristiques géométriques des deux faisceaux ultrasonores sont similaires. Le rapporteur considère que cet argument ne peut pas conduire à des écarts significatifs en amplitude entre les deux contrôles.

Le rapporteur considère que l'argumentaire fourni par EDF pour expliquer cette incohérence n'est pas suffisant. En l'absence de complément expliquant les raisons de la non-détection, par les contrôles de fin de fabrication, d'une indication non-volumique, inacceptable vis-à-vis du code RCC-M, le rapporteur considère que cette non-détection remet en cause le haut niveau de confiance attendu dans l'adéquation de ces contrôles de fin de fabrication avec les exigences applicables.

Caractérisation de l'indication

Comme précisé au paragraphe précédent, l'ASN a saisi l'IRSN par le courrier en référence [62] afin « d'évaluer les performances des examens non destructifs par ultrasons réalisés à l'occasion de la reprise de ces contrôles sur les soudures des lignes VVP en exclusion de rupture ».

Dans ce cadre, l'IRSN a émis un avis en référence [63] concernant notamment la caractérisation de l'indication détectée dans la soudure EPP6208TWM-S1. L'IRSN considère que :

- la démarche de caractérisation de l'indication présentée par EDF est satisfaisante ;
- son caractère « non-volumique » est avéré ;
- à la suite d'une analyse fine des enregistrements, une estimation des dimensions de 5 mm (longueur) par 2.5 mm (hauteur) serait plus réaliste.

Ainsi le rapporteur n'a pas de remarques sur la caractérisation de cette indication faite par EDF et note que les dimensions qui lui sont attribuées résultent d'une évaluation conservative au regard des conséquences pour la sûreté. Le caractère « non volumique » attribué à l'indication repose sur la prise en compte des critères définis dans la procédure d'évaluation en référence [58].

Le rapporteur considère que la possibilité d'enregistrer la totalité des informations ultrasonores puis de les analyser a posteriori suivant des algorithmes spécifiques constitue un avantage certain par rapport aux procédures habituelles en contrôle manuel.

Comme rappelé au paragraphe 6.3.5.2, le code RCC-M définit comme inacceptable tout défaut non volumique identifié, sans considération sur ses dimensions.

7.3. Scénario de réparation

Ce scénario de réparation, présenté dans la note en référence [27], est un sous-scénario du troisième scénario mentionné au paragraphe 6.1.4.

Tout d'abord, une coupe de la soudure W23 est réalisée entre le compensateur et le guard pipe. Elle doit permettre de pouvoir conserver le compensateur. Le compensateur est ensuite décalé pour permettre l'accès à la soudure W3 entre le flasque et le guard pipe. Cette soudure est coupée afin de pouvoir dégager le guard pipe et ainsi accéder à la soudure de traversée W1 afin de réparer le défaut selon le procédé TIG et électrodes enrobées. L'accès à la soudure de traversée W2 n'étant pas nécessaire, le retrait de la manchette n'est pas nécessaire dans ce scénario.

7.3.1. Contraintes opérationnelles et risques associés

Les risques identifiés par EDF sont similaires à ceux présentés au paragraphe 6.1.4.2 pour le troisième scénario, à l'exception des risques liés aux opérations de beurrage inconel et de remplacement de la manchette qui ne sont pas réalisées.

7.3.2. Approvisionnements

Les principaux composants à approvisionner identifiés dans les notes en référence [27] sont les suivants :

Composant	Délai d'approvisionnement
Ailette	6 semaines
Plaque de fermeture (Closing plate)	6 mois
Tôle laminée soudée (Welded rolled plate)	6 mois

7.3.3. Durées de réalisation

Les délais estimés par le fabricant pour les opérations de démontage et de remontage sur site sont précisées dans le Tableau 17.

Scénario 4 : Réparation de l'indication de la soudure W1 de la traversée EPP6208TWM		
Phase de travaux	Délai estimé (mois)²⁸	Remarques
Démontage	0,3	Réalisé en parallèle des approvisionnements
Remontage	2	
Essais fonctionnels	1	Epreuve enceinte, ventilation
Durée totale estimée	3,3	

Tableau 17 : Durées estimées par le fabricant dans la note en référence [27]

7.3.4. Avis du rapporteur

Le rapporteur considère que les recommandations formulées au paragraphe 6.1.7.1, s'appliquent également pour à ce scénario de réparation.

7.4. Analyse la nocivité de cette indication

7.4.1. Démarche d'EDF

La soudure de traversée VVP identifiée EPP6208TWM-S1 comporte un défaut plan dont les caractéristiques géométriques ont été rappelées au paragraphe 7.2.

Tel que décrit au chapitre 0 du présent rapport, le matériau des soudures de traversée VVP présente des caractéristiques de ténacité inférieures à celles attendues en conception.

²⁸Le planning est basé sur le planning de montage du GMES Nordon-Ponticelli pour le chantier de Flamanville :

- le travail est réalisé en 3x8 heures et 6 jours sur 7 ;
- le personnel tuyauteur ainsi que la logistique (machines de soudage / dispositifs de manutention ...) sont considérés disponibles ;
- un taux d'efficacité de 0,75 a été appliqué en 3x8h ;
- la réparation de la soudure est assimilée de manière conservatrice à une opération de coupe et de resoudage dans l'attente de connaître le procédé de réparation et son temps de mis en œuvre.

Dans son courrier en référence [5], EDF mentionne qu'une analyse de nocivité a été réalisée pour évaluer la stabilité en rupture brutale de ce défaut en fin de vie. Dans sa note en référence [7], EDF précise que cette étude de nocivité en référence [82] a été réalisée à partir d'un recalage de la courbe de transition fragile-ductile prenant comme données d'entrée les résultats d'essais complémentaires de résilience à 0 °C, 10 °C, 50 °C et 300 °C obtenus sur l'assemblage témoin CT 13.0434 mentionnés dans la note en référence [83].

7.4.2. Méthode et hypothèses de calcul

La méthode de calcul K_{cp} et les critères utilisés sont ceux issus du code RSE-M.

Le modèle de calcul retenu pour représenter le défaut « réel » est un modèle de défaut semi-elliptique, d'orientation circonférentielle, non débouchant, de dimensions suivantes :

- longueur $2c = l = 8$ mm ;
- excentricité $2a = h = 2$ mm ;
- ligament externe = 4,1 mm \pm 0,7.

La ténacité et la résistance à la déchirure du matériau, retenues pour les calculs et issues de la note en référence [83], sont les suivantes :

- résistance à la déchirure $J_{0,2} = 100$ kJ/m² au plateau ductile (au-delà de 75 °C) ;
- ténacité K_{IC} croissant avec la température, de 100 à 156 MPa \sqrt{m} dans le domaine de la transition (de 10 à 65 °C).

EDF utilise une formule de corrélation résilience-ténacité issue de la note en référence [83] développée par Framatome pour les aciers carbone-manganèse. Cette corrélation est utilisée pour déterminer des valeurs de ténacité correspondantes aux valeurs de résilience mesurées sur l'assemblage témoin CT 13.0434. La formule de corrélation est rappelée au paragraphe 6.3.3.4.

Enfin, les situations et charges prises en compte sont celles utilisées dans le dossier d'analyse du comportement des tuyauteries en référence [84].

7.4.3. Résultats obtenus

Dans sa note en référence [7], EDF précise les facteurs de marges obtenues avec les hypothèses de calculs définies au paragraphe précédent.

Catégorie	Soudure EPP6208TWM-S1 extérieur enceinte train 2	
	Ductile	Transition
2	8,11	4,37
3	10,44	5,94
4	4,29	5,13
EH	15,26	9,82

Figure 47 Facteurs de marges issus des calculs de rupture brutale pour le défaut de la soudure EPP6208TWM-S1

EDF conclut que l'analyse de la nocivité de l'indication de la soudure de la traversée EPP6208TWM montre des marges importantes vis-à-vis du risque de rupture brutale malgré la présence de ce défaut plan.

EDF mentionne que ces analyses sont amenées à être mises à jour en fonction des résultats du programme d'essais mécaniques décrit au paragraphe 6.3.3.3. Cette mise à jour permettra notamment d'intégrer les résultats des essais mécaniques réalisés sur la première soudure ARE Q3 expertisée et d'introduire, en raison des limites de représentativité de la base expérimentale disponible, des conservatismes complémentaires dans la formule de corrélation résilience-ténacité dans le domaine de transition.

Ces éléments n'ont pas été transmis à date.

7.4.4. Avis du rapporteur

7.4.4.1. *Hypothèses de calculs*

Concernant les caractéristiques mécaniques du matériau prises en compte dans l'analyse de nocivité, EDF utilise les valeurs de résilience obtenues sur les essais mécaniques complémentaires menés sur l'assemblage témoin CT 13.0434. EDF précise que ces analyses seront mises à jour avec les résultats programmes d'essais mécaniques décrits au paragraphe 6.3.3.3 pour intégrer notamment les résultats des essais mécaniques réalisés sur la première soudure ARE Q3 expertisée.

Par ailleurs, le rapporteur constate que le décalage de la courbe de transition, issu des hypothèses considérées par EDF relatives à la sensibilité au vieillissement sous déformation du matériau d'apport fil/flux pris en compte avant application de la formule de corrélation résilience-ténacité est de +15 °C. Cette valeur n'est pas cohérente avec celle estimée à ce jour par EDF dans sa note en référence [76], qui est de +40 °C.

Le rapporteur note qu'EDF a prévu de réaliser une nouvelle analyse de nocivité qui prend en compte les résultats du programme d'essais mécaniques réalisés sur la première soudure ARE Q3 expertisée. La sensibilité au vieillissement sous déformation pour le matériau d'apport fil/flux mis en œuvre sur les soudures de traversée devra être également prise en compte dans cette nouvelle analyse de nocivité.

7.4.4.2. *Résultats obtenus*

La méthode K_{cp} du code RSE-M a été mise en œuvre par EDF pour les situations de 2^{ème}, 3^{ème} catégorie, pour la situation d'épreuve hydraulique (EH) ainsi que pour la 4^{ème} catégorie dans le domaine de la transition ductile-fragile.

Des échanges techniques complémentaires ont eu lieu concernant les situations de 4^{ème} catégorie dans le domaine ductile. L'exploitant a réalisé un autre calcul en utilisant la méthode J_s pour déterminer le facteur d'intensité de contraintes et en postulant le défaut comme débouchant, ce qui est conservatif par rapport au défaut réel non débouchant. Ce calcul montre l'existence d'un facteur de marge de 2,37, après prise en compte de coefficients de sécurité. Il rappelle en outre que compte tenu de la dimension circonférentielle du défaut non débouchant (8 mm), c'est la section entière de matière l'entourant qui reprend les contraintes en cas de début de plastification du ligament externe ; ainsi celui-ci restera stable.

EDF mentionne que la propagation en service est très faible, le défaut atteignant les dimensions 2,02 x 8,00 mm en fin de vie à 60 ans.

EDF précise que ce défaut en fin de vie est stable dans le domaine ductile et dans le domaine de la transition, avec respectivement des facteurs de marge minimaux de 4,29 (en 4^{ème} catégorie) et 4,37 (en 2^{ème} catégorie). EDF parvient à démontrer l'absence d'instabilité pastique du ligament interne et externe.

Ces éléments n'appellent pas de remarques complémentaires à celles mentionnées au paragraphe précédent.

7.5. Modalités définies par l'exploitant pour le suivi en service

Dans son document en référence [79], EDF décrit les mesures compensatoires spécifiques qu'il prévoit de mettre en œuvre pour le suivi en service de l'indication détectée en fin de fabrication dans la soudure EPP6208TWM-S1 dans l'hypothèse d'un maintien en l'état :

«En complément, EDF réalisera le suivi en service de la soudure EPP6208TWM-S1 par un ressuage à chaque arrêt simple pour rechargement au droit de l'indication existante afin de vérifier que le défaut reste non débouchant, ce qui conduit à suivre cette indication tous les arrêts par ultrasons en visite partielle et visite décennale ou par ressuage en arrêt simple pour rechargement. ».

Le rapporteur considère qu'un suivi en service renforcé impliquerait que ce suivi soit en mesure de détecter sans ambiguïté une évolution des dimensions de cette indication. Or il apparaît que la caractérisation qui a été faite de ce défaut par la méthode ultrasonore résulte d'estimations, a priori conservatives, basées sur des considérations théoriques (équivalence surface-amplitude, diamètre des faisceaux ultrasonores). Elles ne permettent pas d'aboutir à une estimation directe de ces dimensions car les valeurs affichées sont des valeurs maximales. Ainsi elles ne permettent de détecter les premières évolutions.

Le rapporteur note qu'EDF, dans son projet de position n° 13 figurant dans le document en annexe 13, prévoit « de déployer le même mode opératoire de caractérisation qui décrit les gestes complémentaires de caractérisation de défaut à l'identique de ceux déjà été réalisés lors de recontrôles CND. L'analyse sera réalisée par des caractérisateurs N2 CENE et supervisée par un expert. Ce point zéro constituera une référence lors de la VCI. Il permettra de se prononcer sur l'évolution de l'indication lors des visites ultérieures conformément aux règles du code RSEM. Ces règles permettent d'échapper aux incertitudes de mesures et ainsi d'apporter de la robustesse au diagnostic. ».

Comme indiqué au paragraphe 6.3.8.3, le rapporteur constate que ces modalités concernent essentiellement la mise en œuvre de la procédure, mais ne justifie pas les performances en reproductibilité, pourtant essentielles pour la détection d'une évolution.

Le rapporteur conclut qu'il est nécessaire, s'agissant d'un suivi en service renforcé, que l'exploitant dispose, à l'issue de la visite complète initiale, d'informations robustes sur les caractéristiques de cette indication, qui pourraient ensuite servir de références pour le suivi en service. Il conviendrait donc que les performances démontrées de la procédure d'essai non destructif de suivi en service permettent de détecter et quantifier sans ambiguïté toute évolution jugée significative de l'indication.

A cet égard, le rapporteur considère que la réalisation d'un contrôle par ressuage à chaque arrêt simple pour rechargement ne constitue pas, à elle seule, une parade suffisante pour détecter une évolution de l'indication puisqu'il ne permettrait pas de détecter une augmentation de sa longueur circonférentielle ou radiale, qui pourraient précéder l'émergence de l'indication en paroi externe qui est le seul phénomène détectable par ressuage.

Ces constats ont conduit le rapporteur à formuler la recommandation n° 8 figurant au paragraphe 6.3.8.3.

7.6. Conclusion

Les conclusions du rapporteur mentionnées dans ce paragraphe concernent la démarche de justification d'EDF relative au défaut détecté dans la soudure de traversée EPP6208TWM-S1 lors des recontrôles par ultrasons réalisés en 2018. Les conclusions du rapporteur mentionnées au paragraphe 6.5, applicables également à cette soudure, ne sont pas reprises dans ce paragraphe.

Le rapporteur rappelle en premier lieu que ce défaut, de type plan, est considéré comme inacceptable par le code RCC-M et a une hauteur correspondant également à celle des défauts considérés inacceptables par le fabricant au regard de la maîtrise de ses procédés de fabrication.

Le rapporteur considère que la caractérisation de cette indication a été menée de manière conservatrice mais que les performances des examens non destructifs envisagés et qui seraient mis en œuvre dans le cadre d'une surveillance en service renforcée des soudures ne permettraient pas d'en suivre les premières évolutions.

Les résultats obtenus par le calcul de nocivité du défaut n'appellent pas, sous réserve d'une mise à jour des données d'entrée en fonction des valeurs issues des programmes d'essais de caractérisation des propriétés mécaniques, de remarque particulière de la part du rapporteur.

Néanmoins vis-à-vis de la démarche de défense en profondeur concernant la qualité de conception et de fabrication, la présence d'un défaut non-volumique inacceptable impacte fortement l'acceptabilité de la démarche de traitement des écarts proposée par l'exploitant pour le cas de la soudure de traversée EPP6208TWM-S1.

En effet, le rapporteur rappelle que la prévention du risque de rupture brutale passe par des garanties cumulatives et concomitantes sur chacun des trois paramètres indépendants que sont les propriétés de ténacité du matériau, la compacité du matériau et les chargements appliqués.

Or le rapporteur constate, sans avoir encore effectué l'analyse des chargements, que les valeurs basses de résilience couplées à une sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation et la présence d'un défaut non-volumique pour la soudure de traversée EPP6208TWM-S1 altèrent d'ores et déjà deux des trois axes primordiaux de la prévention du risque de rupture brutale.

Le rapporteur considère que l'altération concomitante de deux des trois paramètres essentiels de prévention du risque de rupture brutale, renforce la nécessité de privilégier la remise en conformité de la soudure.

En tout état de cause, considérant l'approche de défense en profondeur vis-à-vis du risque de rupture brutale, et dans l'hypothèse où les soudures de traversée seraient maintenues avec les propriétés mécaniques actuelles, le rapporteur recommande au moins d'éliminer le défaut.

En conséquence, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 9

Le rapporteur recommande que, dans une approche de défense en profondeur vis-à-vis du risque de rupture brutale, et dans l'hypothèse où les soudures de traversée seraient maintenues avec les propriétés mécaniques actuelles, EDF procède à l'élimination du défaut détecté dans la soudure de traversée EPP6208TWM-S1.

EDF a, dans son document en annexe 13, donné sa position concernant l'élimination de ce défaut en cas du maintien en l'état des soudures de traversée. EDF considère que cette élimination n'est pas justifiée pour les raisons suivantes :

- la confiance qu'EDF place dans les contrôles non destructifs mis en œuvre lors des contrôles ultrasons en usine ;
- la justification de la non-détection de cette indication lors des contrôles en usine ;
- les mesures compensatoires prises au titre du suivi en service ;
- les risques associés à une réparation.

Pour le premier tiret, la position du rapporteur est donnée au paragraphe 6.3.5.6, pour le deuxième tiret, la position du rapporteur est donnée au paragraphe 7.2.3, pour le troisième tiret la position du rapporteur est donnée au paragraphe 7.5, et pour le dernier tiret la position du rapporteur est donnée aux paragraphes 6.1.7 et 7.3.4.

Ces éléments n'apportent par ailleurs pas de réelle réponse à l'altération concomitante de deux des trois paramètres essentiels de prévention du risque de rupture brutale qui a amené le rapporteur à formuler la recommandation précédente.

8. Autres soudures VVP

Après analyse de l'ensemble des écarts, l'exploitant considère que les procédés de soudage TIG manuel et TIG et électrodes enrobées, associés à leurs métaux d'apports respectifs EML5 d'une part et Cymeta et Univers 2M d'autre part, se sont révélés inadaptés pour répondre aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005 complété par les exigences spécifiées par le fabricant.

D'autres écarts concernant les conditions de réalisation des QMOS et des assemblages témoins réduisent encore la confiance dans l'atteinte des propriétés attendues pour ces soudures.

Comme précisé au chapitre 5, EDF envisage une remise à niveau de ces soudures en utilisant un mode opératoire de soudage conforme au référentiel d'exclusion de rupture. Ce mode opératoire de soudage pourra utiliser le procédé TIG orbital (avec le métal d'apport DMOI-G) ou un nouveau procédé TIG et électrodes enrobées (avec un autre métal d'apport de dénomination commerciale Tenacito-R) qui fait l'objet d'un programme de qualification permettant de vérifier sa conformité au référentiel d'exclusion de rupture.

Concernant les soudures réalisées sur site avec le procédé TIG orbital pour les passes de remplissage et de finition et en ce qui concerne les propriétés mécaniques, les valeurs de résilience mesurées sur les assemblages témoins répondent aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture avec des marges permettant de couvrir raisonnablement certaines incertitudes. Ainsi pour ces soudures, EDF n'a pas prévu de remise à niveau. Certains constats effectués sur ces soudures, comme par exemple les écarts affectant les assemblages témoins, les modalités de réalisation des réparations et à l'éventuelle sensibilité du mode opératoire de soudage (métal d'apport DMOI-G) au phénomène de vieillissement sous déformation peuvent néanmoins remettre en question la confiance dans l'atteinte de certaines caractéristiques attendues pour les matériaux. EDF devra statuer sur la suffisance des marges constatées pour couvrir ces écarts avec un haut niveau de confiance. La démarche de traitement d'EDF doit donc évaluer l'impact de ces écarts sur les caractéristiques finales des soudures.

Certaines de ces soudures réalisées avec le procédé TIG orbital présentent par ailleurs des défauts de compacité. EDF prévoit de réparer ces soudures afin d'éliminer ces défauts et ainsi rétablir leur conformité au référentiel d'exclusion de rupture.

La liste, établie par EDF le 13 février 2019, des soudures concernées par des réparations locales visant à éliminer les défauts de compacité, ou des remises à niveau visant à rétablir des propriétés mécaniques conformes au référentiel d'exclusion de rupture (et qui permet également d'éliminer d'éventuels défauts de compacité existants) est présentée en annexe 10.

Comme cela a été évoqué en introduction, l'analyse de la démarche de traitement des écarts objet du présent rapport a été réalisée sur la base des écarts connus à la date de sa rédaction, EDF poursuivant le recensement des écarts affectant chacune des soudures VVP en exclusion de rupture réalisées sur site et pouvant subsister après avoir réalisé les opérations de remise à niveau. En fonction de leur gravité et surtout de leur cumul, des écarts pourraient remettre en cause le respect du référentiel d'exclusion de rupture et les positions du rapporteur.

Les paragraphes suivants détailleront dans un premier temps la démarche d'EDF concernant les soudures réalisées avec le procédé TIG orbital. Dans un second temps, le rapporteur analysera le traitement prévu par l'exploitant pour les soudures réalisées entièrement avec le procédé TIG manuel et les soudures réalisées avec le procédé TIG et électrodes enrobées.

8.1. Soudures réalisées avec les procédés TIG manuel pour les passes de racine et de soutien et TIG orbital pour les passes de remplissage

8.1.1. Réparation des soudures présentant des défauts de compacité

Dans le document en référence [5], EDF a identifié 17 soudures, parmi les soudures des lignes VVP réalisées sur site avec le procédé TIG orbital, qui présentent des défauts de compacité détectés lors des recontrôles par ultrasons (voir le paragraphe 4.2.9).

EDF prévoit, pour ces soudures, d'effectuer des réparations visant à éliminer ces défauts de compacité. L'étendue de ces réparations (locales ou complètes) dépend de l'étendue des défauts de compacité détectés.

Pour ces réparations, EDF prévoit d'utiliser soit le procédé TIG orbital soit les procédés TIG et électrodes enrobées avec l'électrode de désignation commerciale Tenacito-R. Cette dernière fait l'objet d'une qualification visant à démontrer sa capacité à respecter les exigences du référentiel d'exclusion de rupture (cf. paragraphe 8.2.4).

8.1.2. Compacité des soudures

8.1.2.1. *Démarche de l'exploitant*

La démarche de l'exploitant pour garantir la compacité des soudures est similaire à celle décrite au paragraphe 6.3.5 pour les contrôles de fin de fabrication des soudures de traversée. Elle consiste à renforcer les contrôles initialement requis par le code RCC-M pour des équipements de niveau Q1, par des mesures complémentaires afin d'améliorer le niveau de confiance dans la qualité de ces opérations, tel que requis par le référentiel d'exclusion de rupture.

Cette démarche consiste notamment à :

- recontrôler toutes les soudures par ressuage ;
- recontrôler toutes les soudures par ultrasons ;
- relire tous les radiogrammes ;
- renforcer certains paramètres de contrôles par rapport aux requis du code RCC-M ;
- renforcer la surveillance de ces opérations.

Les recontrôles par ultrasons effectués sur les soudures VVP ont été réalisés dans les mêmes conditions que les contrôles de fin de fabrication, complétées par les mesures complémentaires définies dans les documents EDF en référence [54] et [57]. Les principales conclusions de ces recontrôles, reprises aux paragraphes 4.2.9 et 6.3.5.6 sont les suivantes :

- l'ensemble des recontrôles par ressuage n'a pas mis en évidence d'indication ;
- le bilan partiel de la relecture des radiogrammes, transmis par EDF dans son document en référence [55] puis complété par le document en référence [89] indique que des indications ont été détectées dans des soudures classées initialement comme conformes ;
- les recontrôles par ultrasons ont mis en évidence des indications nécessitant une réparation dans 25 des 58 soudures concernées.

8.1.2.2. Avis du rapporteur

Niveaux de garanties apportés par les contrôles non destructifs

L'avis du rapporteur présenté au paragraphe 6.3.5.9 pour les soudures des traversées VVP concernant la garantie, avec un niveau de confiance suffisant, de la conformité des soudures de traversée, est transposable aux soudures réalisées sur site.

Ainsi, les recommandations formulées par le rapporteur aux alinéas *ii* et *iii* du paragraphe 6.3.5.9 s'appliquent également aux soudures VVP réalisées sur site. Elles concernent la justification que les procédés de contrôles non destructifs ont la capacité de détecter et identifier, avec un haut niveau de confiance, les défauts considérés par le fabricant comme inacceptables au regard de la maîtrise de ses procédés de fabrication. .

Concernant les soudures qui devront être réparées ou remises à niveau, le rapporteur considère qu'il est nécessaire qu'elles fassent l'objet des mêmes contrôles non destructifs que lors des contrôles de fin de fabrication, complétés par des mesures supplémentaires permettant d'améliorer le niveau de confiance associé à la mise en œuvre de ces contrôles.

Le rapporteur rappelle que le plan d'actions qui avait été défini en 2018 par EDF dans son document en référence [24] pour pallier les écarts constatés lors de la mise en œuvre de certains de ces contrôles concernait notamment :

- la formation et l'encadrement des opérateurs ;
- l'accompagnement par des experts ;
- des vérifications des paramètres d'étalonnage et de contrôle ;
- la prise en compte des besoins des contrôleurs lors des opérations d'arasage des soudures ;
- l'amélioration de la planification et de la coordination entre les équipes ;
- la facilitation de l'accès aux informations utiles pour les opérateurs ;
- des mises à jour documentaires ;
- le renforcement du contrôle de Framatome et de la surveillance d'EDF.

Le rapporteur considère que les dispositions organisationnelles et de surveillance mises en œuvre lors des recontrôles seraient de nature à apporter des garanties quant à la fiabilité des contrôles mis en œuvre à l'issue des réparations et des remises à niveau.

Pour les mesures concernant les contrôles par ultrasons et par ressuage, le rapporteur considère qu'elles sont de nature à apporter le niveau de confiance associé à la mise en œuvre de ces contrôles.

Pour les mesures concernant les contrôles par radiographie, le rapporteur note qu'elles n'ont consisté qu'en une relecture des radiogrammes sans mise en œuvre de contrôles contradictoires (cf. paragraphe 6.3.5.9). Le bilan présenté par EDF dans les documents en références [55] et [89] montre que la relecture des radiogrammes a conduit à classer certaines des soudures comme « non-conformes » alors que le résultat issu de l'interprétation initiale était « conforme ».

EDF a, dans son projet de position n° 15 figurant dans le document en annexe 13, décrit l'organisation qu'il envisage pour le contrôle non destructif des soudures réparées. Cette organisation reconduit celle mise en place par EDF en 2018 après la découverte d'écarts lors des contrôles de fin de fabrication sur site. Elle a été rappelée par le rapporteur au paragraphe 6.3.5.6. Cette organisation décrit également la nature des actions de contrôle et de surveillance que respectivement le fabricant et l'exploitant doivent mener dans le cadre d'activités importantes pour la protection des intérêts, telles que les contrôles non destructifs. Le rapporteur considère que les actions de contrôle et de surveillance proposées par l'exploitant sont acceptables.

Dans le projet d'action n° 15, le rapporteur note qu'EDF s'engage à rassembler « *dans un courrier en juin 2019 l'ensemble des dispositions prévues pour la mise en œuvre des contrôles non destructifs pour les réparations et remises à niveau des soudures après les essais à chaud.* ».

Toutefois, le rapporteur considère qu'en l'état, les informations transmises par EDF dans son document en annexe 13 nécessitent des précisions en ce qui concerne :

- les actions de surveillance et de contrôle envisagées pour les contrôles par ressuage, notamment leur caractère systématique ou non et la réalisation de contrôles contradictoires ;
- les actions de surveillance et de contrôle envisagées pour les contrôles par radiographie. En effet, le rapporteur note qu'EDF considère que la relecture des radiogrammes n'a pas conduit à « *invalides les interprétations initiales du GMES : pas d'émission de Fiches de Constats d'Ecart ou de Fiches d'Observation.* ». Or un certain nombre d'indications ont été détectées lors de ces relectures (voir le paragraphe 6.3.5.6) et ont conduit à EDF, dans son document en référence [89], à classer ces soudures comme « non-conformes ». Le rapporteur note qu'EDF indique, dans son document en annexe 13 que « *ces interprétations réalisées par un niveau 3 COFREND ont permis de pouvoir corrélérer, pour certaines, la présence ainsi que la nature de l'indication et ce par une expertise très fine des radiogrammes en dehors des critères nominaux applicables du référentiel technique* ». Le constat de cet écart entre les résultats de la relecture initiale des radiogrammes et l'interprétation des contrôles ultrasons, réalisées toutes les deux avec les critères requis par le référentiel technique, conduit le rapporteur à s'interroger sur l'adéquation de ces contrôles par radiographie avec le niveau de confiance attendu pour des soudures en exclusion de rupture.

Dans l'attente de l'instruction des éléments qu'EDF prévoit de transmettre en juin 2019 dans son projet d'action n° 15, et qui devront être complétés par les précisions mentionnées ci-dessus, le rapporteur réserve sa position quant à l'adéquation de ces contrôles non destructifs et leurs conditions de mise en œuvre vis-à-vis du niveau de confiance attendu par la démarche d'exclusion de rupture. Compte tenu des écarts constatés entre l'analyse des radiogrammes et des signaux ultrasonores, le rapporteur souligne l'avantage qu'il y aurait à formaliser dans la stratégie de contrôle, notamment dans le dossier « défauts inacceptables », la complémentarité entre les contrôles par radiographie et par ultrasons.

En conséquence, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 10

Le rapporteur recommande qu'EDF complète le dossier décrivant les dispositions qu'il envisage pour la mise en œuvre des contrôles non destructifs à la suite des réparations et remises à niveau des soudures par les points suivants :

- les actions de surveillance et de contrôle pour les contrôles par ressuage ;
- le renforcement des actions de surveillance et de contrôle permettant de garantir que la mise en œuvre et l'interprétation des radiogrammes apporte le meilleur niveau de confiance attendu vis-à-vis de la compacité de ces soudures.

8.1.3. Cas des soudures qui ont déjà fait l'objet de réparations antérieures

8.1.3.1. *Démarche de l'exploitant*

Dans le document en référence [76], EDF précise que certaines soudures VVP réalisées avec le procédé TIG orbital ont subi des réparations locales avec un procédé de soudage différent de celui mis en œuvre initialement pour la réalisation des passes de remplissage et de finition.

EDF poursuit encore l'inventaire de l'ensemble des écarts et l'établissement des descriptions détaillées de l'état final de l'ensemble des soudures réalisées sur site.

Les réparations listées ci-après ont été établies sur la base du recensement à date effectué par EDF dans le courrier en référence [76].

EDF mentionne que le procédé TIG manuel avec le métal d'apport EMK35Cr a été utilisé pour la réparation de certaines soudures initialement réalisées avec les procédés de soudage TIG manuel (avec le métal d'apport de type EMK35Cr) pour les passes de racine et de soutien et le procédé TIG orbital (avec le métal d'apport DMOI-G) pour les passes de remplissage et de finition.

Pour ces soudures, EDF envisage de maintenir ces réparations locales antérieures réalisées avec le procédé TIG manuel. EDF précise qu'une démonstration sera apportée pour justifier que ces zones réparées respectent les critères du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005.

EDF mentionne que deux configurations peuvent être rencontrées.

Dans un premier cas, le métal d'apport EMK35Cr a été déposé lors d'une réparation située dans la zone de dilution avec le métal d'apport DMOI-G. EDF considère que cette configuration est identique à la celle de la soudure initiale. Ainsi, EDF n'envisage pas d'analyse complémentaire visant à justifier cette zone de dilution (EMK35Cr/DMOI-G) car il considère que cette configuration est couverte par la qualification de mode opératoire de soudage (QMOS).

Dans le second cas, le métal d'apport EMK35Cr a été déposé lors d'une réparation dans les passes de remplissage réalisées avec le métal d'apport DMOI-G (en dehors de la zone de dilution). Dans cette configuration, EDF considère que les caractéristiques mécaniques du métal d'apport EMK35Cr déposé en dehors des passes de racine et de soutien ne sont pas évaluées par la QMOS. En conséquence, EDF prévoit la réalisation d'une maquette de DN 500 réalisée avec le métal d'apport EMK35Cr afin de justifier la conformité du métal déposé sur l'ensemble de la soudure au référentiel d'exclusion de rupture, complété par les spécifications du fabricant.

La justification de la conformité de chaque soudure tiendra compte de la cartographie précise des zones où le métal d'apport EMK35Cr a été déposé. Dans les cas où les zones en EMK35Cr seraient très localisées et de faible épaisseur, la non-contribution de ce métal déposé vis-à-vis du risque de rupture brutale pourrait être valorisée par EDF.

Dans le document en référence [76], EDF précise avoir également identifié un cas particulier de réparation effectuée avec un autre métal d'apport. Il s'agit de la soudure VVP3130TY-F01-1 FW4 réalisée avec le procédé TIG orbital et qui a fait l'objet d'une réparation avec les métaux d'apport EMK35Cr et l'électrode enrobée Univers 2M. EDF précise que les métaux d'apport déposés lors de la réparation initiale seront éliminés.

8.1.3.2. Avis du rapporteur

Le rapporteur considère que la démarche proposée par l'exploitant consistant à maintenir en l'état des zones réparées avec d'autres produits d'apport que ceux mis en œuvre lors du mode opératoire de soudage initial n'est acceptable que si ces matériaux sont suffisamment caractérisés et respectent les exigences d'exclusion de rupture définies lors de la SPN de 2005 complétées par les spécifications du fabricant.

Le rapporteur note qu'EDF prévoit la réalisation d'une maquette de DN 500 réalisée avec le métal d'apport EMK35Cr afin de justifier la conformité du métal déposé sur l'ensemble de la soudure. Le rapporteur considère qu'EDF doit justifier que cette maquette est représentative des soudures faisant l'objet des réparations locales.

EDF a précisé, dans son projet de position n° 16 du courrier en annexe 13, que cette maquette sera réalisée avec le procédé de soudage TIG manuel et le métal d'apport EMK35Cr suivant les paramètres du descriptif de mode opératoire de soudage (DMOS) mis en œuvre lors des réparations sur les soudures VVP. Cette maquette est destinée à évaluer les caractéristiques mécaniques et à quantifier le phénomène de vieillissement sous déformation en peau et en racine de ce produit d'apport dans les conditions de mise en œuvre du DMOS. EDF précise que cette maquette sera réalisée avec une hauteur suffisante pour prélever des éprouvettes uniquement dans ce métal déposé, et que des essais de traction en métal déposé et de résilience en peau permettront de renforcer la connaissance des propriétés mécaniques de ce matériau.

Ainsi EDF s'engage, dans son projet d'action n° 16 du courrier en annexe 13, sur la base des éléments présentés ci-dessus, à justifier que les réparations locales en EMK35Cr n'altèrent pas les propriétés mécaniques des matériaux.

Le rapporteur considère l'engagement d'EDF recevable. Le rapporteur considère que le programme d'essais devra être transmis au préalable à l'ASN et que les résultats de ce programme devront faire l'objet d'une instruction ultérieure.

8.1.4. Phénomène de vieillissement sous déformation affectant les soudures VVP réalisées avec les procédés TIG manuel pour les passes de racine et de soutien et TIG orbital pour les passes de remplissage

8.1.4.1. Rappel concernant le phénomène de vieillissement sous déformation

Des caractéristiques de traction (R_m) mesurées plus élevées à chaud (300 °C) qu'à température ambiante (20 °C) ont été observées sur plusieurs assemblages témoins relatifs aux soudures réalisées sur site (tous procédés confondus), contrairement à ce qui est habituellement constaté. EDF précise dans son courrier en référence [18] que cette inversion, constatée sur certains assemblages témoins est due à l'utilisation de métaux d'apport vraisemblablement sensibles au vieillissement sous déformation.

Comme rappelé au chapitre 4.1, il est considéré, que les choix de conception et de fabrication des lignes secondaires du réacteur EPR de Flamanville doivent amener à une maîtrise du phénomène de vieillissement sous déformation conduisant à un décalage de la courbe de transition en fin de vie du réacteur estimé à 15 °C.

Le choix des métaux d'apport est le facteur principal identifié par l'exploitant dans la mise en évidence du phénomène de vieillissement sous déformation. Ainsi l'analyse est réalisée, dans la suite du rapport, en fonction des métaux d'apport. La mise en œuvre du mode opératoire de soudage pourrait cependant également contribuer à ce phénomène.

La problématique du vieillissement sous déformation est détaillée au paragraphe 4.1.5. Ne sont repris dans ce paragraphe que les éléments spécifiques aux procédés de soudage utilisés pour les soudures VVP réalisées sur site.

Dans son courrier en référence[76], EDF précise que des programmes de quantification du décalage de la courbe de transition lié au vieillissement sous déformation sont prévus pour certains métaux d'apport.

Le paragraphe suivant, précise, pour les matériaux d'apports mis en œuvre pour les soudures réalisées avec le procédé TIG orbital pour les passes de remplissage, la démarche de justification établie par l'exploitant.

8.1.4.2. Démarche d'EDF

Les modes opératoires de soudage utilisés pour la réalisation des soudures VVP réalisées sur site ont été détaillés au paragraphe 2.2.

Les passes de racine et de soutien des soudures VVP réalisées sur site avec le procédé TIG orbital pour les passes de remplissage, ont été réalisées avec un procédé TIG manuel. Le métal d'apport utilisé est de désignation commerciale EMK 35Cr.

Les passes de remplissage et de finition ont été réalisées avec le procédé de soudage TIG orbital avec le matériau d'apport de désignation commerciale DMOI-G.

8.1.4.3. Matériau d'apport EMK35Cr :

Le matériau d'apport EMK35Cr a été mis en œuvre avec le procédé TIG manuel pour les passes de racine et de soutien de certaines soudures.

Cas des soudures pour lesquelles une remise à niveau avec le procédé TIG orbital est envisagée

Dans le cas spécifique des soudures pour lesquelles une remise à niveau avec le procédé TIG orbital est envisagée, les passes de racine et de soutien en EMK35Cr doivent être suffisamment épaisses pour pouvoir mettre en œuvre aisément le procédé TIG orbital et ainsi minimiser le risque de générer des défauts notamment en fond de chanfrein. Pour ces soudures, l'épaisseur des passes de racine et de soutien est estimée par EDF à 8 ± 2 mm.

Cette épaisseur avoisinant la hauteur du défaut conventionnel retenu dans les calculs de mécanique à la rupture brutale, EDF considère que la contribution du matériau des passes de racine et de soutien est équivalente à celle du matériau utilisé pour les passes de remplissage et de finition. Dans ce contexte, EDF prévoit de démontrer, à l'aide d'une maquette de DN 500, que le matériau d'apport EMK35Cr mis en œuvre avec le procédé TIG manuel en passes de racine et de soutien respecte les exigences du référentiel d'exclusion de rupture en matière de caractéristiques mécaniques et précise dans son courrier en référence[76] qu'un programme de quantification du décalage de la courbe de transition fragile-ductile lié au phénomène de vieillissement sous déformation est envisagé pour le fil EMK35Cr.

Cas des réparations par soudage

Certaines soudures ont fait l'objet de réparations antérieures avec des procédés de réparation pouvant différer de ceux utilisés pour le remplissage (se référer au paragraphe 8.1.3). Dans le cas où certaines de ces réparations sont maintenues en l'état, la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation de ces zones réparées doit également être évaluée.

EDF poursuit encore l'inventaire de l'ensemble des écarts et l'établissement des descriptions détaillées de l'état final de l'ensemble des soudures réalisées sur site. EDF a d'ores et déjà identifié des cas de réparation de soudures, initialement réalisées avec le procédé TIG orbital, avec le procédé TIG manuel (métal d'apport EMK35Cr).

Pour les cas où la réparation avec le métal d'apport EMK35Cr est intervenue dans les passes de remplissage (remplies avec le procédé TIG orbital donc), EDF prévoit d'évaluer, comme évoqué plus haut, les caractéristiques mécaniques de ce métal d'apport en réalisant une maquette de DN 500 avec de l'EMK35Cr afin d'évaluer notamment la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation.

La justification finale de la conformité des soudures au référentiel d'exclusion de rupture, qui sera réalisée soudeur par soudeur, valorisera la cartographie précise des zones où le métal d'apport EMK35Cr a été déposé et les résultats de la maquette de DN500. Dans les cas où les zones en EMK35Cr seraient très localisées et de faible épaisseur, la non-contribution de ce métal déposé vis-à-vis de la résistance à la rupture brutale pourrait être valorisée par EDF.

EDF précise dans son projet de position n° 17 du courrier en annexe 13 :

- qu'aucune inversion de R_m n'a été constatée sur les assemblages témoins pour le matériau d'apport EMK35Cr puisque que les épaisseurs déposées ne permettaient pas le prélèvement de traction longitudinale. Ainsi la réalisation de la maquette DN 500 d'une épaisseur de 38 mm entièrement remplie en EMK35Cr est, en particulier, destinée à la quantification du vieillissement sous déformation ;
- que l'absence d'inversion des valeurs de R_m sur les assemblages témoins et les recettes avec le produit d'apport EMK35Cr n'est cependant pas considérée comme une absence de sensibilité au vieillissement sous déformation. Ainsi la quantification du vieillissement sous déformation est réalisée indépendamment de la constatation ou non d'une inversion de R_m .

8.1.4.4. Matériau d'apport DMOI-G :

Dans sa note en référence [76], EDF mentionne le besoin de quantifier par essais le décalage de la courbe de transition fragile-ductile lié au phénomène de vieillissement sous déformation pour le fil DMOI-G utilisé comme métal d'apport pour le procédé TIG orbital.

8.1.4.5. Avis du rapporteur sur les matériaux nécessitant une quantification du phénomène de vieillissement sous déformation

Etat final des soudures

L'analyse de la configuration finale de chacune des soudures est en cours de réalisation par l'exploitant. Cette analyse devra identifier les métaux d'apport mis en œuvre lors du procédé initial de fabrication ainsi que lors des différentes opérations de réparation par soudage. EDF statuera sur la sensibilité de ces matériaux d'apport au phénomène de vieillissement sous déformation et leur impact sur la tenue mécanique des soudures.

Le rapporteur note qu'en fonction de cette analyse, la quantification de la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation pour certains métaux d'apport, pour lesquels EDF ne prévoit pas de programme d'essais, pourrait s'avérer nécessaire.

Métaux d'apports dont EDF a prévu d'évaluer la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation

Le rapporteur considère nécessaire que la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation soit quantifiée, de manière représentative, pour les métaux d'apports DMOI-G et EMK35Cr et que son impact sur la tenue mécanique des soudures soient évalués. Cette quantification est en effet nécessaire pour connaître précisément le décalage de la courbe de transition fragile-ductile, estimé à 15 °C lors de la SPN de 2005.

Le rapporteur note favorablement qu'un programme d'essais visant à quantifier le décalage de la courbe de transition fragile-ductile lié à ce phénomène est prévu par EDF pour ces métaux d'apports.

8.1.4.6. Programme d'essais de quantification du phénomène de vieillissement sous déformation

a) Méthodologie de quantification

Se référer au paragraphe 6.3.4.4.

b) Avis du rapporteur sur la méthodologie de quantification du vieillissement sous déformation

Se référer au paragraphe 6.3.4.4.

Pour couvrir l'effet du vieillissement, il convient de comparer les températures de transition entre l'état initial et l'état vieilli, c'est-à-dire entre la peau externe à l'état brut de soudage de préférence ou, à défaut, à l'état après traitement thermique de détensionnement, et la racine après un écrouissage et un maintien à 250 °C, et cela dans la même section de soudage

A l'instar de la recommandation 5 mentionnée au paragraphe 6.3.4.4, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 11

<p>Le rapporteur recommande qu'EDF détermine le décalage de la température de référence de transition fragile-ductile induit par le vieillissement sous déformation en comparant la courbe de résilience de l'assemblage soudé à l'état initial en peau à celle de l'assemblage soudé à l'état vieilli en racine dans la même section de soudage.</p>
--

Les remarques mentionnées au paragraphe 6.3.4.4 b) relatives à la définition des plans de prélèvements des éprouvettes sont également applicables aux programmes de caractérisation définis pour les métaux d'apport EMK35Cr et DMOI-G.

c) *Programme de quantification du vieillissement sous déformation sur l'EMK35Cr*

Comme précise au paragraphe 6.3.4.2, à ce stade de l'instruction, EDF n'a pas émis de spécification relative aux essais prévus pour caractériser ce phénomène sur le métal d'apport EMK35Cr.

d) *Programme de quantification du vieillissement sous déformation sur le fil DMO-IG*

Programme de l'exploitant

EDF a prévu la réalisation d'une maquette sur un tube de diamètre DN500 et d'épaisseur 38 mm sur le site de Flamanville afin de quantifier le vieillissement sous déformation du fil TIG DMOI-G utilisé pour les passes de remplissages et de finition du procédé TIG orbital. Le type de chanfrein retenu est précisé par la Figure 47. Il est fait également mention, dans la note en référence [22] de l'utilisation de l'assemblage témoin CT 18-0082.



Figure 48 : Chanfrein en U retenu pour la maquette TIG orbital

e) *Compléments apportés par l'exploitant concernant les programmes de quantification du vieillissement sous déformation*

Dans son projet de position n° 18 du courrier en annexe 13, EDF apporte les précisions suivantes :

- la méthode d'écrouissage à 5 % proposée est enveloppe des déformations permanentes pouvant être rencontrées par le matériau en service. Cet écrouissage crée des dislocations en plus de celles déjà créées lors des opérations de soudage (plus particulièrement en racine) ;
- concernant les interstitiels, EDF mentionne que l'azote libre capable de migrer vers les dislocations est lui en quantité finie. Ainsi il conclut que la méthode de quantification du vieillissement sous déformation proposée garantit que l'azote libre disponible peut migrer vers des sites de dislocation aisément accessibles, selon une cinétique très rapide, qui dépend de la densité de dislocation.

EDF précise que la méthode prévue garantit d'atteindre et de converger vers un état de vieillissement enveloppe au regard de ce que pourraient connaître les soudures en service, que ce soit en peau ou en racine. L'exploitant précise également que « *l'effet que peut avoir un changement de diamètre et d'épaisseur entre les soudures est essentiellement lors des opérations de bridage lors de la réalisation des premières passes. Il va ensuite s'estomper lors du remplissage. Il peut donc y avoir un effet potentiellement différent d'écrouissage sur la racine. Pour autant, l'application d'un écrouissage de 5% aura pour effet de générer une abondance de dislocations pour fixer l'azote libre, et donc d'aboutir à un vieillissement maximal. La seule différence pouvant subsister sera liée à l'effet de l'écrouissage lui-même, qui n'est pas lié au vieillissement sous déformation. Ainsi l'épaisseur de la maquette est du second ordre pour la quantification du vieillissement sous déformation.* »

Enfin, l'exploitant mentionne que les éléments de bibliographie montrent que des essais réalisés par le passé étaient le plus souvent sur du métal déposé à plat sur tôles, sans faire de distinction entre racine et peau des soudures, et avec des épaisseurs diverses. EDF considère ainsi que la maquette proposée en DN 500 d'une épaisseur de 32 mm est suffisante pour quantifier le vieillissement sous déformation du métal d'apport DMOI-G de manière représentative par rapport aux soudures de production.

f) *Avis du rapporteur sur les programmes d'essais pour le matériau d'apport DMOI-G*

Pour ce produit d'apport DMOI-G, la maquette choisie, de DN 500 et d'épaisseur 38 mm, n'a pas la même géométrie que celle des soudures VVP qui ont un DN 750 et une épaisseur de 59 mm.

Comme indiqué précédemment, l'effet du vieillissement sous déformation est plus important dans les passes de racine des soudures épaisses. Ainsi le vieillissement « naturel » d'une soudure d'épaisseur 38 mm pourrait être plus faible que celui d'une soudure d'épaisseur 59 mm. L'IRSN considère ne pas disposer des justifications qui indiqueraient que le vieillissement « artificiel » permet d'atteindre le même niveau de vieillissement entre les deux soudures. Aussi, l'IRSN considère la maquette d'épaisseur de 38 mm n'est pas représentative d'une soudure d'épaisseur de 59 mm.

8.1.5. Cas des soudures pour lesquelles des écarts au code RCC-M sont susceptibles de subsister

8.1.5.1. Démarche d'EDF

Dans son courrier en référence [70][76], l'ASN a demandé à l'exploitant de préciser sa démarche de traitement des éventuels écarts au code RCC-M qui ne seraient pas entièrement résorbés par les opérations de réparation ou remise à niveau ainsi que son analyse de leur cumul et de la remise en cause ou non du référentiel d'exclusion de rupture.

EDF, dans son courrier en référence [7], décrit les quatre types d'écarts qui ont été rencontrés lors de la réalisation des soudures VVP soumises au référentiel d'exclusion de rupture et qui, pour la plupart, ont été constatés durant les activités relatives à l'usinage, aux contrôles non destructifs et aux opérations de soudage. Parmi ces écarts, peuvent notamment être relevés :

- les écarts affectant directement les paramètres importants vis-à-vis du risque de rupture brutale (caractéristiques mécaniques, présence de défauts) ;
- les écarts pouvant potentiellement affecter des modes d'endommagement mécaniques autres que la rupture brutale (déformation progressive, instabilité plastique, ...) ;
- les écarts affectant le niveau de confiance (comme les retards dans la réalisation des assemblages témoins) ;
- les écarts considérés « mineurs » (comme les écarts documentaires) qui ne sont pas de nature à affecter les caractéristiques mécaniques des soudures ou le niveau de confiance dans la réalisation.

EDF précise que certains de ces écarts au code RCC-M, ne pourront pas être résorbés lors des opérations de réparation ou de remise à niveau. Pour justifier l'acceptabilité de ces écarts, EDF prévoit :

- une analyse décrivant la typologie des écarts au code RCC-M rencontrés lors de la réalisation des soudures VVP en exclusion de rupture et ne pouvant être résorbés lors des opérations de réparation ou de remise à niveau. Cette analyse est détaillée aux paragraphes 4.1.7.3 et 4.2.10 ;
- d'établir des matrices d'évaluation de la conformité et des fiches d'identité de soudures, de manière cadencée jusqu'au 31 août 2019. Ces documents dresseront la liste des constats et écarts rencontrés sur chacune des soudures VVP en exclusion de rupture, l'analyse de leur cumul et de la remise en cause ou non du référentiel d'exclusion de rupture.

Les paragraphes suivants ont pour objectif de décrire les types d'écarts identifiés à ce stade et nécessitant une attention particulière, le traitement prévu par l'exploitant ainsi que l'analyse de la remise en cause ou non du référentiel d'exclusion de rupture.

8.1.5.2. Disposition du paragraphe S7610 du code RCC-M

Comme rappelé au paragraphe 4.2.8, l'étendue des réparations calculée par EDF sur certaines soudures réalisées avec le procédé TIG orbital, comme par exemple pour la soudure VVP FW12, est supérieure aux critères définis par le paragraphe S7610 du code RCC-M.

EDF considère cependant que le procédé TIG orbital n'est pas un procédé « automatique » mais un procédé partiellement mécanisé (ou semi-automatique) tel que le définit le paragraphe S1500 du code RCC-M. Ainsi EDF conclut à la non applicabilité aux soudures réalisées selon le procédé TIG orbital, des dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M.

8.1.5.3. Position du rapporteur vis-à-vis du paragraphe S7610 du code RCC-M

L'objectif des dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M, issues d'une exigence initialement définie dans l'arrêté du 24 mars 1978 en référence [77], est de réparer en totalité les soudures faites avec un procédé automatique lorsque les indications détectées peuvent conduire à des réparations dont l'étendue dépasse le cinquième de sa longueur sur au moins la moitié de son épaisseur. Cette réparation complète permet notamment de s'affranchir de questionnements sur la capacité des contrôles non destructifs à détecter de manière exhaustive des défauts en grand nombre.

Or, lors de la mise en œuvre d'un procédé de soudage tel que le TIG orbital, pour lequel la source d'énergie et l'alimentation du métal d'apport ne sont pas guidées directement par l'opérateur, le soudeur ne peut assurer une maîtrise permanente de son bain de fusion et ne peut corriger rapidement les réglages de sa machine lorsqu'il constate une situation anormale. Cela peut alors conduire à la génération de nombreux défauts.

Il a d'ailleurs été constaté sur les circuits secondaires principaux du réacteur EPR de Flamanville, tel que rappelé au paragraphe 4.2.8, que la longueur moyenne d'un défaut issu du procédé TIG orbital est supérieure à celle d'un défaut issu du procédé TIG et électrodes enrobées. Le rapporteur considère donc que l'application des dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M au procédé TIG orbital, à l'instar de ce qui était prescrit dans l'arrêté « soudage » du 24 mars 1978, est pertinente d'un point de vue technique dans un grand nombre de cas rencontrés. Une telle application est notamment un bon moyen de s'affranchir d'un doute résiduel lié à la capacité des contrôles non destructifs à détecter de manière exhaustive les défauts de compacité. Le rapporteur considère donc que la non-application des dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M aux soudures réalisées avec le procédé TIG orbital est de nature à remettre en question la confiance dans l'atteinte effective des bonnes propriétés, notamment de compacité, des soudures concernées.

Néanmoins, et dans le cas où l'exploitant apporterait les éléments techniques probants répondant à l'objectif recherché, tels que précisés ci-dessous, le rapporteur considère que l'écart au paragraphe S7610 du code RCC-M pourrait ne pas remettre en cause le respect des objectifs du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005.

En ce sens, comme précisé au paragraphe 8.1.2, le rapporteur considère que des éléments de justification complémentaires devront être apportés par l'exploitant afin de garantir que les procédés de contrôle non destructifs, notamment volumiques, mis en œuvre lors des contrôles de fin de fabrication ont la capacité de détecter et d'identifier, avec un haut niveau de confiance, les indications possédant les caractéristiques considérées par le fabricant comme inacceptables au regard de la maîtrise de ses procédés de fabrication (cf. recommandation n° 6). Si l'exploitant n'apporte pas de tels éléments de justification, le rapporteur considère que l'exploitant devra se conformer aux dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M.

En conséquence, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 12

En lien avec la recommandation n° 6, le rapporteur recommande qu'EDF apporte les justifications attendues concernant les performances des procédés de contrôle non destructifs mis en œuvre lors des contrôles de fin de fabrication. A défaut, le rapporteur considère que l'exploitant devra se conformer aux dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M.

8.1.5.4. Désalignement

Le paragraphe F4360b du code RCC-M requiert que « *Lorsque les dénivellations, aussi bien intérieures qu'extérieures, dépassent les valeurs données en F 4320 et F 4330, les surfaces seront raccordées sur une longueur égale à 4 fois la hauteur de la dénivellation (ou 3 fois pour les joints circulaires) conformément aux prescriptions des B, C et D 3353 du TOME I* ».

Ces conditions n'ont pas été respectées sur au moins une des soudures VVP, en l'occurrence la soudure FW7 du train 4 avec un désalignement de 4 mm.

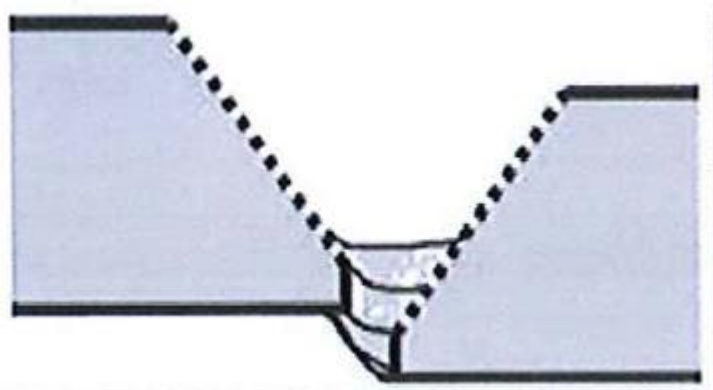


Figure 49 : Schématisation du désalignement

EDF a rappelé dans son projet de position n° 20 figurant dans le document en annexe 13 les arguments présentés à l'ASN lors de la reprise du soudage de cette soudure. Ces arguments concernaient :

- la justification de l'absence de dommage vis-à-vis de la déformation progressive par le calcul des indices de contrainte tel que prévu dans le paragraphe B3683 du code RCC-M ;
- le maintien des performances des contrôles volumiques dans ces zones de désalignement justifié dans le document en référence [100].

EDF en conclut, dans le document en référence [100], que l'absence de dommage et le maintien des performances des contrôles volumiques dans ces zones sont garantis.

8.1.5.5. Avis du rapporteur

Ces dispositions de fabrication ont pour but d'optimiser les conditions de soudage afin d'obtenir une soudure de qualité.

L'écart de désalignement est susceptible d'engendrer:

- une amplification des coefficients de contrainte qui impacte alors la prévention des dommages vis-à-vis de la déformation progressive ;
- une altération de la contrôlabilité de la soudure dans la zone affectée par le désalignement.

Le rapporteur considère que la démarche proposée par EDF lors de l'instruction de la reprise du soudage de la soudure FW7 train 4 est recevable pour ce qui concerne la justification de l'absence de dommage vis-à-vis de la déformation progressive. Elle devra être mise en œuvre systématiquement lors de la rédaction des matrices de conformité pour les soudures concernées par cet écart.

Comme déjà indiqué au paragraphe 6.3.5.8 pour les soudures de traversée, le rapporteur considère que la justification de l'absence d'altération de la contrôlabilité en présence de désalignement est incomplète car les arguments présentés, notamment dans le projet de position n° 20 du document en annexe 13, concernent la vérification du bon couplage acoustique du capteur avec la surface externe et l'identification des échos de géométrie, et n'apportent pas d'éléments concernant la capacité à détecter des indications situées au voisinage de ces zones en paroi interne.

En conséquence, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 13

Le rapporteur recommande que l'exploitant justifie, pour les soudures réalisées avec le procédé TIG orbital mais également avec les autres procédés de soudage, et impactées par un écart de désalignement, l'absence d'impact de ces dénivellations et des éventuelles autres imperfections géométriques sur les performances des contrôles volumiques ainsi que l'absence d'impact d'une amplification potentielle des coefficients de contrainte sur la prévention des dommages vis-à-vis de la déformation progressive.

8.1.6. Principales conclusions pour les soudures réalisées avec le procédé TIG orbital

Certaines soudures des lignes VVP du réacteur EPR de Flamanville réalisées sur site avec le procédé TIG orbital sont impactées par des défauts de compacité. EDF envisage une réparation de ces soudures.

Le rapporteur considère que la démarche globale proposée par l'exploitant ayant pour objectif de répondre aux exigences d'exclusion de rupture définies à la suite de la SPN de 2005 et aux spécifications du fabricant est acceptable sous réserve que les points suivants soient justifiés.

Caractéristiques mécaniques

Le rapporteur constate que des programmes d'essais de caractérisation, dont la représentativité doit être démontrée, sont prévus par l'exploitant afin de déterminer les propriétés mécaniques de certains matériaux. Le rapporteur considère que ces programmes, incluant notamment la caractérisation de la sensibilité du phénomène de vieillissement sous déformation doivent être étendus à tous les matériaux d'apports présents dans la configuration finale de chaque soudure.

Propriétés de compacité

S'agissant des propriétés de compacité, à l'instar des éléments décrits au chapitre 6, le rapporteur constate que la capacité des procédés de contrôles volumiques à détecter avec un haut niveau de confiance les défauts définis comme inacceptables par le fabricant au regard de la maîtrise de ses procédés de fabrication n'est pas acquise et doit donc faire l'objet de justifications complémentaires.

Etat final des soudures

Le rapporteur rappelle que la conformité des soudures ne pourra être établie, soude par soude, qu'une fois le recensement de l'ensemble des écarts et l'analyse de l'impact de ceux qui ne pourront être résorbés auront été achevés par l'exploitant.

8.2. Remise à niveau des soudures non conformes au référentiel d'exclusion de rupture

L'exploitant considère que les procédés de soudage TIG manuel et TIG et électrodes enrobées, associés à leurs métaux d'apports respectifs EML5 d'une part et Cymeta et Univers 2M d'autre part, se sont révélés inadaptés pour répondre aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005 complété par les exigences spécifiées par le fabricant.

EDF envisage par conséquent une remise à niveau des soudures concernées. Cette remise à niveau consiste à affouiller l'ensemble des passes de remplissage et de finition, à conserver les passes de racine et de soutien puis à réaliser de nouveau les passes de remplissage et de finition en utilisant un mode opératoire de soudage conforme au référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005.

Dans le document en référence [5], EDF précise les opérations de remise à niveau envisagées qui comprennent :

- une remise à niveau avec le procédé TIG orbital de 6 soudures initialement réalisées avec les procédés TIG et électrodes enrobées ;
- une remise à niveau avec le procédé TIG et électrodes enrobées (électrode enrobée de désignation commerciale Tenacito-R, pour laquelle EDF prévoit de démontrer sa capacité à respecter le référentiel d'exclusion de rupture) de 22 soudures initialement réalisées avec les procédés TIG et électrodes enrobées (électrodes enrobées de désignation commerciale Univers 2M ou Cymeta) ;
- la remise à niveau avec les procédés TIG et électrodes enrobées (Tenacito-R) de 2 soudures initialement réalisées avec le procédé TIG manuel.

Par son courrier du 29 janvier 2019 en référence [95], EDF souhaite limiter l'utilisation du procédé TIG orbital aux seules soudures pour lesquelles ce procédé présente de grands avantages en termes de réalisation sur site, et cela en raison notamment des compétences disponibles. Ainsi les répartitions mentionnées ci-dessus sont susceptibles d'évoluer.

8.2.1. Conservation des passes de racine et de soutien lors des affouillements

EDF indique qu'il souhaite conserver les passes de racine et de soutien des soudures qui seront remises à niveau, de manière à conserver l'alignement des tronçons de tuyauteries raccordées. En effet une perte de cet alignement complexifierait grandement les opérations de remise à niveau des soudures.

Dans son courrier en référence [76], EDF distingue deux situations.

La première situation concerne les soudures qui feront l'objet d'une remise à niveau avec le procédé TIG orbital. Pour ces soudures, les passes de racine et de soutien doivent être suffisamment épaisses pour minimiser le risque de générer des défauts de compacité en mettant en œuvre le procédé TIG orbital. L'exploitant estime qu'il est ainsi nécessaire de conserver une épaisseur pour ces passes racine et de soutien de $8 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. Pour ces soudures, l'épaisseur des passes de racine et de soutien est donc proche de la hauteur du défaut conventionnel considéré dans les calculs de rupture brutale (10 mm). Ainsi, EDF précise qu'il sera démontré que le matériau EMK35Cr utilisé en passe de racine et de soutien de ces soudures respecte les exigences du référentiel d'exclusion de rupture en termes de caractéristiques mécaniques puisque, vis-à-vis du risque de rupture brutale, la contribution de ce matériau est équivalente à celle du matériau utilisé pour les passes de remplissage et de finition.

La seconde situation concerne les soudures qui vont faire l'objet d'une remise à niveau avec les procédés TIG et électrodes enrobées avec l'électrode Tenacito-R, pour lequel l'exploitant démontrera sa capacité à respecter les exigences d'exclusion de rupture définies lors de la SPN de 2005 complétées par les spécifications du fabricant. Les passes de racine et de soutien de ces soudures ont été initialement réalisées avec le procédé TIG manuel et les produits d'apports EML5 ou EMK35Cr. Les passes de remplissages de ces soudures ont été réalisées avec le fil d'apport EML5 ou les électrodes enrobées Univers 2M et Cymeta. EDF prévoit pour ces soudures une remise en conformité qui consiste à supprimer l'ensemble des passes de remplissage et de finition et à conserver une partie des passes de racine et de soutien sur une épaisseur (visée) de 5 mm.

EDF souhaite justifier le maintien en l'état de ces 5 mm de passes de racine et de soutien en considérant cette épaisseur faible par rapport à la hauteur du défaut conventionnel hypothétique considéré dans les calculs de rupture brutale. Ainsi, d'un point de vue mécanique, EDF considère que la matière laissée en l'état dans les passes de racine et de soutien ne contribue pas significativement à la résistance à la rupture brutale de la soudure et qu'il n'est donc pas nécessaire que cette matière respecte l'ensemble des exigences requises par le référentiel d'exclusion de rupture.

Pour ces soudures, EDF précise que des résidus de passes en électrodes enrobées réalisées avec les matériaux d'apport Cymeta et Univers 2M pourront subsister après les affouillements.

8.2.2. Présence de résidus d'électrodes enrobées après affouillement

Dans son courrier en référence [76], EDF précise que des dispositions pratiques seront mises en œuvre pour s'assurer de la suppression des passes de soudage initialement réalisées avec les électrodes enrobées de désignations commerciales Univers 2M et Cymeta lors de l'affouillement des soudures. Néanmoins EDF mentionne qu'il ne peut être exclu qu'il puisse subsister des résidus de ces électrodes et que l'absence d'impact de ces résidus vis-à-vis du risque de rupture brutale sera justifiée sur la base de leur épaisseur au regard de l'épaisseur du défaut hypothétique considéré dans les calculs de rupture brutale. Dans son courrier en référence [76], EDF précise que les propriétés mécaniques et métallurgiques de ces zones singulières sont influencées d'une part par la composition chimique obtenue et d'autre part par la microstructure de la zone fondue.

Dans la note en référence [85], le fabricant Framatome justifie l'absence d'impact d'un point de vue métallurgique de la présence de ces résidus. Le fabricant mentionne que les seules différences significatives relatives à la composition chimique, entre les électrodes Univers 2M et Cymeta et l'électrode Tenacito-R, proviennent des valeurs en manganèse plus élevée et de teneurs en molybdène plus faibles que l'électrode Tenacito-R. Dans cette note, le fabricant mentionne que les zones de dilution, constituées d'un mélange de ces deux électrodes, seront de faible étendue et de faible pénétration. Le fabricant précise que la refusion de la zone concernée, lors de la mise en œuvre de l'électrode enrobée Tenacito-R permettra de rétablir les compositions chimiques visées par l'utilisation de l'électrode enrobée Tenacito-R.

Il précise également que les microstructures seront celles qualifiées par le mode opératoire de soudage de réparation.

Ainsi, la note du fabricant en référence[85] conclut, dans les deux cas, qu'ils s'agisse de résidus d'électrode enrobée Univers 2M ou encore d'électrode enrobée Cymeta, et dans la mesure où le mode opératoire de réparation permet de limiter le nombre de zones présentant des résidus, que la présence de zones de dilution issues du mode opératoire initial de faible étendue et de faible pénétration n'est pas de nature à remettre en cause les microstructures et les propriétés métallurgiques et mécaniques de la soudure après remise à niveau. Les expertises métallurgiques qui seront réalisées après affouillements et avant réparation permettront de garantir l'absence de zone de dilution de forte étendue.

8.2.3. Avis du rapporteur

La démarche présentée par l'exploitant concernant le maintien en l'état des passes de racines et de soutien n'appelle pas de remarque du rapporteur.

Concernant les résidus d'électrodes enrobées Cymeta et Univers 2M qui pourraient subsister après les affouillements, le rapporteur considère que l'exploitant doit définir, en préalable aux affouillements, des critères d'acceptation des zones de dilution, en terme d'étendue et de pénétration permettant de considérer l'influence de ces résidus sur les propriétés de la soudure négligeable. L'exploitant devra garantir que la hauteur de ces zones de dilution associées aux épaisseurs des matériaux d'apports initialement déposées dans les passes de racine et de soutien des soudures ne dépassent pas l'épaisseur visée de 5 mm et que la partie de la soudure comprenant les zones de dilution en électrodes enrobées et les passes de racine et de soutien réalisées en TIG manuel ne remet pas en cause la résistance à la rupture brutale des soudures.

EDF a précisé, dans son projet de position n° 21 du courrier en annexe 13, avoir prévu de définir, avant août 2019, des critères opérationnels qui permettront de garantir l'élimination autant que possible des résidus. EDF vise à conserver une hauteur de passes de racine et de soutien de 5 mm au maximum. Il mentionne que les soudures seront remise à niveau avec les matériaux d'apports Tenacito-R ou DMOI-G qui ont des caractéristiques mécaniques satisfaisant les exigences d'exclusion de rupture et ne présentent donc pas de risque particulier de rupture fragile. EDF mentionne les deux cas particuliers suivants :

- concernant les soudures ayant des passes de racine et de soutien en EMK35Cr, seuls quelques résidus d'électrode enrobée sont susceptibles d'être présents à l'interface avec les passes de remplissage. Ces zones situées dans l'épaisseur, à 5 mm de la surface intérieure, seront de dimensions très limitées et seront entourées de matériau présentant des propriétés conformes au référentiel technique applicable, ce qui garantit l'absence de risque particulier vis-à-vis de la rupture brutale ;
- concernant les soudures ayant des passes de racine et de soutien en EML5, qui vérifie les requis du RCC-M niveau 1, la courbe de ténacité définie pour les soudures vérifiant ces requis est applicable. Pour les analyses de nocivité de défauts des lignes VVP en racine, il a été vérifié que le défaut conventionnel de 10 mm de profondeur est systématiquement justifié à la fois dans le domaine fragile et ductile. Aussi, considérant une hauteur de passe de 5 mm au maximum, un défaut hypothétique situé dans ces passes serait couvert par la justification précédente.

EDF précise également, dans le cas hypothétique d'un défaut de 5 mm ou moins qui n'aurait pas été détecté et qui aurait amorcé, que le matériau associé aux passes de remplissage (électrode enrobée Tenacito-R ou fil DMOI-G) présente des propriétés ductiles sur l'ensemble du domaine de fonctionnement suffisantes pour arrêter un éventuel amorçage dans le domaine ductile et dans le domaine fragile du matériau des passes de racine et de soutien.

Sur la base de ces éléments, EDF conclut que l'éventuelle présence dans les soudures remises à

niveau de résidus d'électrodes enrobées et de passes de racine et de soutien réalisées en TIG manuel ne remet pas en cause la résistance de ces soudures à la rupture brutale.

Le rapporteur considère que l'engagement d'EDF concernant la définition de critères opérationnels pour l'élimination et l'acceptation des résidus en ce qui concerne les zones de dilution est recevable. Le rapporteur considère néanmoins que l'argumentaire mentionné ci-dessus relatif à l'absence de rupture fragile et à l'absence de propagation d'un défaut potentiel devront faire l'objet d'un complément d'instruction.

8.2.4. Qualification d'une nouvelle électrode enrobée pour le procédé de réparation TIG et électrodes enrobées

8.2.4.1. Dossier de qualification

Dans son document en référence [95], EDF a informé l'ASN de son souhait de qualifier une nouvelle électrode enrobée de dénomination commerciale Tenacito-R pour les réparations et les remises à niveau des soudures. Cette électrode a déjà été utilisée par le passé dans des configurations similaires, notamment pour des soudures de tuyauteries VVP en P280GH lors de remplacements de générateurs de vapeur.

Les critères définis par EDF pour prononcer l'acceptabilité du mode opératoire utilisant les procédés TIG et électrode enrobée Tenacito-R sont les critères suivants :

- KV individuel à -20 °C supérieur à 47 J;
- KV moyen à 0 °C supérieur à 100 J;
- Rp0.2 à 20 °C supérieur à 335 MPa ;
- R_m à 20 °C compris entre 490 MPa et 630 MPa ;
- A% à 20 °C supérieur à 21% ;
- Rp0.2 à 300 °C supérieur à 230 MPa ;
- R_m à 300 °C supérieur à 390 MPa.

En complément, EDF précise dans son courrier en référence [76], que la caractérisation, pour l'électrode Tenacito-R, de sa sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation est prévue. Ce point fait l'objet du paragraphe 8.1.3.

Le dossier de qualification que prévoit l'exploitant est précisé dans le document en référence [96]. EDF y stipule que cette démarche sera effectuée selon les dispositions du paragraphe S5000 du code RCC-M, à savoir :

- l'élaboration, par le fournisseur de matériau, d'une fiche technique de qualification ;
- la réalisation d'essais sur assemblages conventionnels afin de démontrer l'aptitude de l'électrode enrobée Tenacito-R à respecter les exigences du référentiel d'exclusion de rupture dans des conditions représentatives de la mise en œuvre de ce métal d'apport pour les réparations et remises à niveau des soudures VVP. La spécification des essais est présentée dans la note Framatome en référence [86].
- la réalisation d'une qualification de mode opératoire de soudage (QMOS).

En complément de ces éléments, EDF s'est engagé dans son document en référence [76] à :

- établir une note de synthèse sur le retour d'expérience de Framatome concernant l'électrode enrobée Tenacito-R basée d'une part sur les QMOS et les assemblages témoins en lien avec les remplacements de générateurs de vapeur du parc électronucléaire français ayant employé cette électrode, et d'autre part sur des éléments bibliographiques ;
- réaliser au premier semestre 2019 des essais complémentaires aux essais conventionnels afin d'appréhender au mieux l'influence de certains paramètres de soudage (comme la hauteur de passe) sur les propriétés des soudures réalisées avec l'électrode Tenacito-R et ainsi apporter un niveau de confiance supplémentaire dans le fait que l'application de ce métal d'apport satisfera les exigences du référentiel d'exclusion de rupture.

8.2.4.2. Note de synthèse relative au retour d'expérience de Framatome sur les électrodes enrobées Tenacito-R

La note de synthèse, relative au retour d'expérience de Framatome en référence [87], a été transmise le 15 février 2019. Dans cette note, le fabricant conclut que l'ensemble des éléments techniques examinés démontrent que l'électrode enrobée de désignation commerciale Tenacito-R permet d'atteindre les spécifications du fabricant pour les soudures VVP en exclusion de rupture.

Le fabricant précise que l'atteinte de ces critères passe notamment par l'application des recommandations opératoires suivantes :

- l'utilisation de métaux d'apport disposant d'un taux de manganèse élevé (supérieur ou égal à 1,4%) ;
- une mise en œuvre encadrée par des précautions opératoires pour certaines positions de soudage, tel que précisé dans l'annexe E de la note Framatome en référence [87], visant à favoriser une bonne recristallisation des passes. Peuvent être citées les précautions opératoires concernant :
 - les apports de chaleur mis en œuvre ;
 - le diamètre d'électrode à utiliser (3,2 mm) ;
 - l'épaisseur maximale des couches ;
 - le séquençement dans la réalisation des différentes séquences de soudage.

Le fabricant mentionne que les essais complémentaires définis dans le document en référence [86] viseront à renforcer la connaissance du comportement du métal déposé dans le cadre de la réalisation du dossier de qualification de l'électrode enrobée Tenacito-R et viendront compléter les données issues du retour d'expérience.

8.2.4.3. Avis du rapporteur

Le rapporteur considère que l'exploitant doit pouvoir justifier dans son dossier de qualification que le mode opératoire de soudage est robuste et qu'il permet, dans les conditions d'utilisation prévues sur le chantier de l'EPR de Flamanville, d'atteindre les exigences, notamment mécaniques, requises par le référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005, complété par les spécifications de l'exploitant et du fabricant.

La mise en œuvre des recommandations opératoires mentionnées plus haut constitue un élément complémentaire permettant de renforcer la confiance dans la reproductibilité du mode opératoire de soudage et l'atteinte des exigences requises. Le rapporteur considère que l'exploitant doit apporter la preuve que ces recommandations opératoires, ont bien été mises en œuvre lors des opérations de remise à niveau. L'exploitant a précisé, lors de la réunion préparatoire du 12 mars 2019, que des dispositions techniques seraient mises en œuvre afin d'assurer la traçabilité de la mise en œuvre de ces recommandations opératoires.

A l'issue de la réalisation du dossier de qualification ainsi que des essais complémentaires, l'exploitant devra confirmer les éléments techniques issus du retour d'expérience.

Comme précisé au paragraphe suivant, le rapporteur considère que la maîtrise du phénomène de vieillissement sous déformation conduisant à un décalage de la courbe de transition en fin de vie du réacteur estimé à 15 °C doit être un élément apporté par le dossier de qualification.

Le rapporteur formule ainsi la recommandation suivante :

Recommandation n° 14

Le rapporteur considère que l'exploitant doit pouvoir justifier que les assemblages soudés réalisés pour la qualification de l'électrode enrobée Tenacito-R selon les dispositions du paragraphe S5000 du code RCC-M ainsi que les assemblages soudés réalisés pour la qualification du mode opératoire de soudage selon les dispositions paragraphe S3000 du code RCC-M permettent d'atteindre les exigences mécaniques requises par le référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005 complété par les spécifications du fabricant.

Pour les recommandations opératoires mises en œuvre lors des qualifications selon les paragraphes S3000 et S5000 du code RCC-M, le rapporteur considère qu'EDF doit également toutes les mettre en œuvre pour les remises à niveau des soudures de production.

Par ailleurs, pour l'ensemble des recommandations opératoires susceptibles d'être mises en œuvre pour les opérations de remise à niveau, le rapporteur recommande qu'EDF prévoit une traçabilité suffisante pour justifier que ces recommandations opératoires ont bien été mises en œuvre.

8.2.5. Compacité des soudures

L'analyse menée par le rapporteur est celle décrite dans le chapitre 8.1.2.

8.2.6. Phénomène de vieillissement sous déformation affectant les soudures VVP remises à niveau

La problématique de vieillissement sous déformation est rappelée au paragraphe 8.1.4.

8.2.6.1. Démarche d'EDF de remise à niveau des soudures en fonction des matériaux d'apport mis en œuvre initialement sur les soudures VVP réalisées sur site

Les passes de racine et de soutien des soudures VVP, dont une remise à niveau des passes de remplissage et de finition est prévue par EDF, ont été réalisées avec un procédé TIG Manuel. Les métaux d'apport utilisés ont les désignations commerciales EMK35Cr et EML5.

Les passes de remplissage et de finition de ces soudures ont été réalisées avec les procédés de soudage suivants :

- le procédé électrode enrobée avec les matériaux d'apports de désignation commerciale Univers 2M et Cymeta ;
- le procédé TIG manuel avec le matériau d'apport de désignation commerciale EML5.

8.2.6.2. Matériau d'apport EMK35Cr :

Se référer au paragraphe 8.1.4.3.

8.2.6.3. Matériau d'apport EML5 :

Le matériau d'apport EML5 a été mis en œuvre avec le procédé TIG manuel sur les passes :

- de racine et de soutien de certaines soudures ;
- de remplissage et de finition des deux soudures de raccordement entre les piquages des tuyauteries principales VVP (DN 750) et les soupapes vapeur (DN 200) du train 1.

Comme précisé au paragraphe 8.2 les passes de remplissage et de finition réalisées avec le matériau d'apport EML5 feront l'objet d'une remise à niveau avec un mode opératoire de soudage conforme au référentiel d'exclusion de rupture.

Concernant les passes de racine et de soutien réalisées avec le produit d'apport EML5 qui seront laissées en l'état, EDF précise, dans son courrier en référence [76], sa démarche de traitement des écarts. Pour les soudures concernées, EDF prévoit une remise à niveau des passes de remplissage et de finition avec un mode opératoire de soudage respectant les exigences du référentiel d'exclusion de rupture tout en conservant les passes de racine et de soutien réalisées avec le métal d'apport EML5 sur une épaisseur visée est de 5mm. Pour chacune de ces soudures, EDF précise qu'il sera confirmé que l'épaisseur conservée est suffisamment faible par rapport à la hauteur du défaut hypothétique considéré dans les calculs de rupture brutale. Ainsi, d'un point de vue mécanique, EDF considère que la contribution à la résistance à la rupture brutale de cette épaisseur n'est pas significative et qu'il n'est donc pas nécessaire que les passes de racine et de soutien en EML5 laissés en l'état respectent entièrement l'ensemble des requis en matière de caractéristiques mécaniques prévus par le référentiel d'exclusion de rupture.

EDF conclut ainsi qu'il n'est pas nécessaire d'évaluer précisément le phénomène de vieillissement sous déformation pour ce produit d'apport.

8.2.6.4. Matériau d'apport Univers 2M et Cymeta :

Les matériaux d'apports Cymeta et Univers 2M ont été utilisés pour les passes de remplissage et de finition des soudures VVP réalisées avec les procédés TIG et électrode enrobée.

Dans sa note en référence [76], EDF mentionne que :

- l'électrode enrobée de désignation commerciale Univers 2M sera éliminée lors des remises à niveau de soudures. Ainsi EDF estime que la quantification du décalage de la courbe de transition fragile-ductile lié au phénomène de vieillissement sous déformation n'est pas nécessaire. Cependant, EDF précise que cette quantification est prévue au titre du retour d'expérience ;
- l'électrode enrobée de désignation commerciale Cymeta sera éliminée lors des remises à niveau des soudures. Ainsi EDF ne prévoit pas de quantifier le décalage de la courbe de transition fragile-ductile lié au phénomène de vieillissement sous déformation.

EDF mentionne que des dispositions pratiques seront mises en œuvre pour s'assurer du retrait du métal déposé à l'électrode enrobée (Univers 2M et Cymeta) lors des opérations de remise à niveau des soudures par usinage. Néanmoins, EDF précise qu'il ne peut être exclu qu'il puisse subsister des résidus et que l'absence d'impact de ces résidus vis-à-vis de la résistance à la rupture brutale sera justifiée sur la base de leur épaisseur au regard de l'épaisseur du défaut hypothétique considéré dans les calculs de rupture brutale.

Un argumentaire justifiant l'absence d'impact d'un point de vue métallurgique de ces résidus, présents dans la même zone que le procédé de soudage avec l'électrode Tenacito-R (zone de dilution), a été transmis par EDF dans la note en référence [85]. Ce point fait l'objet du paragraphe 8.2.2.

8.2.6.5. Avis du rapporteur

Etat final des soudures

L'analyse de la configuration finale de chacune des soudures est en cours de réalisation par l'exploitant. Cette analyse devra identifier les métaux d'apport mis en œuvre lors du procédé initial de fabrication ainsi que lors des différentes opérations de réparations par soudage. EDF statuera sur la sensibilité de ces matériaux d'apport au phénomène de vieillissement sous déformation et leur impact sur la tenue mécanique des soudures.

Le rapporteur note qu'en fonction de cette analyse, la quantification de la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation pour certains métaux d'apport, pour lesquels EDF ne prévoit pas de programme d'essais, pourrait s'avérer nécessaire.

Métaux d'apports pour lesquels EDF n'a pas prévu d'évaluer la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation

EDF considère que pour les métaux d'apport Cymeta, Univers 2M ou encore EML5, seuls des résidus ou des faibles épaisseurs de passes de racine et de soutien sont susceptibles d'en contenir dans les soudures après les remises à niveau envisagées. EDF prévoit de justifier que ces résidus et faibles épaisseurs de passes de racine et de soutien ne contribuent pas significativement à la résistance à la rupture brutale des soudures concernées.

S'il s'avérait néanmoins, après analyse, que la résistance à la rupture brutale des soudures remises à niveau se trouve impactée par la présence de ces résidus ou faibles épaisseurs de passes de racine et de soutien, le rapporteur considère alors que des programmes d'essais sont nécessaires pour caractériser la sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation des matériaux d'apport Cymeta, Univers 2M et EML5.

8.2.6.6. Quantification du phénomène de vieillissement sous déformation

a) Méthodologie de quantification

Se référer au paragraphe 6.3.4.4.

b) Avis du rapporteur sur la méthodologie de quantification du vieillissement sous déformation

Se référer au paragraphe 6.3.4.4.

Pour couvrir l'effet du vieillissement, il convient de comparer les températures de transition entre l'état initial et l'état vieilli, c'est-à-dire entre la peau externe à l'état brut de soudage de préférence ou, à défaut, à l'état après traitement thermique de détensionnement, et la racine après un écrouissage et un maintien à 250 °C, et cela dans la même section de soudage

A l'instar de la recommandation 5 mentionnée au paragraphe 6.3.4.4, le rapporteur formule la recommandation suivante :

Recommandation n° 15

Le rapporteur recommande qu'EDF détermine le décalage de la température de référence de transition fragile-ductile induit par le vieillissement sous déformation en comparant la courbe de résilience de l'assemblage soudé à l'état initial en peau à celle de l'assemblage soudé à l'état vieilli en racine dans la même section de soudage.

Les remarques mentionnées au paragraphe 6.3.4.4 b) relatives à la définition des plans de prélèvements des éprouvettes sont également applicables aux programmes de caractérisation définis pour les métaux d'apport Cymeta, Univers 2M et EML5.

c) Programme de quantification du vieillissement sous déformation sur l'EMK35Cr

Comme précise au paragraphe 6.3.4.4., à ce stade de l'instruction, EDF n'a pas émis de spécification relative aux essais prévus pour caractériser ce phénomène sur le métal d'apport EMK35Cr.

d) Programme de quantification du vieillissement sous déformation sur l'électrode enrobée Univers 2M

Programme de l'exploitant

Comme précisé au paragraphe 8.2.6.4, EDF estime que la quantification du décalage de la courbe de transition fragile-ductile lié au phénomène de vieillissement sous déformation n'est pas nécessaire pour cette électrode mais prévoit néanmoins une quantification au titre du retour d'expérience afin notamment de comprendre le phénomène et d'appuyer le dossier de rupture brutale des lignes ARE.

Pour caractériser l'électrode enrobée de désignation commerciale Univers 2M, EDF avait initialement prévu la réalisation d'essais de résilience sur une maquette et sur les chutes d'un assemblage témoin. La maquette (référéncée DTICM-3853) a été réalisée par le centre technique de Framatome de St Marcel, sur un tube roulé-soudé en acier de nuance P355NH, de diamètre extérieur 763 mm et d'épaisseur 41 mm. Le chanfrein retenu est identique à celui des soudures de production suivant la spécification du sous-traitant (cf. Figure 47). Lors de la réalisation des premiers essais de traction à 20 °C et à 300 °C sur la maquette, aucune inversion de R_m n'a été observée. EDF conclut que le métal fondu de cette maquette ne présente pas de sensibilité apparente au vieillissement sous déformation.

EDF prévoit par conséquent d'exploiter les chutes de l'assemblage témoin CT 16-0234 pour caractériser la sensibilité éventuelle au phénomène de vieillissement sous déformation de cette électrode. Les chutes de l'assemblage témoin CT 16-0234 présentent une inversion des R_m . Cet assemblage témoin, de diamètre 508 mm et d'épaisseur 38 mm, a été réalisé dans le bâtiment de sauvegarde du réacteur EPR de Flamanville en position corniche (se référer à l'annexe 12) ce qui, pour EDF, permet une bonne homogénéité azimutale dans la réalisation de la soudure. Deux chutes sont disponibles et EDF a prévu un plan de prélèvement, présentés dans la Figure 50 et la Figure 51 dans chaque chute pour pallier les effets éventuels de prélèvement.

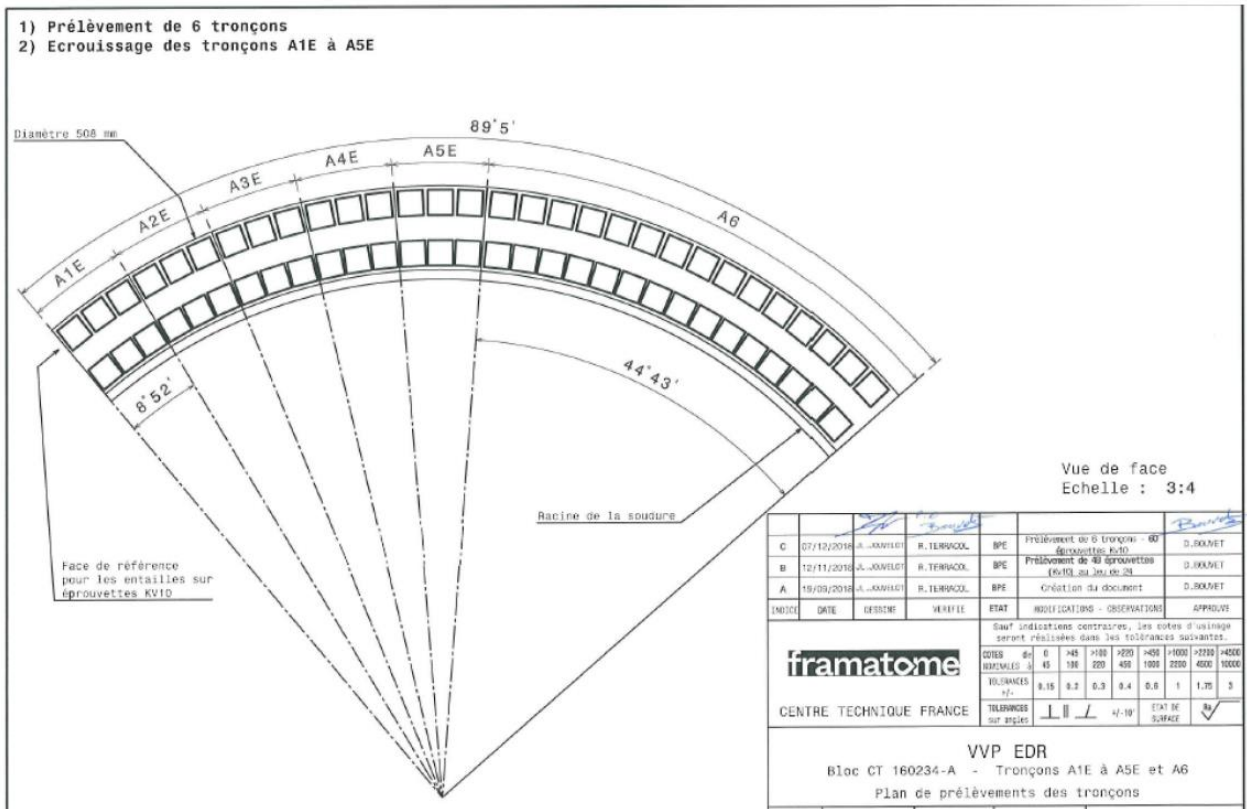


Figure 50 : Prélèvement des éprouvettes dans la chute A de l'assemblage témoin CT 16-0234

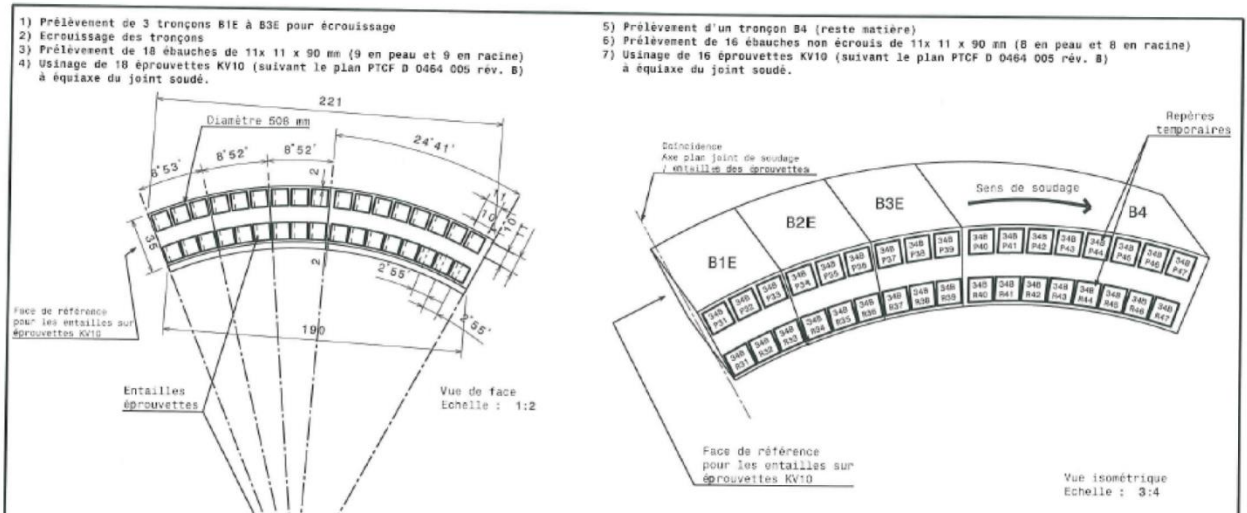


Figure 51: Prélèvement des éprouvettes dans la chute B de l'assemblage témoin CT 16-0234

Pour ce produit d'apport, EDF prévoit de comparer pour chaque altitude (peau et racine) la courbe de transition de résilience de l'état de référence à celle de l'état vieilli pour en déterminer le décalage correspondant.

Analyse du rapporteur

Les échantillons de matière sélectionnés et les plans de prélèvement n'appellent pas de remarque de la part du rapporteur.

Toutefois, la méthode d'écrouissage par application d'une déformation de 5 % en compression à un bloc où plusieurs éprouvettes seront usinées, décrite dans le courrier en référence [48], repose sur l'hypothèse d'un comportement homogène sur l'ensemble de la soudure vis-à-vis de la compression. Pour l'IRSN, la structure métallurgique d'une soudure n'est pas homogène, une déformation appliquée en compression sur un bloc peut créer une densité de dislocation (effet recherché) différente selon la taille de l'ébauche. La méthode suivie dans les dossiers matériaux du N4 pour caractériser le vieillissement sous déformation consiste à prélever et ébaucher avant écrouissage les éprouvettes pour obtenir une dimension 10,5 x 11 mm, proche des dimensions finales d'une éprouvette, puis à usiner l'ébauche aux cotes finales après écrouissage pour obtenir une éprouvette de résilience de dimensions de 10 x 10 mm. Dans la méthode proposée par EDF, les éprouvettes de résilience sont prélevées dans une ébauche écrouie et l'usinage est réalisé après écrouissage pour obtenir les dimensions de 10 x 10 mm.

L'ASN a demandé à l'exploitant de conforter ces essais par comparaison avec la méthode suivie précédemment sur le N4 afin de s'assurer de l'absence d'impact des modes de prélèvements.

EDF a précisé, dans son projet de position n° 23 du courrier en annexe 13, que l'analyse de la bibliographie montre que différentes méthodes ont été mises en œuvre et qu'elles ne mettent pas en évidence un « effet de la méthode » sur les résultats. EDF précise que la méthode proposée par EDF a fait l'objet d'une mise au point, montrant que l'écrouissage sur bloc est homogène (cf. rapport WOOD cité en réf. [50]).

Néanmoins, EDF précise qu'une comparaison des résultats obtenus avec la méthode d'écrouissage proposée par EDF et celle mise en œuvre sur le N4 sera effectuée. Cela consistera à réaliser, sur une même matière, d'une part un écrouissage sur des ébauches de dimensions proches des dimensions d'une éprouvette de résilience, d'autre part un écrouissage sur bloc, afin de montrer une équivalence des méthodes. Une note technique décrivant le programme d'essais envisagé sera transmise avant le 31 mai 2019.

Le rapporteur considère que l'engagement d'EDF est recevable. La note technique relative au programme d'essais devra néanmoins faire l'objet d'une instruction par l'ASN.

e) Programme de quantification du vieillissement sous déformation sur l'électrode enrobée Tenacito R

Comme précisé au paragraphe 8.2.4, l'électrode Tenacito-R est en cours de qualification. EDF fait mention d'une caractérisation du vieillissement sous déformation sans en préciser les modalités.

8.2.7. Dépassement de la réserve thermique disponible

La réserve thermique disponible correspond à la durée cumulée maximale pendant laquelle une soudure peut être soumise à la température du traitement thermique de détensionnement (TTD) tout en garantissant le respect des critères applicables, notamment les caractéristiques mécaniques. Cette durée a été établie lors de la QMOS. Les réparations et remises à niveau envisagées nécessiteront la mise en œuvre d'un TTD. Il convient ainsi de vérifier que la durée limite définie par la QMOS ne sera pas dépassée.

Dans son document en référence [76], EDF précise que cette réserve thermique est suffisante pour l'ensemble des réparations et remises à niveau envisagées, à l'exception de la soudure VVP3120-TY-F01 F5 qui présente une réserve thermique insuffisante pour la réalisation du TTD après les opérations de remise à niveau. Ainsi EDF mentionne qu'une analyse technique spécifique sera réalisée afin de démontrer que le dépassement de la réserve thermique du métal de base ne remet pas en cause le respect des critères applicables.

Ce point fera l'objet d'une instruction ultérieure par l'ASN.

8.2.8. Cas des soudures pour lesquelles des écarts au code RCC-M sont susceptibles de subsister

Les considérations précisées au paragraphe 8.1.5 pour les soudures réalisées avec le procédé TIG orbital sont également valables pour les autres soudures VVP réalisées sur site avec les procédés TIG manuel ou TIG et électrodes enrobées.

8.2.9. Conclusion

L'exploitant considère que les procédés de soudage TIG manuel et TIG et électrodes enrobées, associés à leurs métaux d'apports respectifs EML5 d'une part et Cymeta et Univers 2M d'autre part, se sont révélés inadaptés pour répondre aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005 complété par les exigences spécifiées par le fabricant.

EDF envisage une remise à niveau de ces soudures en utilisant un mode opératoire de soudage conforme au référentiel d'exclusion de rupture.

Le rapporteur considère que la démarche globale proposée par l'exploitant ayant pour objectif de répondre à aux exigences d'exclusion de rupture définies à la suite de la SPN de 2005 et aux spécifications du fabricant est acceptable sous réserve que les points suivants soient justifiés.

Caractéristiques mécaniques

Le rapporteur constate que des programmes de caractérisation de la sensibilité du phénomène de vieillissement sous déformation sont prévus pour certains métaux d'apports. Le rapporteur considère que ces programmes doivent être étendus à tous les matériaux d'apports présents dans la configuration finale de chaque soudure et qui contribuent à la résistance à la rupture brutale de la soudure.

Concernant le nouveau mode opératoire de soudage TIG manuel et électrodes enrobées Tenacito-R, qui fait l'objet d'un dossier de qualification, l'exploitant devra justifier la robustesse de ce mode opératoire de soudage et l'atteinte des exigences mécaniques requises par le référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005, complété par les spécifications de l'exploitant et du fabricant.

En ce qui concerne les faibles épaisseurs de passes de racine et les résidus d'électrodes enrobées contenant du métal d'apport EML5, Univers 2M ou Cymeta, le rapporteur considère que leur maintien en l'état envisagé par EDF nécessite une justification du fait que leur présence n'impacte pas la résistance à la rupture brutale des soudures remises à niveau concernées.

Propriétés de compacité

S'agissant des propriétés de compacité, à l'instar des éléments décrits au chapitre 6, le rapporteur constate que la capacité des procédés de contrôles volumiques à détecter avec un haut niveau de confiance les défauts définis comme inacceptables par le fabricant au regard de la maîtrise de ses procédés de fabrication n'est pas acquise.

Etat final des soudures

Le rapporteur rappelle que la conformité des soudures ne pourra être établie, soudure par soudure, qu'une fois le recensement de l'ensemble des écarts et l'analyse de l'impact de ceux qui ne pourront être résorbés auront été achevés par l'exploitant.

Annexe 1 : Tableaux et figures

Liste des tableaux

Tableau 1 : Requis de résilience.....	29
Tableau 2 : Valeurs de résilience minimales obtenues sur la QMOS R147 AC.....	30
Tableau 3 : Extrait du courrier EDF en référence [19]	34
Tableau 4 : Principales caractéristiques de résilience.....	46
Tableau 5 : Résiliences obtenues sur les assemblages témoins des soudures VVP réalisées sur site.....	50
Tableau 6 : Durées estimées des opérations sur site par le fabricant.....	85
Tableau 7 : Produits d'apport mis en œuvre lors des passes de remplissage et de finition	95
Tableau 8 : Recensement des valeurs de résilience obtenues pour les soudures de préfabrication	96
Tableau 9 : Présentation des soudures fil-flux des quatre maquettes du programme d'essais et comparaison avec l'assemblage témoin CT 13-0434 couvrant certaines soudures de production	97
Tableau 10 : Synthèse des essais de caractérisation complémentaires sur maquettes.....	98
Tableau 11 : Caractéristiques géométriques et des matériaux de base de la soudure ARE Q3 et des soudures de traversée VVP ...	99
Tableau 12 Programme de caractérisation complémentaire sur la soudure Q3	100
Tableau 13 : Résultats des essais complémentaires réalisés sur le CT 13-0434.....	103
Tableau 14 : Définition des défauts inacceptables.....	126
Tableau 15 : Comparaison entre les caractéristiques des défauts inacceptables et les critères de rejet du référentiel technique pour les procédés de contrôles non destructifs mis en œuvre en fabrication	127
Tableau 16 : Caractérisation de l'indication de la soudure EPP6208TWM-S1	152
Tableau 17 : Durées estimées par le fabricant dans la note en référence [27].....	158
Tableau 18 : Valeurs de traction à température ambiante et à 300 °C sur les assemblages témoins de soudage issues des notes en référence [30] et [47]	216
Tableau 19 : Synthèse des essais de tractions complémentaires réalisés sur le coupon témoin CT 15-0054 (extrait de la note en référence [30])	217

Liste des figures

Figure 1 : Principaux éléments constitutif d'une ligne VVP.....	20
Figure 2 : Soudures de traversée d'enceinte d'un train VVP	22
Figure 3 : Résultats des essais de traction réalisés sur la soudure ARE3510TY-F02 S5.....	38
Figure 4 : Typologie des écarts constatés lors des activités d'usinage.....	42
Figure 5 : Typologie des écarts constatés lors des activités de soudage	42
Figure 6 : Ecart liés aux activités de contrôles non destructifs.....	43
Figure 7 : Ecart documentaires	44
Figure 8 : Démarche de justification de la conformité des soudures aux objectifs de la démarche d'exclusion de rupture encadrée par le décret d'autorisation de création	59
Figure 9 : Logigramme de traitement des écarts extrait du courrier EDF en référence [7]	61
Figure 10 : Extrait du logigramme de traitement des écarts vis-à-vis du risque de rupture brutale.....	62
Figure 11 : Présentation des éléments principaux de la traversée.....	70
Figure 12 : Coupe et retrait du compensateur et de la manchette	72
Figure 13 : Dégagement du guard pipe, extraction de l'ancien flasque	72
Figure 14 : Insertion préalable de la première moitié du compensateur puis mise en place du nouveau flasque avec la seconde partie du compensateur, soudage et contrôle du nouveau flasque	73

Figure 15 : Mise en place, soudage et contrôle de la manchette puis du compensateur	73
Figure 16 : Retrait du cintre coté bâtiment réacteur pour permettre l'extraction de la tuyauterie VVP ultérieurement	75
Figure 17 : Coupe préalable d'une des soudures côté bâtiment réacteur (BR) et de la soudure côté bâtiment électrique (BL), coupe de la manchette	75
Figure 18 : Coupe de la soudure W2 pour permettre l'extraction du tube VVP côté bâtiment réacteur	76
Figure 19 : Coupe de la soudure W1 pour permettre l'extraction du flasque	76
Figure 20 : Extraction de la traversée côté bâtiment réacteur	77
Figure 21 : Insertion et soudure de la tuyauterie VVP côté bâtiment électrique	77
Figure 22 : Introduction du tube VVP côté bâtiment réacteur	78
Figure 23 : Raccordement du tube VVP côté bâtiment réacteur, soudage et contrôle de la manchette puis du compensateur	78
Figure 24 : Coupe de la soudure W23	80
Figure 25 : Dégagement guard pipe et retrait de la manchette pour avoir accès à la soudure W2	80
Figure 26 : Réparation de la soudure W2	81
Figure 27 : Décalage du compensateur pour avoir accès à la soudure du guard pipe	81
Figure 28 : Coupe de la soudure du guard pipe	82
Figure 29 : Réparation de la soudure W1	82
Figure 30 : Soudage de la nouvelle manchette (en deux demi-coquilles)	83
Figure 31 : Schématisation du risque de rupture brutale	92
Figure 32 : Logigramme d'évaluation du caractère suffisant de la ténacité des soudures de traversée VVP	95
Figure 33 : Maquette numérique de la soudure S5 de l'ARE3510TY-F02	98
Figure 34 : Chanfrein de la soudure ARE Q3 (à gauche) et chanfrein des soudures de traversée VVP (à droite)	100
Figure 35 Evolution de la ténacité en fonction de la température pour les aciers faiblement alliés (courbe à gauche) et pour les aciers C-Mn (courbe à droite)	101
Figure 36 : Corrélation résilience-ténacité dans le domaine de transition	102
Figure 37 : Corrélation ténacité-résilience dans le domaine ductile	104
Figure 38 : Coupes macrographiques du coupon témoin CT 13-0434 (en haut à gauche), du coupon témoin CT 13-0310 (en bas à gauche), de la maquette 2 (en haut à droite) et de la maquette 4 (en bas à droite)	106
Figure 39 : Courbes de transition de résilience des maquettes 1, 2, 3 et 4	106
Figure 40 : Morphologie de coupon témoins Q1 et Q3	107
Figure 41 : Soudure sous flux réalisée en deux passes (à gauche) avec faible proportion de zones recristallisées, soudure multi-passes avec forte proportion de zones recristallisées (à droite)	109
Figure 42 : Prélèvement des éprouvettes de résiliences dans des soudures réalisées en fil-flux (à gauche) forte proportion de zone recristallisée et à droite faible proportion de zone recristallisée)	110
Figure 43 : Comparaison des courbes de résilience en fonction des zones de prélèvement de la Figure 42	110
Figure 44 : Schéma d'un prélèvement d'éprouvettes de résilience en peau et racine de soudure	120
Figure 45 : Localisation de l'indication n° 9 située dans la soudure de traversée EPP6208TWM-S1	152
Figure 46 : Caractéristiques géométriques de la soudure EPP6208TWM-S1	153
Figure 47 Facteurs de marges issus des calculs de rupture brutale pour le défaut de la soudure EPP6208TWM-S1	159
Figure 48 : Chanfrein en U retenu pour la maquette TIG orbital	173
Figure 49 : Schématisation du désalignement	177
Figure 50 : Prélèvement des éprouvettes dans la chute A de l'assemblage témoin CT 16-0234	190
Figure 51: Prélèvement des éprouvettes dans la chute B de l'assemblage témoin CT 16-0234	190
Figure 52 : Schématisation des différentes passes d'une soudure	197

Figure 53 : Principe du procédé TIG.....	198
Figure 54 : Principe du procédé fil-flux.....	199
Figure 55 : Principe du procédé électrode enrobée.....	200
Figure 56 : Mise en œuvre du procédé TIG orbital (extrait site internet EDF).....	201
Figure 57 : Courbe de traction d'un matériau sensible au vieillissement sous déformation statique.....	214
Figure 58: Position de soudage pour des soudures bout à bout de tubes (d'après la norme EN ISO 6947).....	221

Annexe 2 : Procédés de soudage mis en œuvre sur les soudures de traversée VVP en exclusion de rupture

Schématisation des différentes passes d'une soudure :

Après la réalisation des chanfreins sur chacune des pièces à souder et le maintien en position des deux pièces (accostage), un dispositif de soudage permet d'élever la température de la zone jusqu'à la fusion des matériaux. Un apport de métal permet de combler le volume libre entre les 2 pièces. La schématisation des différentes passes d'une soudure est donnée à la Figure 52.

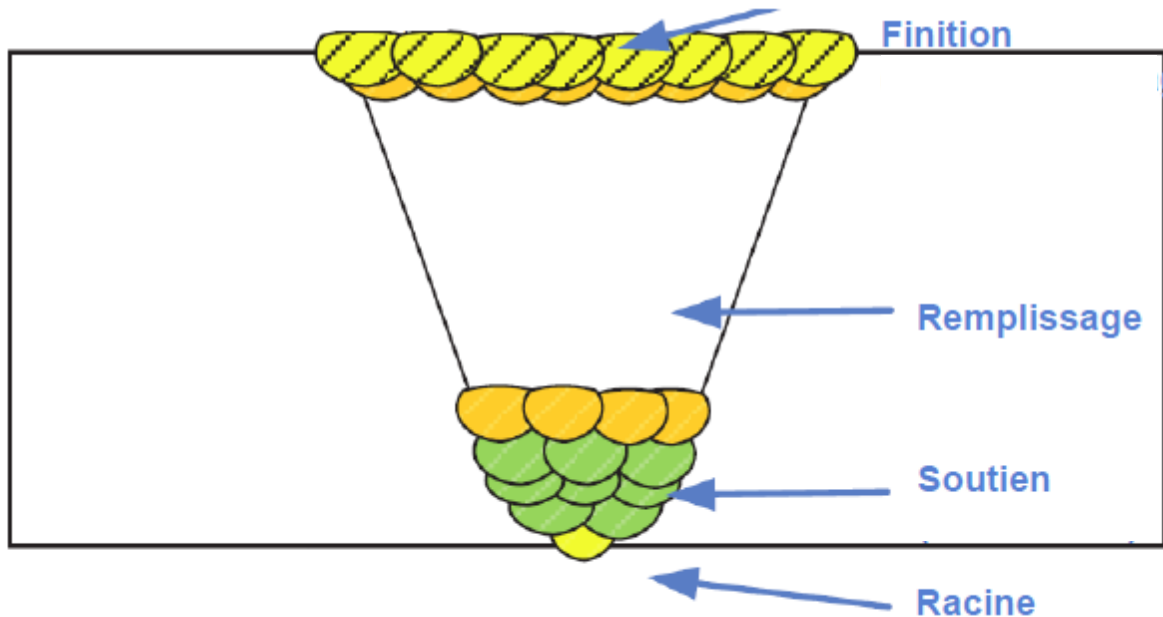


Figure 52 : Schématisation des différentes passes d'une soudure

Description des procédés de soudage initiaux mis en œuvre sur les soudures des traversées d'enceinte VVP

Passes de racine et de soutien :

Les passes de racine et de soutien des soudures de traversée d'enceinte VVP en exclusion de rupture ont été réalisées avec un procédé TIG manuel. Le métal d'apport utilisé est l'EMK 35Cr.

Passes de remplissage et de finition :

Les passes de remplissage et de finition des soudures VVP en exclusion de rupture ont été réalisées avec les procédés de soudage « fil/flux ». Les couples de métaux d'apport fil/flux employés pour les soudures de traversée sont SAF FRO AS35 / Oerlikon AS 461 Si et Oerlikon OE S2 / Oerlikon AS 461 Si.

Principe des procédés de soudage TIG

Le soudage TIG est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport. TIG est l'acronyme de Tungsten Inert Gas, où Tungsten (Tungstène) désigne le matériau constituant l'électrode et Inert Gas (gaz inerte) désigne le gaz plasmagène utilisé. L'arc électrique se crée entre l'électrode et la pièce à souder qui est protégée de l'oxydation par un gaz ou un mélange de gaz inertes tels que l'argon et l'hélium.

Le passage d'un courant électrique de forte intensité à travers le plasma conduit à une forte élévation de température des pièces à assembler et du métal d'apport jusqu'à leur point de fusion, ce qui permet la réalisation d'une soudure.

L'ensemble constitué par l'électrode réfractaire, le dispositif d'amené du gaz inerte et le dispositif d'amené du métal d'apport constitue la torche de soudage. Un schéma de principe du procédé TIG est donné à la Figure 53.

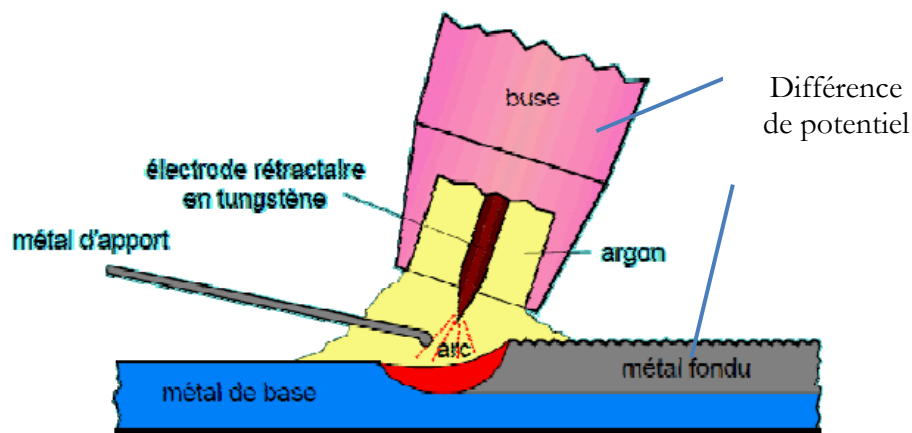


Figure 53 : Principe du procédé TIG.

Procédé TIG manuel

Dans ce procédé, la torche de soudage et le dispositif d'amené du métal d'apport font partie d'un dispositif tenu par un opérateur. Ce procédé est adapté aux configurations de soudure difficiles d'accès ou de géométries complexes (soudures d'angle, soudures de piquage). Il nécessite que l'opérateur ajuste à tout moment la position relative de la torche par rapport à la surface du bain de fusion (distance, orientation), et la vitesse d'avance. Il requiert une grande maîtrise de l'opérateur qui doit maintenir les paramètres de soudage définis dans la procédure dans toutes les situations : évolutions de la géométrie locale du cordon, position azimutale autour de la soudure pour des tuyauteries (positions corniche, plafond, ...).

En contrepartie, ce procédé permet de corriger rapidement une évolution de l'apparence du cordon de soudure réalisé pouvant conduire à des défauts de compacité des soudures.

Procédé fil/flux

Concernant le procédé fil/flux la fusion du métal d'apport et des parois des pièces à souder est réalisée sous un laitier provenant d'un flux recouvrant la zone fondue. L'alimentation de ce flux (sous forme de poudre) peut se faire via la torche de soudage ou être déposée séparément. Le laitier permet de protéger la zone fondue lors de son refroidissement et de préserver un environnement physico-chimique favorable aux propriétés mécaniques finale de la soudure.

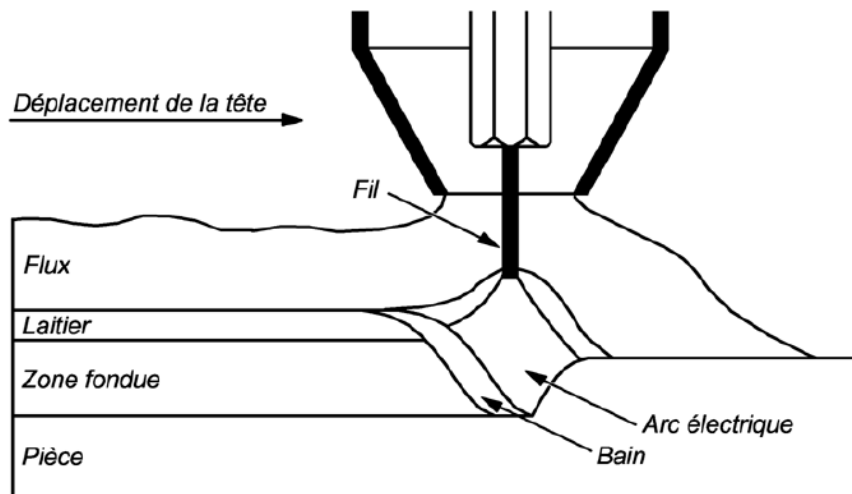


Figure 54 : Principe du procédé fil-flux.

Annexe 3 : Procédés de soudage initiaux mis en œuvre sur les soudures VVP en exclusion de rupture réalisées sur site

Passes de racine et de soutien :

Les passes de racine et de soutien des soudures VVP fabriquées sur site ont été réalisées avec un procédé TIG manuel. Les métaux d'apport utilisés sont les suivants :

- EMK 35Cr pour les soudures en DN750 ;
- EML5 pour les soudures DN200 et DN350 (notées H, I et J sur le schéma en annexe 4).

Passes de remplissage et de finition :

Les passes de remplissage et de finition des soudures VVP ont été réalisées avec les procédés de soudage suivants :

- le procédé TIG orbital avec le métal d'apport DMOI-G pour certaines soudures DN750 ;
- le procédé TIG et électrode enrobée avec l'électrode Univers2M utilisé pour certaines soudures DN750 ;
- le procédé TIG et électrode enrobée avec l'électrode CYMETA utilisé pour les soudures DN200 et DN350 (notées H, I et J sur le schéma en annexe 4) ;
- le procédé TIG manuel avec le métal d'apport EML5.

Procédé TIG manuel

Voir annexe 2.

Procédé électrode enrobée

Pour le procédé réalisé avec des électrodes enrobées, le flux provient d'une baguette constituée d'une âme centrale (le métal d'apport proprement dit) entourée d'un enrobage dont la fusion va permettre la constitution de la couche de laitier protectrice. La fusion de la baguette et des parties à souder est obtenue par un transfert de chaleur provenant d'un arc électrique se formant entre une électrode en tungstène entourant la baguette et la pièce à souder.

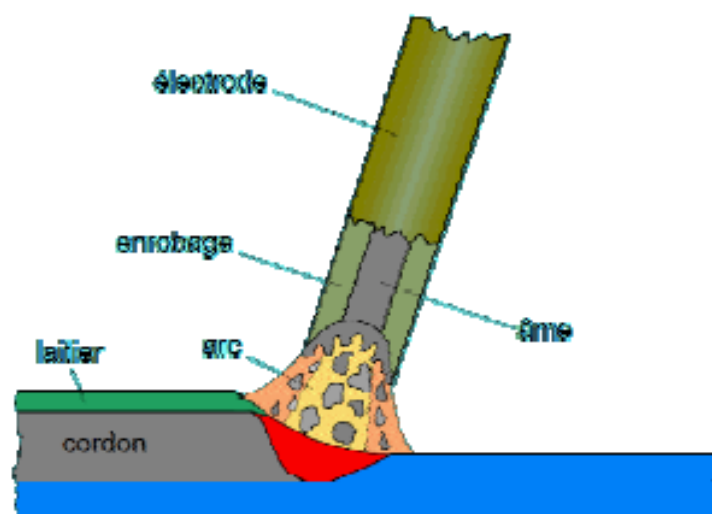


Figure 55 : Principe du procédé électrode enrobée

Procédé TIG orbital

La torche de soudage et le dispositif d'amené du métal d'apport font partie d'un dispositif mécanique se déplaçant au-dessus de la soudure. Ce procédé est particulièrement adapté aux soudures de tuyauteries : la mise en place d'un dispositif de guidage autour de ces soudures permet de maîtriser la position relative entre la torche de soudage et la soudure ainsi que la vitesse d'avance. Des dispositifs d'asservissement des paramètres électriques (tension, courant) et géométriques (distance électrode-surface, position azimutale autour de l'axe de la tuyauterie) permettent de minimiser les fluctuations de l'énergie déposée, dans les limites fixées par la procédure. Dans certains cas, des paramètres de soudage peuvent être ajustés manuellement par l'opérateur s'il visualise une évolution défavorable de l'aspect du cordon de soudure.

En contrepartie, ce procédé nécessite une accessibilité suffisante autour de la soudure pour mettre en place le porteur mécanique et permettre son déplacement sur le dispositif de guidage.

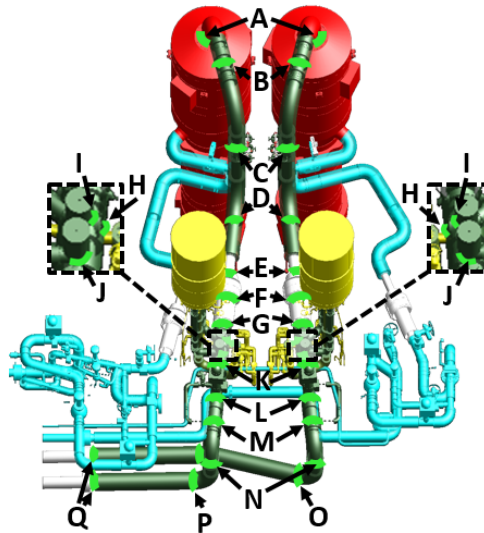


Figure 56 : Mise en œuvre du procédé TIG orbital (extrait site internet EDF)

Annexe 4: Répartitions des procédés de soudage mis en œuvre sur les soudures VVP concernées par les exigences d'exclusion de rupture

Train 2		
	Nom	MOS
A	VVP2110TY-F01-3 - FW1	TIG+EE
B	VVP2110TY-F02-1 - FW2	TIG Orb.
C	VVP2110TY-F03-1 - FW3	TIG Orb.
D	VVP2110TY-F03-1 - FW4	TIG+EE
E	EPP6208TWM-1 - S2	TIG + ASF
F	EPP6208TWM-1 - S1	TIG + ASF
G	VVP2120TY-F01-1 - FW1	TIG+EE
H	VVP2120TY-F01-3 - F5	TIG+EE
I	VVP2311TY-F01-1 - F1	TIG+EE
J	VVP2321TY-F01-1 - F1	TIG+EE
K	VVP2120TY-F01-3 - FW2	TIG Orb.
L	VVP2130TY-F01-3 - FW3	TIG Orb.
M	VVP2130TY-F01-1 - FW301	TIG+EE
N	VVP2130TY-F01-1 - FW5	TIG+EE
P	VVP2130TY-F02-1 - FW6	TIG+EE
Q	VVP2130TY-F02-1 - FW7	TIG Orb.

Train 1		
	Nom	MOS
A	VVP1110TY-F01-3 - FW6	TIG+EE
B	VVP1110TY-F02-1 - FW7	TIG Orb.
C	VVP1110TY-F03-1 - FW8	TIG Orb.
D	VVP1110TY-F03-1 - FW9	TIG+EE
E	EPP6110TWM-1 - S2	TIG + ASF
F	EPP6110TWM-1 - S1	TIG + ASF
G	VVP1120TY-F01-1 - FW101	TIG+EE
H	VVP1120TY-F01-3 - F5	TIG+EE
I	VVP1130TY-F01-1 - F1	TIG
J	VVP1321TY-F01-1 - F1	TIG
K	VVP1120TY-F01-3 - FW12	TIG Orb.
L	VVP1130TY-F01-3 - FW13	TIG Orb.
M	VVP1130TY-F01-1 - FW14	TIG Orb.
N	VVP1130TY-F01-1 - FW15	TIG+EE
O	VVP1130TY-F02-1 - FW16	TIG Orb.
P	VVP1130TY-F02-1 - FW17	TIG Orb.
Q	VVP1130TY-F02-1 - FW101	TIG Orb.



Train 3		
	Nom	MOS
A	VVP3110TY-F01-3 - FW1	TIG+EE
B	VVP3110TY-F02-1 - FW2	TIG Orb.
C	VVP3110TY-F03-1 - FW3	TIG Orb.
D	VVP3110TY-F03-1 - FW4	TIG+EE
E	EPP6307TWM-1 - S2	TIG + ASF
F	EPP6307TWM-1 - S1	TIG + ASF
G	VVP3120TY-F01-1 - FW1	TIG+EE
H	VVP3120TY-F01-3 - F5	TIG+EE
I	VVP3311TY-F01-1 - F1	TIG+EE
J	VVP3321TY-F01-1 - F101	TIG+EE
K	VVP3120TY-F01-3 - FW2	TIG Orb.
L	VVP3130TY-F01-3 - FW3	TIG Orb.
M	VVP3130TY-F01-1 - FW4	TIG Orb.
N	VVP3130TY-F01-1 - FW5	TIG Orb.
P	VVP3130TY-F02-1 - FW6	TIG Orb.
Q	VVP3130TY-F02-1 - FW7	TIG+EE

Train 4		
	Nom	MOS
A	VVP4110TY-F01-3 - FW6	TIG+EE
B	VVP4110TY-F02-1 - FW7	TIG Orb.
C	VVP4110TY-F03-1 - FW8	TIG Orb.
D	VVP4110TY-F03-1 - FW9	TIG+EE
E	EPP6410TWM-1 - S2	TIG + ASF
F	EPP6410TWM-1 - S1	TIG + ASF
G	VVP4120TY-F01-1 - FW101	TIG+EE
H	VVP4120TY-F01-3 - F5	TIG+EE
I	VVP4311TY-F01-1 - F1	TIG+EE
J	VVP4321TY-F01-1 - F1	TIG+EE
K	VVP4120TY-F01-3 - FW12	TIG Orb.
L	VVP4130TY-F01-3 - FW13	TIG Orb.
M	VVP4130TY-F01-1 - FW14	TIG Orb.
N	VVP4130TY-F01-1 - FW15	TIG+EE
O	VVP4130TY-F02-1 - FW16	TIG Orb.
P	VVP4130TY-F02-1 - FW17	TIG Orb.
Q	VVP4130TY-F02-1 - FW18	TIG Orb.

TIG + EE = TIG et électrodes enrobées

TIG + ASF = fil/flux

TIG Orb = TIG orbital

Dans les trois cas, les passes de racine et de soutien ont été réalisées en TIG manuel.

Annexe 5 : Exigences spécifiques de fabrication applicables aux lignes VVP en exclusion de rupture

Exigences de fabrication applicables aux lignes VVP en exclusion de rupture extraites du document EDF en référence [18] :

- pour les métaux de base :
 - pour les produits obtenus par forgeage, le taux de corroyage est supérieur à 3 ;
 - la valeur de carbone équivalent est limitée à 0,48 % pour les nuances de type A48 ($R_m > 470$ MPa) ;
 - pour le P355NH, le Fabricant impose une valeur de carbone équivalent maximale de 0,52 % pour les tubes sans soudure (valeur visée de 0,50 %) et de 0,47 % pour les produits forgés ;
 - la teneur minimale en chrome est de 0,20 % sur coulée et de 0,15 % sur produit ;
 - la teneur en soufre est inférieure à 0,005 % ;
 - la teneur en aluminium est comprise entre 0,015 et 0,065% ;
 - la valeur de résilience spécifiée est d'environ 100 J à 20 °C ;
- des contrôles de mesure d'épaisseur sont réalisés avant et après alésage des embouts. Des mesures d'épaisseur sont également prescrites en fin de fabrication au niveau des coudes et des discontinuités géométriques ;
- pour les soudures :
 - les valeurs de caractéristiques mécaniques de traction et de résilience spécifiées pour le métal fondu sont au moins équivalentes à celles spécifiées pour les métaux de base ;
 - le préchauffage est réalisé à une température minimale de 125 °C ;
 - le post-chauffage est réalisé à une température minimale de 125 °C pendant une durée minimale d'une heure ;
 - les soudures sont détensionnées selon les paramètres donnés dans les QMOS ;
 - les soudures sont arasées en peau interne autant que possible compte tenu de la cinématique démontage ;
 - la totalité du volume des soudures fait l'objet d'un contrôle par essais non destructif selon les spécifications suivantes :
 - le volume soumis à l'examen est conforme au paragraphe S7712 du code RCC-M ;
 - les exigences de base pour réaliser ce contrôle sont conformes :
 - en ce qui concerne l'état des surfaces, au paragraphe S2141 du code RCC-M ;
 - en ce qui concerne la préparation des surfaces, leur arasage et leur rugosité, au paragraphe MC2633 du code RCC-M ;
 - en ce qui concerne les modalités d'exploration (14 sens de sondage, 2 angles réfractés en ondes transversales espacés d'au moins 15 °, pas de zone morte), au paragraphe MC2634.1 du code RCC-M ;

**Annexe 6 : Analyse comparative des exigences de résilience
applicables aux lignes vapeurs principales**

Documents	Valeurs de résilience spécifiées ou prises en compte
Arrêté ESPN 2005 : annexe 1 §4.2	KV moyen à 0 °C \geq 40 J pour un matériau ferritique dont la résistance à la traction à température ambiante est inférieure à 600 MPa et 60 J lorsque cette résistance à la traction dépasse 600 MPa
Code RCC-M niveau 1	KV moyen à 0 °C \geq 60 J, et KV individuel à 0 °C supérieur à 42J Le requis en matière de KV individuel ou de KV moyen peut être plus restrictif dans le cadre de la norme d'application défini dans la norme 15614-1 appelée par le code RCC-M.
Rapport BCCN en référence [1] pour la SPN de 2005 : page 23/50	Le rapport cite en référence le document EDF en référence [13] ainsi qu'un engagement de l'exploitant : « <i>Ainsi, l'[exploitant] entend spécifier une valeur de résilience de 100 J à 0 °C, permettant de garantir une tolérance élevée aux défauts.</i> ».
Lettre de suite de la SPN 2005 [2]	Pas de valeurs numériques citées et se réfère au rapport BCCN
Note d'application EDF pour les exigences exclusion de rupture en référence [13]	Environ 100 J à +20 °C
Exigences définies par le fabricant vis-à-vis des exigences exclusion de rupture	KV moyen à 0 °C supérieur à 100 J KV individuel à -20 °C supérieur à 47 J

Annexe 7 : Exigences du rapport de sûreté relatives au risque de rupture brutale pour les lignes VVP

Robustesse vis-à-vis de la rupture brutale

La section 3.4.2.3 du rapport de sûreté transmis à l'appui de la demande d'autorisation de création du réacteur EPR de Flamanville précise dans le paragraphe 0 « Exigences de sûreté » que « la vérification de la robustesse du circuit vis-à-vis de la rupture brutale doit être justifiée ». Cette exigence est déclinée dans le paragraphe 1 « Bases de conception » de la manière suivante :

- « le risque de rupture fragile, avec prise en compte des effets de vieillissement et des conditions climatiques extrêmes doit être éliminé par conception » ;
- « les risques de rupture ductile sont en général exclus par une ténacité suffisante des matériaux en fin de vie (à justifier par le fabricant) ».

Dans ce cadre, le sous-chapitre 10.5 qui explicite la mise en œuvre du référentiel d'exclusion de rupture pour les lignes vapeur principales précise :

- pour le domaine fragile et de transition fragile-ductile : « aucun transitoire significatif ne se produit à une température pouvant entraîner une rupture par clivage » ;
- Pour le domaine ductile : « afin de garantir un niveau de ténacité suffisant, une valeur « objectif » de résilience au plateau supérieure ou égale à 100 Joules est retenue ».

Cet objectif a été traduit par EDF dans la note d'application de l'hypothèse d'exclusion de rupture aux lignes primaires et vapeur principales de l'EPR FA3 en référence [13] par la spécification d'une valeur moyenne de résilience d'« environ 100 J à 20 °C ».

Ces exigences du rapport de sûreté ont été traduites par Framatome par l'imposition des critères en résilience suivants pour les joints soudés des lignes VVP en exclusion de rupture : KV moyen à 0 °C supérieur à 100 J et KV individuel à -20 °C supérieur à 47 J.

Par ailleurs, la section 3.4.2.3 précise que « la propagation d'un éventuel défaut de fabrication susceptible d'avoir échappé aux inspections de fabrication, doit rester limitée sur la durée de vie de l'installation et la stabilité du défaut en fin de vie correspondant doit être garantie sous les sollicitations les plus sévères ».

Ces exigences sont déclinées dans l'« analyse des défauts non traversants » du paragraphe 1 :

- « la taille des défauts considérés tient compte de la technologie de fabrication utilisée, des performances des contrôles de fabrication, des procédés de réparation utilisés, et le cas échéant des résultats des contrôles de fin de fabrication. Le fabricant devra justifier la valeur retenue ; en pratique on peut considérer à titre de découplage comme défaut de référence, des défauts en peau interne ou externe de longueur 20 mm et de profondeur 5 mm » ;
- « l'évolution de ces défauts, sous l'effet des chargements et des mécanismes d'endommagement sur la durée de vie de l'installation, ainsi que leur stabilité en fin de vie doit être évalué. Le défaut en fin de vie doit rester stable même sous les sollicitations les plus sévères (séisme, rupture de tuyauterie connectée,...) avec les marges de l'annexe ZG du RCC-M » ;
-« il est de plus vérifié que la propagation en peau interne ou externe d'un défaut de longueur exceptionnelle reste limitée pour garantir des marges importantes face au risque de rupture guillotine. On doit vérifier pour un défaut dont la longueur initiale vaut 2 fois celle du défaut de référence ($2 \times 20 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$), que la propagation par fatigue se développe prioritairement dans l'épaisseur, tout en restant limitée en peau ».

Tolérance aux grands défauts traversants et détection de fuite

La section 3.4.2.3 du rapport de sûreté prévoit au paragraphe 0 que les systèmes de détection de fuite installés à l'intérieur de l'enceinte « doivent permettre d'alerter le personnel en salle de commande et avoir des performances, en termes de capacité de détection, présentant des marges cohérentes avec la démonstration mécanique ». Ces exigences sont déclinées dans l'« analyse de défauts traversants » du paragraphe 1 :

- « la cinétique de propagation de ces défauts traversants est nécessairement lente et reste négligeable par rapport aux délais de détection des fuites dans l'enceinte » ;
- « la marge visée entre la taille du défaut critique traversant et celui produisant un défaut détectable avec une marge de 10 sur le débit, est de 2. Cette marge vise à montrer la capacité à détecter un défaut en condition normale d'opération bien avant que la tuyauterie ne rompe, et ce même avec les chargements accidentels ou de SDD ».

Le sous-chapitre 10.5 du rapport de sûreté précise par ailleurs que les « éléments relatifs à l'étude des ruptures et à des dispositions techniques additionnelles (tolérance aux grands défauts traversants, détection de fuite, [...]) ne font pas partie de la démonstration d'exclusion de rupture ».

Annexe 8 : Matrice d'évaluation des risques réalisée par EDF relative au scénario 3 (affouillement des soudures de traversée jusqu'aux passes de racine et de soutien et remplissage puis remise à niveau avec une procédé de soudage conforme au référentiel d'exclusion de rupture)

	Risque majeur	Nécessite un entraînement des opérateurs au préalable	
	Risque important	REX existant sur l'opération	
	Risque résiduel		
Phase	Identification des contraintes associées et risques majeurs potentiels	Parades	Risque résiduel
préparation chantier	introduction des équipements	étude détaillée d'introduction et stockage des équipements. Les lieux de stockage intermédiaires sont à définir en lien avec la séquence des opérations et les capacités des plateformes et des outils de manutention	accessibilité de tous les équipements dans l'EE
	installation des points de manutention dans l'espace EE	étude détaillée pour déterminer les points ancrages possibles et moyens de manutention	faisabilité de toutes les manutentions et capacité à exclure tous les risques de chute
	préparation et protection environnement chantier	étude détaillée vise à définir: (1) les équipements environnants (chemin de câbles, dépose plateformes permanentes...) à déposer et lieux de stockage, (2) la mise en place de dispositions spécifiques de maintien en propreté et évacuation des déchets, (3) la mise en place des systèmes supports (fluide, électrique) pour la réalisation des opérations (4) la mise en place de dispositions de protection des équipements contre les chocs	faisabilité de démontage des chemins de câbles
	installation de plateformes de travail et d'accès	étude détaillée pour déterminer les zones d'accès à réglementer et sécuriser et les zones de travail à sécuriser	garantir le travail en toute sécurité pour les hommes et matériels environnants
	schéma d'ensemble du bridage des tuyauteries	étude détaillée	accessibilité des points de bridage et réalisation
	travail en espace exigu	étude détaillée pour déterminer les dispositions HSE spécifiques : ventilation, extraction des fumées et refroidissement, protection collective...	prévention des risques chantier classiques (incendie, anoxie, exposition aux polluants et poussières...)
démolition de la réservation GC	projections des débris issus de l'opération de découpe GC	étude de faisabilité pour démontrer l'innocuité du procédé v/v de la protection du compensateur définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation des intervenants	endommagement du compensateur
	maintien en propreté de l'EE et évacuation des débris issus de l'opération de découpe GC	étude détaillée pour déterminer les dispositions spécifiques à mettre en œuvre (SAS, ..)	
	garantir l'absence d'endommagement des fers de l'EE	cartographie préliminaire du ferrailage	endommagement de fers
	risque HSE spécifique à la mise en œuvre du procédé de découpe du GC : hydrocution, projection, nuisance sonore	définition de moyens de prévention collectifs et individuels	

Phase	Identification des contraintes associées et risques majeurs potentiels	Parades	Risque résiduel
découpe du compensateur	recherche et/ou développement d'une technique de coupe du compensateur	étude de faisabilité	faisabilité d'une technique de découpe "non agressive" pour le compensateur et l'environnement
	protection du compensateur lors l'opération de découpe de la soudure	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur (en inox) sensibilisation du personnel intervenant à proximité définition de marquage spécifique	endommagement du compensateur
	maintien en position du compensateur lors de l'opération de découpe	étude détaillée visant à définir l'outillage de manutention et de maintien du compensateur utilisation du REX de l'opération de montage initial du compensateur	
retrait plaque de fermeture et ailette	protection du compensateur lors l'opération de découpe de la soudure	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation du personnel intervenant à proximité définition de marquage spécifique utilisation du REX de l'opération de montage initial du compensateur	
mise en retrait du pare-jet	endommagement de la tuyauterie VVP	étude et définition d'un outillage spécifique de guidage et de maintien utilisation du REX de l'opération d'introduction initial du pare jet	
	endommagement du liner lors de l'opération de découpe des taquets	étude et définition d'un outillage spécifique utilisation du REX de l'opération d'introduction initial du pare jet	risque d'endommagement sur le liner
déplacement du compensateur	protection du compensateur lors l'opération de déplacement	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation du personnel intervenant à proximité	
	développement d'un outil de guidage / maintien du compensateur	étude détaillée	
retrait guard pipe	développement d'un outillage de retrait et de maintien en position du guard pipe (4 T) pour éviter son ripage lors de la découpe de la soudure	étude détaillée	endommagement des clarinettes et fluid pipe
	agression du fluid pipe pendant découpe	Protection adaptée	
découpe lignes connectées clarinette	protection clarinette, fluid pipe et vannes	définition de dispositions spécifiques de protection	
bridage/supportage	risque de mise en contraintes des éléments traversés	étude détaillée pour ajouter bridage/supportage des 2 côtés du flasque, modélisation par calcul des contraintes	désacoostage résiduel non maîtrisé, non-respect géométrie traversée
	protection des éléments de traversées (fluid pipe, compensateur, manchette, flasque ...)	étude détaillée pour ajouter bridage/supportage des 2 côtés du flasque, modélisation par calcul des contraintes	
	manutention et contraintes environnementales pour opérationnels ultérieures	étude détaillée pour confirmer que la cinématique des opérations est réalisable avec le bridage mis en œuvre	
affouillement et réparation soudure W1 (BAS)	problème d'accessibilité pour réaliser l'affouillement au vu de l'exiguïté	étude détaillée des outillages d'affouillement	
	maîtrise de l'affouillement (attaque de la passe racine)	dispositions à mettre en œuvre pour garantir le positionnement précis de la soudure mesures et empreintes à réaliser au cours de l'affouillement, exploitation du REX soudures CSP	sous-épaisseur, désalignement, effondrement de la soudure
	réalisation des soudures avec un haut niveau de qualité	Entraînement soudeurs et maquette à l'échelle 1	
	Difficultés réalisation CND et introduction robot par MSIV. Risque introduction corps migrant	étude détaillée	endommagement fluid pipe



Annexe 9 : Inventaire des paramètres de soudage de la soudure S5 ARE3510TY-F02 Q3 et des soudures de traversée VVP

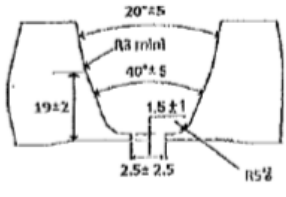
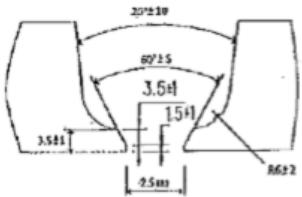
Extrait du document en référence [35]

	Soudure S5 ARE3510TY-F02	Soudures de traversées VVP Q1
Contexte		
Classe de qualité	Q3	Q1
Code de construction	EN 13480	RCC-M niveau 1
Matériaux de base	Pièce PP0516 (Tube Q3 EN10220 P355NH) Pièce PEO01512 (Coude formé Q3 P355NH EN10220)	Pièces PP00409 (Tube Q1 P355NH) suivant NESP-F DC 74 Pièces CP00010 (Forgé Q1 P355NH) suivant NESP-F DC 76
Géométrie	DN 508 mm Epaisseur 38 mm	DN 764 mm Epaisseur 41 mm

Mode opératoire de soudage

	Soudure S5 ARE3510TY-F02	Soudures de traversées VVP Q1
Procédure de soudage		
Numéro	N104.2	N104.1
Position de soudage	TIG manuel PF ou PA Fil sous flux PA	TIG manuel PF ou PA Fil sous flux PA
Procédés de soudage	TIG manuel Soudage automatique sous flux (fil sous flux)	TIG manuel Soudage automatique sous flux (fil sous flux)
Domaine de validité I	TIG manuel racine : 100 à 180 A TIG manuel passe 2 : 100 à 170 A Fil sous Flux Ø 2,4 : 190 à 375 A Fil sous flux Ø 4,0 : 410 à 730 A	TIG manuel racine : 100 à 180 A TIG manuel passe 2 : 100 à 170 A Fil sous Flux Ø 2,4 : 190 à 375 A Fil sous flux Ø 4,0 : 410 à 730 A
Domaine de validité U	TIG manuel : non précisé, dépend l'intensité Fil sous Flux Ø 2,4 : 28 à 30 V Fil sous flux Ø 4,0 : 29 à 32 V	TIG manuel : non précisé, dépend l'intensité Fil sous Flux Ø 2,4 : 28 à 30 V Fil sous flux Ø 4,0 : 29 à 32 V
Domaine de validité Vitesse d'avance	TIG manuel : non précisé Fil sous Flux Ø 2,4 : 41,4 à 60 cm / minutes Fil sous flux Ø 4,0 : 40,8 à 45 cm / minutes	TIG manuel : non précisé Fil sous Flux Ø 2,4 : 41,4 à 60 cm / minutes Fil sous flux Ø 4,0 : 40,8 à 45 cm / minutes
Domaine de validité Energie	TIG manuel racine : 19,5 à 32 kJ/cm TIG manuel passe 2 : 20,9 à 34,8 kJ/cm Fil sous Flux Ø 2,4 : 5,3 à 16,2 kJ/cm Fil sous flux Ø 4,0 : 17,8 à 34,7 kJ/cm	TIG manuel racine : 19,5 à 32 kJ/cm TIG manuel passe 2 : 20,9 à 34,8 kJ/cm Fil sous Flux Ø 2,4 : 5,3 à 16,2 kJ/cm Fil sous flux Ø 4,0 : 17,8 à 34,7 kJ/cm
Séquence de remplissage	Passe 1 : TIG manuel Passe 2 : TIG manuel Passes 3 à 8 : Fil sous flux Ø 2,4 Passes 9 à n : Fil sous flux Ø 4,0	Passe 1 : TIG manuel Passe 2 : TIG manuel Passes 3 à 8 : Fil sous flux Ø 2,4 Passes 9 à n : Fil sous flux Ø 4,0
Consommable TIG manuel	Böhler EMK35Cr AWS 5.18 ER70S-G	Böhler EMK35Cr AWS 5.18 ER70S-G
Consommable Fil sous flux Ø 2,4	Fil : SAF FRO AS 35 AWS A5.7 EM12K Flux : Oerlikon AS 461 Si non précisé sur la procédure (AWS A5.17 F7P4)	Fil : SAF FRO AS 35 AWS A5.7 EM12K Flux : Oerlikon AS 461 Si non précisé sur la procédure (AWS A5.17 F7P4)

Mode opératoire de soudage (suite)

Consommable Fil sous flux Ø 4,0	Fil : Oerlikon OE S2 AWS A5.7 EM12K Flux : Oerlikon AS 461 Si non précisé sur la procédure (AWS A5.17 F7P4)	Fil : Oerlikon OE S2 AWS A5.7 EM12K Flux : Oerlikon AS 461 Si non précisé sur la procédure (AWS A5.17 F7P4)
Polarité	TIG manuel : CC- Fil sous flux : CC +	TIG manuel : CC- Fil sous flux : CC +
Préchauffage minimum	125°C	125°C
Température entre passes maximum	300°C	300°C
Post-chauffage minimum	125°C 60 minutes	125°C 60 minutes
Chanfrein		
Gaz de protection (TIG)	Argon 10 - 15 l/ minute	Argon 10 - 15 l/ minute
Balayage autorisé	Uniquement en passe 2	Uniquement en passe 2
Qualification de mode opératoire		
Numéro	R 147 AC	R 147 AC

Produit d'apport

	Soudure S5 ARE3510TY-F02	Soudures de traversées VVP Q1
Métaux d'apport utilisés en production		
TIG manuel racine	Böhler EMK35Cr Lot FN2955 / 239780	Soudures 1 à 8 : Böhler EMK35Cr Lot FN2955 / 239780
Fil sous flux de remplissage Ø 2,4	Fil lot CT 124 Flux lot 110280	Soudures 1 à 8 : Fil lot CT 124 Flux lot 110280
Fil sous flux de remplissage Ø 4,0	Fil lot 10/2458 Flux lot 110280	Soudures 1 à 8 : Fil lot 10/2458 Flux lot 110280

	Soudure S5 ARE3510TY-F02	Soudures de traversées VVP Q1
Réalisation des soudures		
Localisation du soudage	Site de préfabrication Nordon Nancy	Site de préfabrication Nordon Nancy
Date de soudage	21/06/2012	Début de soudage : 1. et 2. 15/10/2012 3. et 4. 11/10/2012 5. 29/11/2012 6. 28/11/2012 7. et 8. 26/11/2012
Soudeurs (TIG manuel)	130	1. TJC, 130 2. TJC, 609, 157 3. TJC, 130 4. TJC, 609, 130, 052 5. JCT, 157 6. JCT, 52 7. MS, 157, 609 8. MS, 130
Opérateurs (soudage sous flux)	137	1. et 2. 213 3. et 4. 213, 137 5. 137 6. 137 7. 213, 137 8. 52, 137, 213
Traitement thermique réalisé	580 à 600°C 90 minutes	1. et 2. 580 - 600°C / 110 minutes 3. 580 - 590°C / 88 minutes 4. 580 - 585°C / 84 minutes (local) + 580 - 600°C / 112 minutes (local après réparation) 5. et 6. 580 - 595°C / 90 min 7. et 8. 580 - 595°C / 96 minutes
Coupons témoins couvrant la période de soudage	CT-12-0202	CT-13-0010 CT-13-0434

Annexe 10 : Vieillissement sous déformation

(extrait de la réponse de l'IRSN à la saisine de l'ASN en référence [93])

Description du phénomène de vieillissement sous déformation :

Le « vieillissement sous déformation » regroupe deux types de vieillissement:

- le vieillissement sous déformation statique qui correspond au changement de propriétés d'un matériau après déformation et au cours du temps, et ce même à température ambiante ;
- le vieillissement sous déformation dynamique qui correspond au changement de propriétés d'un matériau en cours de déformation, notamment lorsqu'une déformation plastique est appliquée en température.

Le vieillissement sous déformation (statique et dynamique) se produit par nature en zone fondue de soudage à l'occasion des effets thermomécaniques des passes successives de soudage. Cet effet est le plus important dans les passes de racine des soudures épaisses qui sont confrontés aux contraintes de retrait des passes supérieures.

Ces deux types de vieillissement sous déformation sont dus à des interactions entre les dislocations mobiles présentes dans le matériau et la présence d'atomes en solution solide interstitielle notamment les atomes de carbone et d'azote. Avec un temps suffisant, sous l'effet de la température ou sous l'effet d'une déformation en température, les atomes interstitiels diffusent vers les dislocations et provoquent leur « ancrage ». La remise en mouvement des dislocations lors d'une nouvelle sollicitation va alors être entravée par cet ancrage, provoquant ainsi « un durcissement » et des changements de propriétés mécaniques.

Dans le cas du vieillissement sous déformation statique, le matériau présente une densité de dislocations initiale produite lors des opérations de fabrication (écrouissage notamment). Avec un temps suffisant à température ambiante ou réduit à température élevée, les atomes interstitiels migrent vers ces dislocations disponibles et vont les ancrer.

Dans le cas du vieillissement sous déformation dynamique, la diffusion des interstitiels s'effectue pendant une déformation, sensiblement augmentée à haute température (à partir de 200 °C). La vitesse de diffusion des interstitiels augmentée avec la température, devient du même ordre de grandeur que la vitesse de mouvements des dislocations due à la déformation. Il y a alors une compétition de mobilité entre les dislocations et les interstitiels se traduisant par des « ancrages-désancrages » successifs des dislocations. Ce mouvement discontinu des dislocations entraînent un changement de comportement du matériau.

Le phénomène de vieillissement sous déformation (statique et dynamique) provoque ainsi un durcissement de la structure.

La sensibilité d'un matériau au phénomène de vieillissement sous déformation (statique et dynamique) peut se manifester lors des essais de tractions à température ambiante par un décrochement marquant le palier de la limite d'élasticité (el sur la Figure 57), puis par des instabilités au cours de la déformation plastique. Le palier de la limite d'élasticité et le décrochement augmentent avec le vieillissement.

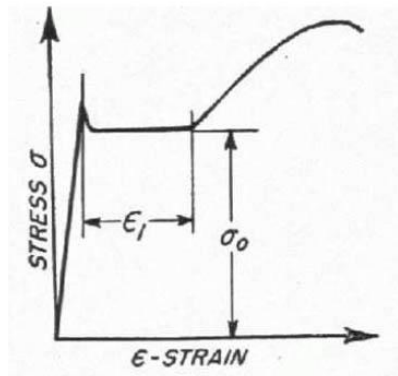


Figure 57 : Courbe de traction d'un matériau sensible au vieillissement sous déformation statique

La sensibilité au vieillissement sous déformation dynamique se manifeste de façon caractéristique lors des essais de tractions à chaud, par une augmentation de la résistance à la traction R_m à température élevée par rapport à celle à température ambiante : R_m à température ambiante $<$ R_m à haute température. Dans le cas d'un matériau non sensible au vieillissement sous déformation l'inversion des R_m n'existe pas : R_m à température ambiante $>$ R_m à haute température.

Le durcissement induit par l'ancrage des dislocations peut conduire à un décalage de la température de transition fragile/ductile d'un matériau vers les hautes températures.

Le vieillissement sous déformation (statique et dynamique) se produit par nature en zone fondue de soudage à l'occasion des effets thermomécaniques des passes successives de soudage. Cet effet est le plus important dans les passes de racine des soudures épaisses qui sont confrontées aux contraintes de retrait des passes supérieures.

Cas des aciers faiblement alliés:

Dans le cas des aciers faiblement alliés, le RCC-M (annexe Z G 6124) prévoit un décalage forfaitaire de 15 °C de la température de référence de transition fragile-ductile RTNDT pour le métal de base ou pour le joint soudé.

La courbe de l'annexe ZG, indexée à 60 MPa√m, ne s'applique qu'aux aciers faiblement alliés et non aux aciers carbone-manganèse (C-Mn). Comme il n'existe pas de courbe applicable explicitement aux aciers C-Mn, le fabricant Framatome a mené des études qui conduisent à la possibilité d'utiliser une courbe de la forme de l'annexe ZG mais indexée sur 100 MPa√m.

Afin d'éliminer ou de réduire l'impact de ce vieillissement, deux solutions sont possibles :

- pour le métal de base, un calmage à l'aluminium permet de faire précipiter des nitrures d'aluminium, supprimant l'azote libre. Il est nécessaire, en préalable, de réaliser une désoxydation poussée afin de bien réaliser la précipitation de nitrure d'aluminium ;
- pour les métaux déposés, le calmage à l'aluminium est inopérant, la cinétique de constitution de la zone fondue de soudage étant très différente de celle de l'élaboration des aciers et des produits sidérurgiques. Un traitement thermique de détensionnement (TTD) va permettre la précipitation des éléments interstitiels avec des éléments résiduels présents dans le métal déposé (bore, titane, vanadium notamment) et ainsi réduire la quantité des éléments interstitiels « libres », ce qui va limiter le vieillissement sous déformation (statique et dynamique).

Historique du phénomène :

Dans le dossier matériau de l'EPR [42], le fabricant indique qu'avec le traitement thermique de détensionnement appliqué aux soudures, le vieillissement sous déformation (statique et dynamique) est négligeable, sans définir les caractéristiques du traitement à appliquer.

Ces exigences se basent sur le retour d'expérience et l'analyse faite dans le dossier réglementaire du palier N4 en référence [44]. Dans ce dossier, Framatome a identifié un vieillissement sous déformation après traitement thermique conduisant à un décalage forfaitaire de la température de transition prise en référence de 15 °C (incluant une dispersion de 10 °C sur la détermination de décalage des courbes) pour des aciers faiblement alliés dont les soudures sont détensionnées. Cette valeur a été déterminée sur la base d'un programme portant sur l'évolution des courbes de transition de résiliences après écrouissage de 5%. Framatome transfère ces résultats sur les aciers C-Mn en se basant sur une étude bibliographique réalisée par EDF en 1994 en référence [46].

Dans le cadre de la fabrication du circuit secondaire principal (CSP) du palier N4, l'inversion des résistances à la traction R_m à température élevée par rapport à celles obtenues à température ambiante n'a pas été observée sur les soudures après traitement thermique de détensionnement (TTD de 590 °C pendant 2 à 2,5 minutes par millimètre d'épaisseur).

Mise en évidence du phénomène de vieillissement sous déformation sur les soudures VVP du réacteur EPR de Flamanville:

Dans le cadre de la fabrication des circuits secondaires principaux de l'EPR, l'inversion des résistances à la traction R_m à température élevée par rapport à celles observées à température ambiante est constatée sur certains assemblages témoins des soudures de production après un traitement thermique de détensionnement (TTD) identique à celui du palier N4.

Cela implique qu'il reste suffisamment d'interstitiels libres pour décaler la température initiale de transition malgré l'action du traitement thermique de détensionnement.

Assemblage témoins (procédé de soudage et sens de soudage)			Traction en métal déposé R_m (MPa)	
			T (amb.)	T (300 °C)
			≥ 490 MPa	≥ 390 MPa
TIG manuel + TIG Orbital	15-0141	M	648	662
		D	646	677
	16-0186	M	659	715
		D	671	714
	17-0065	M	645	642
		D	642	653
	17-0319 (optimisation séquence)		655	692
TIG manuel+ EE	15-0054		543	609

(univers 2M ou Cymeta)	16-0039	542	567
	16-0171	Non réalisé : épaisseur faible des assemblages	
	16-0210	Non réalisé : épaisseur faible des assemblages	
	16-0229	554	573
	16-0234	586	611
	17-0031	578	626
	17-0195	Non réalisé : épaisseur faible des assemblages	
	17-0229	577	622
	17-0294	Non réalisé : épaisseur faible des assemblages	
	18-0005	587	603
TIG manuel + Fil/flux (préfabrication)	13-0010	560	508
	13-0434	551	509

Tableau 18 : Valeurs de traction à température ambiante et à 300 °C sur les assemblages témoins de soudage issues des notes en référence [30] et [47] (valeurs en gras pour les cas où $R_m(300\text{ °C}) > R_m(\text{ambiante})$)

Une inversion des valeurs de R_m est constatée avec les procédés de soudage suivants :

- TIG manuel + TIG orbital ;
- TIG manuel + électrode enrobée (UNIVERS 2M ou CYMETA) ;
- TIG manuel.

À la lecture des résultats de traction des assemblages témoins, EDF a mené, sur l'assemblage témoin 15-0054 (TIG manuel+EE), des essais de traction complémentaires au centre technique Framatome d'Erlangen afin de vérifier que le traitement thermique et les premiers essais de traction avaient bien été réalisés dans les conditions adéquates.

Certaines éprouvettes de traction ont subi deux traitements thermiques : un premier lors du traitement du coupon témoin CT 15-0054 et un deuxième dans l'éventualité d'une non-réalisation du premier.

À l'issue des résultats présentés au Tableau 19, EDF a conclu, dans la note en référence [30] à une sensibilité de certaines soudures au vieillissement sous déformation malgré le traitement thermique réalisé. L'hypothèse d'un défaut de réalisation des essais ou du traitement thermique a été écartée.

Éprouvette (référence)	Température (°C)	Traitement thermique	Vitesse de sollicitation dans le domaine plastique	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)
Essais d'origine	Ambiante	Oui	0,0067/s	461	543
Essais d'origine	300	Oui	6 mm/min jusqu'à 2% puis 11mm/min	368	609
15-0054-T1	Ambiante	Non	0,0067/s	439	521
15-0054-T2	300	Non	6 mm/min jusqu'à 2% puis 11mm/min	380	599
15-0054-T3	300	Oui	6 mm/min jusqu'à 2% puis 11mm/min	397	561
15-0054-T4	300	Oui	1,5mm/min	380	557

Tableau 19 : Synthèse des essais de tractions complémentaires réalisés sur le coupon témoin CT 15-0054 (extrait de la note en référence [30])

Annexe 11 : Traitement retenu par EDF pour chaque soudure VVP en exclusion de rupture (acceptée en l'état, réparation, remise à niveau, justification en écart)

Train	Repère (annexe 4)	Nom	MOS	CND	Traitement	Cause principale (si réparation ou remise à
Train 1	A	VVP 110TY-F01-3 - FW6	TIG+EE	NC	Remise à niveau en TENACITO-R	Défaut de compacité Cara. Méca. non conformes EDR
Train 1	B	VVP 110TY-F02-1- FW7	TIG Orb.	à venir	selon résultats CND	
Train 1	C	VVP 110TY-F03-1- FW8	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 1	D	VVP 110TY-F03-1- FW9	TIG+EE	NC	Remise à niveau en TENACITO-R	Défaut de compacité Cara. Méca. non conformes EDR
Train 1	E	EPP610TWM -1- S2	TIG + ASF	CF	Justification en écart	
Train 1	F	EPP610TWM -1- S1	TIG + ASF	CF	Justification en écart	
Train 1	G	VVP 120TY-F01-1- FW101	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 1	H	VVP 120TY-F01-3 - F5	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 1	I	VVP 131TY-F01-1- F1	TIG	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 1	J	VVP 132TY-F01-1- F1	TIG	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 1	K	VVP 120TY-F01-3 - FW12	TIG Orb.	à venir	selon résultats CND	
Train 1	L	VVP 130TY-F01-3 - FW13	TIG Orb.	à venir	selon résultats CND	
Train 1	M	VVP 130TY-F01-1- FW14	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 1	N	VVP 130TY-F01-1- FW15	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TIG Orb. ou TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 1	O	VVP 130TY-F02-1- FW16	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité Cara. Méca. non conformes EDR
Train 1	P	VVP 130TY-F02-1- FW17	TIG Orb.	CF	Acceptation en l'état	
Train 1	Q	VVP 130TY-F02-1- FW101	TIG Orb.	CF	Acceptation en l'état	
Train 2	A	VVP210TY-F01-3 - FW1	TIG+EE	NC	Remise à niveau en TENACITO-R	Défaut de compacité Cara. Méca. non conformes EDR
Train 2	B	VVP210TY-F02-1- FW2	TIG Orb.	CF	Acceptation en l'état	
Train 2	C	VVP210TY-F03-1- FW3	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 2	D	VVP210TY-F03-1- FW4	TIG+EE	NC	Remise à niveau en TENACITO-R	Défaut de compacité Cara. Méca. non conformes EDR
Train 2	E	EPP6208TWM -1- S2	TIG + ASF	CF	Justification en écart	
Train 2	F	EPP6208TWM -1- S1	TIG + ASF	NC	Justification en écart	
Train 2	G	VVP2120TY-F01-1- FW1	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR

Train	Repère (annexe 4)	Nom	MOS	CND	Traitement	Cause principale (si réparation ou remise à
Train 2	H	VVP2120TY-F013 - F5	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 2	I	VVP231TY-F011- F1	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 2	J	VVP232TY-F011- F1	TIG+EE	NC	Remise à niveau en TENACITO-R	Défaut de compacité Cara. Méca. non conformes EDR
Train 2	K	VVP2120TY-F013 - FW2	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 2	L	VVP2130TY-F013 - FW3	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 2	M	VVP2130TY-F011- FW301	TIG+EE	NC	Remise à niveau en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité Cara. Méca. non conformes EDR
Train 2	N	VVP2130TY-F011- FW5	TIG+EE	NC	Remise à niveau en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité Cara. Méca. non conformes EDR
Train 2	P	VVP2130TY-F02-1- FW6	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TIG Orb. ou TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 2	Q	VVP2130TY-F02-1- FW7	TIG Orb.	CF	Acceptation en l'état	
Train 3	A	VVP3110TY-F013 - FW1	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 3	B	VVP3110TY-F02-1- FW2	TIG Orb.	CF	Acceptation en l'état	
Train 3	C	VVP3110TY-F03-1- FW3	TIG Orb.	CF	Acceptation en l'état	
Train 3	D	VVP3110TY-F03-1- FW4	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 3	E	EPP6307TWM-1- S2	TIG + ASF	CF	Justification en écart	
Train 3	F	EPP6307TWM-1- S1	TIG + ASF	CF	Justification en écart	
Train 3	G	VVP3120TY-F011- FW1	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 3	H	VVP3120TY-F013 - F5	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 3	I	VVP331TY-F011- F1	TIG+EE	NC	Remise à niveau en TENACITO-R	Défaut de compacité Cara. Méca. non conformes EDR
Train 3	J	VVP332TY-F011- F101	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 3	K	VVP3120TY-F013 - FW2	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 3	L	VVP3130TY-F013 - FW3	TIG Orb.	CF	Acceptation en l'état	
Train 3	M	VVP3130TY-F011- FW4	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 3	N	VVP3130TY-F011- FW5	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 3	P	VVP3130TY-F02-1- FW6	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 3	Q	VVP3130TY-F02-1- FW7	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TIG Orb. ou TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR

Train	Repère (annexe 4)	Nom	MOS	CND	Traitement	Cause principale (si réparation ou remise à
Train 4	A	VVP4110TY-F01-3 - FW6	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 4	B	VVP4110TY-F02-1 - FW7	TIG Orb.	à venir	selon résultats CND	
Train 4	C	VVP4110TY-F03-1 - FW8	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 4	D	VVP4110TY-F03-1 - FW9	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 4	E	EPP6410TWM-1- S2	TIG + ASF	CF	Justification en écart	
Train 4	F	EPP6410TWM-1- S1	TIG + ASF	CF	Justification en écart	
Train 4	G	VVP4120TY-F01-1 - FW10	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 4	H	VVP4120TY-F01-3 - F5	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 4	I	VVP431TY-F01-1 - F1	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 4	J	VVP432TY-F01-1 - F1	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 4	K	VVP4120TY-F01-3 - FW12	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 4	L	VVP4130TY-F01-3 - FW13	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 4	M	VVP4130TY-F01-1 - FW14	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 4	N	VVP4130TY-F01-1 - FW15	TIG+EE	CF	Remise à niveau en TIG Orb. ou TENACITO-R	Cara. Méca. non conformes EDR
Train 4	O	VVP4130TY-F02-1 - FW16	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 4	P	VVP4130TY-F02-1 - FW17	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité
Train 4	Q	VVP4130TY-F02-1 - FW18	TIG Orb.	NC	Réparation en TIG Orb. ou TENACITO-R	Défaut de compacité

Annexe 12 : Positions de soudage

Un des facteurs qui influe sur le mode d'exécution de la soudure et qui peut avoir une importance sur la qualité de l'assemblage est la position de soudage, c'est-à-dire la position du joint par rapport au soudeur et cela en fonction du type de soudure (bout à bout ou en angle). Une soudure circulaire est dite exécutée en rotation lorsque l'assemblage tourne autour de l'axe du tube à assembler. Le soudeur dépose son métal en restant toujours dans la même position. Une soudure circulaire est dite exécutée en position lorsque l'assemblage restant fixe, le soudeur dépose son métal dans toutes les positions autour du tube.






	Tube en rotation Axe horizontal Soudure à plat		Tube fixe Axe horizontal Soudure vertical descendant
	Tube fixe Axe horizontal Soudure vertical montant		Tube fixe Axe incliné Soudage vertical montant
	Tube fixe Axe vertical Soudure en corniche		

Figure 58: Position de soudage pour des soudures bout à bout de tubes
(d'après la norme EN ISO 6947)

**Annexe 13 : Courrier EDF D458519013082 du 15 Mars 2019 : EPR FA3 - GP ESPN -
Démarche de traitement des écarts affectant les soudures des lignes vapeur
principales en exclusion de rupture du réacteur EPR FA3
Projets de Positions et Actions EDF.**



Monsieur le Directeur des Equipements sous Pression nucléaires
21 boulevard Voltaire
BP 37815
21078 Dijon Cedex

[REDACTED]

Vos références : CODEP-DEP-2019-001227
Nos D458519013082
références :

Interlocuteur : [REDACTED]
N° téléphone : [REDACTED]
Objet : EPR FA3 - GP ESPN - Démarche de traitement des écarts affectant les soudures des lignes vapeur principales en exclusion de rupture du réacteur EPR FA3 – Projets de Positions et Actions EDF

Montrouge, le 15/03/2019

Monsieur le Directeur,

Suite à la transmission du projet de rapport « GP ESPN Démarche de traitement des écarts affectant les soudures des lignes vapeur principales en exclusion de rupture du réacteur EPR FA3 » et à la réunion préparatoire du 12 mars 2019 dans vos locaux, veuillez trouver, en annexe 1, les projets de positions et actions EDF suite aux projets de recommandations. Les échéances des actions sont affichées en première intention et seront affinées à l'issue de la réunion du Groupe Permanent. L'annexe 3 présente nos remarques sur le projet de rapport.

Nous vous prions d'agréer, Monsieur le Directeur, l'expression de notre considération distinguée.

Copies externes :

ASN DEP : [REDACTED]
ASN DCN : [REDACTED]
ASN Caen : [REDACTED]

PJ : /

ANNEXE 1 : projets de positions et actions

Projet de Recommandation n°1 :

Le rapporteur recommande qu'EDF prenne en compte les conséquences des écarts affectant le niveau de confiance au niveau de chaque donnée d'entrée des calculs à la rupture brutale - ce qui comprend les caractéristiques mécaniques, la compacité du matériau et les chargements considérés - , afin de définir pour chacune d'entre elles une valeur enveloppe, dont l'exploitant doit démontrer qu'elle est atteinte avec un haut niveau de confiance.

Projet de Position n°1 :

Par le courrier D458519005547 et la note D309517029037 révision C, EDF a communiqué la typologie des écarts affectant les soudures VVP en Exclusion De Rupture (écarts au RCC-M et aux exigences spécifiques du référentiel Exclusion De Rupture). Ces écarts affectent les données d'entrée des calculs de rupture brutale de la manière suivante :

- Chargements : Aucun des écarts constatés n'affecte l'estimation des chargements. Pour autant, des conservatismes sont bien pris en compte sur ce paramètre. Les situations et charges considérées pour les calculs de rupture brutale pour les lignes VVP ont été communiquées par le courrier D458519002554 (réponse à la demande A10). Les conservatismes liés à la prise en compte des chargements dans les calculs de rupture brutale ont été communiqués par le courrier D458519002554 (réponse à la demande A1).
- Caractéristiques mécaniques : Des écarts sur les caractéristiques mécaniques des soudures VVP en Exclusion De Rupture ont été détectés. Ce sont d'ailleurs ces écarts qui ont conduit à prendre la décision de remettre à niveau certaines soudures réalisées sur site. Ainsi, après remise à niveau avec un procédé de soudage qualifié, les écarts relatifs aux caractéristiques mécaniques porteront uniquement sur les soudures de traversées (hormis quelques écarts sur certains lots de métaux d'apport qui constitueront des résidus des opérations passées sur les soudures et qui seront justifiés par l'absence de contribution à la tenue mécanique de la soudure). Pour les soudures de traversées, les conservatismes considérés dans le programme d'essais mécaniques proposé par EDF et dans la définition des valeurs de ténacité à considérer dans les calculs ont pour objectif de définir des valeurs enveloppes au regard des écarts constatés. Le haut niveau de confiance dans les caractéristiques mécaniques considérées dans les calculs de rupture brutale est apporté par le programme d'essais et la méthodologie proposés par EDF.
- Compacité du matériau : La compacité du matériau est assurée par les contrôles non destructifs mis en œuvre sur les soudures de production. Le haut niveau de confiance vis-à-vis de ce paramètre est notamment assuré par la relecture des films radiographiques réalisée par EDF et Framatome, l'organisation mise en œuvre pour les contrôles UT et le programme engagé pour compléter l'illustration de performance du procédé UT tel que décrit dans les actions suite aux projets de recommandations n°11 et 13.

Projet d'Action n°1 :

Pour chaque soudure VVP en Exclusion De Rupture, la matrice de conformité de la soudure qui liste l'ensemble des écarts détectés identifiera les écarts qui ne seraient pas résorbés par l'opération de réparation ou de remise à niveau. Ces écarts seront alors classifiés selon leur impact sur les données

d'entrées des calculs de rupture brutale (chargement, caractéristiques mécaniques ou compacité).

Un livrable de synthèse sera rédigé pour préciser le caractère enveloppe de chacun des paramètres de calculs de rupture brutale (en démontrant le haut niveau de confiance associé) au regard notamment des écarts non résorbés par les réparations et remises à niveau et affectant certains paramètres. Ce livrable valorisera le bilan des conservatismes considérés dans les calculs de rupture brutale pour les 3 volets ci-dessus qui a été communiqué dans le Journal des Points Ouverts (soudures de traversées – demande PEM1). Pour les soudures de traversées VVP, une première révision du livrable sera émise pour juin 2019 (ce livrable sera mis à jour suite aux résultats du programme d'essais sur les soudures ARE Q3 – cf position suite au projet de recommandation n°4).

Projet de Recommandation n°2 :

Le rapporteur recommande que l'exploitant engage dès à présent les opérations d'approvisionnement nécessaires aux scénarios de réparation ou de remise à niveau des soudures de traversée.

Projet de Recommandation n°3 :

Le rapporteur recommande qu'EDF finalise les études techniques et les analyses de risques relatives aux réparations des traversées d'enceinte VVP.

Projet de Positions n°2 et 3 :

Lors d'une réunion entre les Directions d'EDF et Framatome le 22/02/19, la décision a été prise de créer la structure projet et d'engager le grément de ressources compétentes afin de lancer les activités nécessaires pour étudier en détails les risques associés au scénario de remise à niveau des soudures de traversées et de lancer au plus tôt les approvisionnements nécessaires. Ces activités sont en cours.

Initialement, EDF avait identifié que le délai nécessaire pour remettre à niveau les soudures de traversées aurait un impact trop important sur la date de démarrage et avait donc envisagé cette opération lors du premier arrêt. Suite à une analyse plus poussée des risques encourus, via notamment des visites de terrain, EDF a identifié pour ces opérations plusieurs risques majeurs présentant des effets faibles pouvant conduire à l'indisponibilité de la tranche pendant une durée importante. Ainsi, la volonté d'EDF de privilégier une justification du maintien en l'état des soudures de traversées, et, le cas échéant, une remise à niveau post démarrage, est aujourd'hui prioritairement motivée par les risques techniques associés à une telle opération et la nécessité de les sécuriser, via notamment des entraînements en taille réelle. L'analyse des risques associés à une telle remise à niveau est présentée en annexe 2 du présent courrier (elle constitue une mise à jour de l'analyse initialement communiquée dans le Journal des Points Ouverts).

Cette opération présente de nombreux enjeux industriels pour lesquels la faisabilité doit être confirmée par des études complémentaires :

1. les études de bridage des lignes en amont du chantier de remise à niveau afin d'éviter un désalignement voire un désaccostage des lignes lors de l'opération ;
2. le volet « outillages » pour lequel plusieurs outillages spécifiques sont à développer et à réaliser pour ce chantier, en particulier, la possibilité d'utiliser une machine

d'usinage adaptée pour éliminer les soudures W1 et W2 et obtenir un chanfrein de soudage correct pour la remise à niveau, est un enjeu majeur ;

3. les études d'installations de chantier, telles que les études de levage, échafaudage et planchers lourds, démontage de chemin de câbles (y compris l'analyse des besoins de requalification éventuels) ;
4. les simulations d'acheminement de l'outillage et des pièces.

L'enchaînement des activités met en évidence plusieurs phases qui présentent des risques majeurs pour l'intégrité globale de l'installation avec un impact potentiellement irréversible en cas d'échec et pour lesquels des parades robustes ne sont pas garanties à ce stade :

- la capacité à assurer le bridage des lignes pour assurer la sécurité des opérateurs et éviter un désalignement voire un désaccostage fatal ;
- la capacité à désolidariser le compensateur du fourreau génie civil enceinte externe sur lequel il est soudé, sans endommager celui-ci. En effet, l'acheminement à poste d'un nouveau compensateur n'est pas garanti en raison de sa taille ;
- la découpe de la manchette du fourreau installé dans le génie civil en maintenant la capacité de soudage une fois les remises à niveau effectuées, l'appariement/ajustement côté fourreau GC et côté flasque forgé des manchettes ;
- la possibilité de réaliser les affouillements nécessaires aux remises à niveau sur les soudures W1 et W2.

Une question reste également ouverte sur l'impact du chantier sur l'installation globale : il s'agit de la capacité à réaliser des traitements thermiques dans l'espace entre-enceinte. Une étude d'impact doit être menée pour vérifier la tenue du béton aux températures mises en jeu lors des traitements thermiques. La résistance thermique des installations en proximité, chemins de câbles et câbles doit également être contrôlée.

En plus des risques exprimés ci-dessus, l'opération entraînerait la perte de continuité du confinement de l'enceinte avec un risque de dégradation de la qualité de confinement post remise à niveau.

Dans le scénario privilégié par EDF, il a été identifié le besoin d'approvisionner une manchette de remplacement en deux demi-coquilles. La préparation de cet approvisionnement est en cours et inclus une phase de vérification sur maquette de la faisabilité de la réalisation des soudures longitudinales en tenant compte des déformations inhérentes au traitement thermique et au soudage.

Par ailleurs, si les risques d'endommagement du compensateur restaient trop importants à l'issue des études de dérisquage, EDF envisage l'approvisionnement d'un nouveau compensateur en deux parties, mais la faisabilité d'une telle disposition n'est pas garantie à date.

Projet d'Actions n°2 et 3 :

Sans objet du fait des décisions déjà prises et présentées dans la position.

Projet de Recommandation n°4 :

Le rapporteur recommande que la caractérisation des propriétés mécaniques des soudures de traversée proposée par EDF soit complétée par des programmes d'essais permettant d'une part d'acquérir une connaissance du procédé de soudage fil/flux associé au type de métaux d'apport utilisés suffisante pour notamment comprendre et reproduire les phénomènes observés et d'autre part d'obtenir, avec un haut niveau de confiance, des caractéristiques enveloppes de celles des soudures de production.

Ces programmes d'essai doivent permettre d'identifier les paramètres associés à la mise en œuvre du procédé fil/flux qui influent sur les caractéristiques mécaniques des soudures réalisées avec ce procédé et ainsi définir les valeurs « limites » de ces paramètres qui amènent à l'obtention des caractéristiques mécaniques les plus altérées en terme de résilience, de ténacité, de traction et de sensibilité au phénomène de vieillissement sous déformation.

Dans un second temps, des assemblages soudés pourront alors être réalisés avec ces valeurs « limites », à partir de plusieurs lots de couple fil/flux de même désignation commerciale que celui mis en œuvre pour les soudures de traversée et dans des conditions de soudage représentatives de ces soudures.

Le rapporteur recommande également que l'exploitant définisse les essais à réaliser sur ces assemblages qui permettront de caractériser de manière conservative le matériau, notamment dans les zones brutes de solidification.

Projet de Position n°4 :

Malgré les différences pouvant exister entre les soudures de traversées VVP et les éléments considérés par EDF dans la base de données, EDF juge que ces éléments sont pertinents pour définir des caractéristiques mécaniques enveloppes. En effet :

- L'obtention de valeurs de résilience similaires entre les CT et les QMOS tend à montrer que la géométrie n'a pas d'impact sur les valeurs de résilience. La géométrie est similaire entre les CT et les soudures de production. Par ailleurs, les résultats des recettes ne permettent pas de juger d'un effet de la géométrie sur les valeurs de résilience car elles ont été réalisées dans des conditions non conformes.
- EDF considère que le recyclage du flux a peu d'impact sur les valeurs de résilience (ce point sera étayé – cf action ci-dessous). Ainsi, le choix du centre technique de ne pas recycler le flux n'a pas été fait pour des raisons de qualité mais par simplicité opérationnelle dans des conditions de laboratoire : le recyclage du flux correspond à la pratique industrielle.
- Pour la passe de finition de la maquette 2, la présence d'une passe en milieu de cordon (centrée sur l'axe de la soudure) conduit à une Zone Brute de Solidification qui est défavorable vis-à-vis de la résilience. Ce constat explique la différence de résultats entre les prélèvements en peau externe et à mi-épaisseur sur la maquette 2. En tout état de cause, les macrographies des maquettes 1 et 2 et des coupons témoins, présentent des faciès similaires en peau.
- La note en référence [35] explicite en quoi la différence de géométrie du chanfrein en racine n'a pas d'impact sur les résultats de résilience en peau. Par ailleurs, l'empilement des passes entre les soudures Q1 et Q3 est identique comme le montre la figure 40.

- Les maquettes 3 et 4 ne peuvent que contribuer ‘défavorablement’ à l’évaluation des propriétés mécaniques. Les considérer dans la base de données conduit à prendre un conservatisme sur la qualité du flux effectivement utilisé en production. En effet, pour ces maquettes, l’indice de basicité du flux utilisé pour les soudures de traversée est faible par rapport aux recommandations ce qui implique une moins bonne désoxydation du bain de fusion. Le choix de ce flux pour ces maquettes est lié à ce constat et implique :
 - Pas (ou peu) de désoxydation du bain de fusion ;
 - Un apport d’oxygène provenant des oxydes contenus dans le flux (rutile = oxyde de titane).
- Les écarts sur les soudures de traversées mentionnés dans le projet de rapport sont sans impact sur les valeurs de résilience :
 - La passe ayant été déposée avec une énergie non conforme, a été éliminée.
 - Les écarts de préchauffage par rapport à la température imposée par le DMOS concernent des soudures réalisées sur site et non pas les soudures de traversées VVP.

Via cette base de données, EDF vise à définir des caractéristiques mécaniques enveloppes mais permettant de démontrer qu’elles sont suffisantes pour assurer la stabilité d’un éventuel défaut. Concernant la possibilité de ne pas capter les caractéristiques mécaniques d’une Zone Brute de Solidification, EDF rappelle que, dans le domaine de la transition, la rupture d’une éprouvette (de résilience ou de ténacité) est imposée par la zone la plus faible (théorie du maillon le plus faible). Ainsi, il suffit qu’une partie de l’épaisseur des éprouvettes prélevées dans la soudure contienne une zone de type Zone Brute de Solidification pour que le résultat soit piloté par cette zone. A titre d’illustration, nous pouvons comparer les résultats obtenus pour la maquette réalisée en électrode enrobée UNIVERS 2M 3852 visant à reproduire des microstructures peu recristallisées (passes épaisses) entre :

- des essais avec des éprouvettes avec un fond d’entaille situé uniquement en ZBS (orientation VWS selon la norme ISO 9016),
- des essais avec des éprouvettes avec un fond d’entaille situé uniquement en zone recristallisée (ZR) (orientation VWS selon la norme ISO 9016),
- et des essais avec des éprouvettes orientées de manière classique (VWT selon la norme ISO 9016) dont le fond d’entaille de 10 mm de longueur traverse différentes microstructures (ZBS et ZR).

Le tableau ci-dessous montre bien que les résultats obtenus à -20°C pour l’orientation standard (VWT) sont comparables aux résultats obtenus avec les éprouvettes VWS en ZBS.

Type d’éprouvette	Nombre d’essais	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
VWS – ZBS	10	61	90	105

VWS - ZR	10	98	138	162
VWT	5	52	87	105

EDF partage le besoin de renforcer la base de données permettant de définir les caractéristiques mécaniques pour les calculs de rupture brutale. EDF considère en revanche que les soudures ARE Q3 (réalisées avec un lot de métal d'apport identique à celui des traversées) sont le meilleur moyen d'obtenir une base de données représentative afin d'évaluer les caractéristiques intrinsèques du lot du métal d'apport utilisé.

Pour cette raison, EDF a sacrifié deux nouvelles soudures ARE Q3 réalisées avec le même métal d'apport que les soudures de traversées afin de compléter la base de données expérimentale (essais de ténacité et quantification du VSD « résiduel »).

Enfin, concernant les laboratoires autorisés pour réaliser les différents programmes d'essais, EDF rappelle que le Centre Technique Framatome d'Erlangen :

- est déjà impliqué dans le programme d'essais en cours (essais sur la première soudure ARE Q3 expertisée),
- dispose d'une expertise technique, notamment sur les essais à chaud, qui est précieuse et de nature à apporter un haut niveau de confiance sur les résultats obtenus,
- a déjà été impliqué dans différents programmes d'essais, notamment pour le sujet des calottes de cuve,
- a fait l'objet d'un audit par l'ASN et l'IRSN.

Ainsi, pour ces raisons, et dans la mesure où l'ensemble des programmes d'essais fait systématiquement l'objet d'une surveillance par une Tierce Partie indépendante, EDF souhaite que le Centre Technique d'Erlangen puisse continuer à être partie prenante des programmes d'essais en cours et à venir.

Les résultats du programme d'essais réalisés sur les deux nouvelles soudures ARE Q3 expertisées seront disponibles fin septembre 2019, sous réserve de réalisation de ces essais au Centre Technique Framatome d'Erlangen.

Projet d'Action n°4 :

Pour ce qui concerne l'effet du recyclage du flux sur les valeurs de résilience, EDF réalisera les actions suivantes :

- sollicitation du fournisseur de métal d'apport pour savoir s'il dispose d'une étude de l'impact du recyclage du flux sur les valeurs de résilience,
- à défaut, réalisation d'un programme d'essais ciblé sur le recyclage du flux. Des maquettes réalisées avec et sans recyclage du flux seront testées afin de juger de cet impact.

Les conclusions seront transmises au plus tard fin septembre 2019.

Projet de Recommandation n°5 :

Le rapporteur recommande qu'EDF établisse la corrélation entre la ténacité et la résilience dans le domaine de transition à partir des valeurs obtenues lors du programme d'essais aux « limites » et de résultats issus de soudures représentatives des soudures de préfabrication. Le rapporteur considère que les résultats obtenus sur les assemblages témoins, la soudure ARE Q3 ainsi que sur les maquettes 1 et 2 peuvent compléter ceux qui seront obtenus par l'intermédiaire du programme d'essais aux « limites ».

Le rapporteur recommande également qu'EDF présente les éléments permettant de valider la corrélation entre la résilience moyenne au palier ductile et la résistance à l'amorçage de la déchirure retenue pour le domaine ductile.

Enfin, le rapporteur recommande qu'EDF valide les hypothèses de la méthode de détermination des propriétés de ténacité dans le domaine de transition fragile-ductile et justifie les provisions retenues compte tenu des écarts constatés lors de la réalisation des soudures des traversées VVP et du manque d'échantillons de matière provenant de ces soudures.

Projet de Position n°5 :

Ténacité dans le domaine ductile :

Concernant l'évaluation de la ténacité dans le domaine ductile, il n'est pas proposé de s'appuyer sur une corrélation ténacité-résilience mais de s'appuyer sur les propriétés de ténacité directement évaluées sur les différentes soudures (soudures ARE Q3 expertisées) avec un programme complet. Ce programme inclura des essais à différentes températures afin d'appréhender une éventuelle variation de la ténacité non monotone entre 200°C et 300°C qui pourrait être due au VSD pour un matériau significativement sensible à ce phénomène.

Ténacité dans le domaine de transition fragile-ductile :

Pour le domaine de la transition fragile-ductile, comme indiqué dans le courrier D305118007912 rev. A, EDF retiendra une démarche similaire à l'approche N4 pour définir la courbe de ténacité dans le domaine de la transition, afin d'assurer des facteurs de sécurité équivalents dans les données retenues. Cela permettra de justifier le niveau de résilience qui sera associé à la ténacité de 100 MPa.m^{0.5}. Une réserve supplémentaire sera considérée du fait du nombre d'échantillons limité, par la définition d'une courbe de résilience de référence significativement enveloppe des données expérimentales disponibles, via notamment l'exploitation des maquettes 3 et 4. Enfin, la validité des différentes hypothèses comme l'applicabilité de la courbe Z G sera vérifiée à partir des résultats expérimentaux obtenus.

Projet d'Action n°5 :

EDF rédigera une note qui présentera les conservatismes introduits en particulier du fait du nombre d'échantillon limité et justifiera en quoi la courbe de ténacité dans le domaine de la transition est enveloppe avec un haut niveau de confiance. Une première version de cette note sera transmise en juin 2019 (cette note sera mise à jour à l'issue du programme d'essais réalisés sur les deux nouvelles soudures ARE Q3 expertisées – cf position suite au projet de recommandation n°4).

Projet de Recommandation n°6 :

Le rapporteur recommande qu'EDF identifie, les causes liées à l'inversion de Rm identifié lors des premiers résultats acquis lors d'essais mécaniques réalisés sur la soudure ARE Q3 (ARE 3510TY-F02 S5) ainsi que l'absence de cette inversion lors des essais réalisés sur les assemblages témoins de soudage. EDF vérifiera que le phénomène de vieillissement sous déformation est bien à l'origine de cette inversion.

Projet de Position n°6 :

L'« inversion des Rm » observée sur la soudure ARE Q3 expertisée est totalement représentative d'un phénomène de vieillissement sous déformation (VSD) puisque ce phénomène présente les deux caractéristiques suivantes :

- Un décalage vers les températures positives de la transition fragile-ductile ;
- Un creux de ductilité dans le domaine de température 200°C – 300°C.

Initialement, EDF avait considéré qu'un programme de quantification du VSD devait être engagé pour un matériau uniquement lorsqu'une « inversion de Rm » était constatée. Pour autant, l'analyse des résultats des coupons témoins de fabrication montrent que pour un procédé de soudage donné, une « inversion des Rm » n'est pas systématiquement constatée (cas observé pour le TIG Orbital). En conséquence, EDF a décidé de quantifier le VSD pour les métaux d'apport utilisés pour les soudures VVP en Exclusion De Rupture indépendamment d'un constat ou non d'« inversion des Rm ».

Dans le cas des soudures de traversées, une des deux soudures ARE Q3 supplémentaires expertisées permettra de quantifier de manière enveloppe le décalage dû au VSD pour le lot de métal d'apport fil/flux utilisé pour ces soudures (qu'une « inversion des Rm » ait été observée ou non).

Les causes de la présence ou non d'une « inversion de Rm » pour des matériaux présentant une possible sensibilité au VSD ne sont pas clairement identifiées. A ce stade, l'hypothèse la plus probable concerne la variabilité dans les conditions de réalisation du Traitement Thermique de Détensionnement :

- l'objectif premier du TTD est de détensionner les soudures, les paramètres à retenir pour le TTD sont définis par le code vis-à-vis de cet objectif.
- le TTD permet également de limiter la sensibilité de la soudure au VSD, mais la durée du TTD n'est pas définie de façon à annihiler la sensibilité au VSD. En effet, si la réalisation d'un TTD d'une durée importante est favorable vis-à-vis de la limitation de la sensibilité au VSD, une durée de TTD trop longue conduirait à une baisse de certaines caractéristiques mécaniques (valeurs de Rm).

Afin de répondre à cette demande, il serait nécessaire de définir un programme de R&D qui ne serait pas compatible avec un projet industriel. Pour autant, la méthodologie proposée par EDF permettra de quantifier le VSD de manière conservative afin de déterminer avec un haut niveau de confiance le décalage de la courbe de transition due à ce phénomène à considérer dans les calculs de rupture brutale.

Projet d'Action n°6 :

Afin d'apporter des premiers éléments d'explication au constat de la présence d'« inversion des Rm » sur la soudure ARE Q3 alors que cela n'avait pas été constaté sur les coupons témoins de production, EDF comparera les résultats de l'ensemble du programme d'essais de quantification du VSD qui considère des matières d'origine différente (coupon témoin, maquette, soudure de production expertisée). Cette analyse sera transmise sous un mois après la finalisation du programme de quantification du VSD sur les différents métaux d'apport.

Projet de Recommandation n°7 :

Le rapporteur considère que le phénomène de vieillissement sous déformation peut avoir un impact direct sur la suffisance des caractéristiques mécaniques des soudures. Ainsi il recommande qu'EDF évalue cette sensibilité pour le métal d'apport fil/flux mis en œuvre dans les passes de remplissage des soudures de traversée VVP et évalue son impact sur la tenue mécanique des soudures.

Projet de Position n°7 :

En l'absence de matière représentative des soudures de traversées (soudure réalisée avec le même lot de métal d'apport que les soudures de traversées), EDF n'avait pas proposé de quantifier le Vieillissement Sous Déformation du lot de métal d'apport (fil/flux) utilisé pour le remplissage des soudures de traversées. En conséquence, EDF avait proposé de retenir une valeur de décalage de 40°C lié au VSD et de vérifier que cette valeur est conservative sur la base des résultats du programme de quantification du VSD réalisé sur les autres métaux d'apport utilisés pour les soudures VVP en Exclusion De Rupture.

Projet d'Action n°7 :

Afin de pouvoir quantifier expérimentalement le décalage de la courbe de transition lié au VSD pour le lot de métal d'apport fil/flux utilisé pour les soudures de traversées VVP, EDF utilisera une des deux nouvelles soudures ARE Q3 expertisées pour cette quantification. Ces résultats seront disponibles fin septembre 2019 tel qu'indiqué dans la position suite au projet de recommandation n°4.

Projet de Recommandation n°8 :

Le rapporteur recommande qu'EDF détermine le décalage de la température de référence de transition fragile-ductile induit par le vieillissement sous déformation en comparant la température de transition de la courbe de résilience du joint soudé à l'état initial en peau à celle en racine du joint soudé à l'état vieilli, et ceci dans la même section de soudage. De plus, EDF devra retenir l'indicateur conduisant au plus grand décalage de la température de transition entre les deux états.

Projet de Position n°8 :

EDF considère que le décalage des courbes de transition dû au VSD doit être réalisé de manière indépendante en peau et en racine de la soudure car :

- les différents matériaux qui font l'objet d'une quantification du VSD ne sont pas utilisés aux mêmes endroits dans la soudure : un seul procédé en peau et possibilité d'avoir un mélange de procédés en racine.
- les états métallurgiques ne sont pas comparables (a minima en termes de géométrie de passes et d'écrouissage).

Du fait d'un écrouissage lié aux opérations de soudage différent en peau et en racine (zone pour laquelle l'écrouissage est plus important), les soudures dans leur état post soudage (en intégrant le traitement thermique de détensionnement) présentent un état initial vis-à-vis du VSD différent. Il est donc important de caractériser l'impact du VSD avec le même traitement de sensibilisation (avec un écrouissage très enveloppe des déformations attendues en service et une durée minimale de traitement thermique à 250 °C suffisante pour garantir une saturation des effets de vieillissement) dans ces deux zones afin d'en déduire l'effet maximum.

EDF rappelle également que dans ce processus de caractérisation, l'écrouissage lui-même est de nature à décaler les courbes de résilience sans traduire un effet de vieillissement. Or :

- EDF n'a pas décidé à date de quantifier cet impact de l'écrouissage, mais de le conserver dans la quantification du VSD, ce qui est pénalisant (cela constitue donc un conservatisme dans le décalage in fine calculé).
- En faisant l'abstraction des différences des états métallurgiques et de matériaux évoquées plus haut, le fait de comparer la peau dans son état non sensibilisé (et donc non écroui) à la racine dans l'état sensibilisé revient à considérer un écrouissage cumulant (i) les effets de l'écrouissage induit par le soudage et (ii) ceux induit par le traitement de sensibilisation (5%). Ceci conduit à un impact de l'écrouissage très important sur le résultat final, difficilement quantifiable (l'écrouissage induit par le soudage ne peut être « estimé » que par simulation du soudage) et sans lien avec l'effet du VSD (pour lequel le traitement de sensibilisation est suffisant pour le saturer dans chacune des deux zones au regard de ce que peut connaître la soudure en service). Une telle méthode conduirait à attribuer au VSD l'effet dû au cumul d'écrouissage.

Ainsi, EDF considère que la méthode qu'il a proposée pour quantifier le décalage des courbes de transition dû au phénomène de Vieillessement Sous Déformation en vue de la réalisation des calculs de rupture est pertinente et conservative.

EDF confirme par ailleurs que le résultat le plus sévère entre T_{K7} , T_{K28} et $T_{K0.9}$ sera retenu. EDF considère que T_{K50} n'est pas pertinent compte tenu de la subjectivité de la mesure et du biais que cela peut induire.

Projet d'Action n°8 :

Sans objet

Projet de Recommandation n°9 :

Le rapporteur recommande qu'EDF définisse, avant l'engagement de son programme d'essais, les plans de prélèvement des éprouvettes dans les différents assemblages, échantillons ou maquettes utilisés ainsi que les températures auxquelles seront réalisés les essais de résilience pour établir les courbes de transition.

Projet de Position n°9 :

Le plan de prélèvement est établi à la réception de la matière, après vérification que la matière peut effectivement intégrer le programme d'essais demandé par EDF. EDF vérifie également que le plan de prélèvement est bien compatible avec le programme d'essais (et donc a fortiori avant les essais eux-mêmes).

A titre d'exemple, nous pouvons citer le coupon témoin CT 16-0234 pour lequel EDF a prélevé les résiliences de façon réfléchie.

Pour les températures des essais de résilience, les températures d'essais qui peuvent être définies en amont le sont. Toutefois, une partie des températures d'essais ne peut être définie qu'au fur et à mesure de la construction de la courbe de transition afin de disposer d'essais pertinents. La méthode retenue par EDF est la suivante :

- pour établir une courbe de transition, il faut viser un nombre d'éprouvettes compris entre 18 et 24,
- notre pratique est de réaliser généralement 3 essais à 0°C et 3 essais à -20°C,
- les autres températures d'essais sont définies au fur et à mesure de la construction de la courbe pour déterminer les points significatifs (palier bas, palier haut, pente de transition). Il n'est pas possible de déterminer a priori les températures d'essais, au risque de ne pas capter les points significatifs de la courbe de transition.

Ainsi, EDF définit bien les plans de prélèvement avant engagement des essais. Concernant les températures de réalisation des essais, elles sont définies au fur et à mesure de la construction de la courbe afin de déterminer les points significatifs (palier bas, palier haut, pente de transition) qui ne peuvent être définis a priori, notamment dans la zone de transition.

Projet d'Action n°9 :

Sans objet

Projet de Recommandation n°10 :

Le rapporteur recommande qu'EDF justifie que les procédés de contrôle non destructifs, notamment ultrasonores, mis en œuvre ont la capacité de détecter et d'identifier les indications possédant les caractéristiques définies par le fabricant pour les défauts inacceptables.

Projet de Position n°10 :

Il existe trois référentiels différents vis-à-vis des défauts inacceptables :

1. La notion de défaut inacceptable au sens du §3.4 de l'annexe 1 de l'arrêté ESPN. La méthodologie qui a été construite pour répondre à cette exigence tel que repris dans le référentiel ESPN du projet FA3 est une méthode basée sur une approche purement soudage. Les experts soudeurs ont défini des typologies et tailles de défauts qui caractériseraient une dérive de l'opération de soudage et non au sens de la conception. Le document définit les parades pour se prémunir de la création de ce type de défaut puis défini à l'étape 3 de la méthode les défauts dit inacceptables, car caractéristique d'une dérive de l'opération de soudage. A l'étape 4, il est vérifié que les CND mis en œuvre et répondant aux exigences du RCCM, permettent de détecter ces défauts dit inacceptables.

2. Pour les défauts plan, le RCCM indique qu'ils sont inacceptables. Il est important de noter que le RCCM est un tout cohérent qui impose des contraintes en approvisionnement, fabrication et conception. Il est sous-entendu dans cette affirmation que les défauts plan détectables par les moyens de contrôle mis en œuvre selon les requis RCCM sont inacceptables. Des défauts de plus petites tailles, que les moyens de contrôles mis en œuvre selon les requis RCCM ne permettent pas de détecter, peuvent exister dans la soudure, dont des défauts plans. L'analyse rupture brutale faite

selon le RCCM permet de montrer que ces défauts de « petite taille » ne sont pas nocifs avec des marges importantes, les tailles de ces défauts étant très inférieures au défaut conventionnel. L'absence de mention de taille limite de défaut plan acceptable dans le RCCM est un aspect du RCCM qui est de nature à démotiver tout exploitant à affiner la sensibilité des CND.

3. Enfin pour la justification de la haute qualité des soudures VVP, il doit être défini la taille des défauts que les procédés de contrôle mis en œuvre permettent de détecter avec un haut niveau de confiance (objet de l'action suite au projet de recommandation n°11).

Les approches techniques de ces trois référentiels ne sont pas comparables en tout point, il est donc utile de les distinguer.

Vis-à-vis du point 1 ci-dessus :

Pour les défauts plan, nocifs vis-à-vis du risque de rupture brutale, il est utile de noter que le dossier défauts inacceptables pour les traversées (note Framatome D02-ARV-01-128-589 rév. B – défauts inacceptables Tuyauteries secondaires Carbone – Traversée d'enceinte) s'appuie sur les contrôles radiographiques et les contrôles US onde droite 0D pour détecter une dérive de fabrication. Les contrôles radiographiques permettent de détecter les défauts plan en bord de chanfrein et les contrôles US onde droite 0D, permettent de détecter les défauts plan entre passe typiquement d'orientation privilégiée parallèle à la peau.

Au titre de l'ESPN, hors aspect EDR, il est nécessaire de confirmer que les moyens de contrôles mis en avant à l'étape 4 de la note défauts inacceptables (D02-ARV-01-128-589 rév. B), soit les contrôles radiographiques et les contrôles US 0°, permettent bien de détecter les défauts déclarés inacceptables (voir action ci-après).

Vis-à-vis du point 2 ci-dessus :

Il est utile de noter que les marges en calcul mises en évidence sont très importantes pour les défauts qui sont en limite de performance des moyens de contrôles, ce qui met en évidence la cohérence globale de l'approche du code. Il est également utile de préciser que les lignes VVP ne sont pas soumises à un phénomène de fatigue et que la propagation calculée d'un défaut de 3 mm de hauteur sur 60 ans est de 0,1 mm.

Vis-à-vis du point 3 ci-dessus :

Il est utile de noter qu'EDF a pris des mesures plus contraignantes que celles imposées a minima par le code RCCM (seuil de prise en compte des défauts plans à -12 dB). EDF a aussi proposé une illustration des performances du CND, basée sur l'exploitation des dossiers de qualifications END UT30 et UT36 EPR. Ce sont bien ces contrôles renforcés qui sont crédités pour apporter les garanties de compacité pour le dossier de justification des traversées. La cible de détection pour ces contrôles renforcés, pour les défauts plan, est calée sur la taille des défauts définis dans le dossier défaut inacceptable, soit hauteur 3 mm, longueur 10 mm.

Des actions sur l'illustration des performances de ces procédés sont identifiées pour les actions suites aux projets de recommandation n°11 et 13.

Projet d'Action n°10 :

Vis-à-vis du point 1, au titre de l'ESPN, EDF vérifiera que les défauts détectés par les moyens de contrôles US mis en œuvre lors des re-contrôles et qui n'auraient pas été détectés par les radios ou les contrôles US 0° ne rentrent pas dans la catégorie des défauts inacceptables définies à l'étape 3.

Projet de Recommandation n°11 :

Le rapporteur recommande qu'EDF justifie le haut niveau de confiance qu'il attribue aux contrôles non destructifs volumiques des soudures de traversée, y compris en présence de perturbations potentielles provenant des états de surface. Le rapporteur recommande également qu'EDF démontre que les multiples réparations de ces soudures réalisées en atelier n'ont pas perturbé la mise en œuvre et l'exploitation de ces contrôles.

Projet de Position n°11 :

EDF estime que le haut niveau de confiance apportée aux résultats re-contrôles CND UT n'est pas remis en cause par les conditions réelles de réalisation des soudures. En effet pour :

Les états de surfaces :

- la surveillance lors de la mise en œuvre des UT des critères de suivi de l'insonification (écho de fond, bruit...) permet de s'affranchir des conséquences des perturbations de surfaces externes.
- les modalités d'analyse de la procédure permettent de discriminer les échos de géométrie des éventuels échos de défaut.

Par ailleurs, des affouillements dirigés, sur des indications choisies des soudures site, pourront être réalisés pour compléter le dossier d'illustration des performances UT.

Les réparations :

Le RCC M n'introduit pas de distinction entre les zones soudées réparées ou non. En effet, le métal fondu de l'acier ferritique est réputé homogène, isotrope et aucun effet particulier (atténuation, bruit...) n'a été relevé lors de la mise en œuvre des re-contrôles ce qui confirme la bonne contrôlabilité de ces zones.

La radiographie :

La relecture à 100% des radiogrammes a permis de vérifier les points suivants :

- la densité, la qualité d'image IQI,
- la couverture de zone soumise à examen,
- la présence d'indications notables.

Ces relectures n'ont pas mis en évidence d'élément de nature à remettre en cause le niveau de confiance dans les conditions de mise en œuvre de la radiographie.

Corrélations CND/Défauts :

Le dossier d'illustration de performances sera enrichi, si nécessaire, par quelques affouillements dirigés complémentaires à ceux déjà réalisés, judicieusement choisis, pour compléter l'échantillonnage permettant de couvrir les différentes typologies d'indications.

EDF estime que toutes les conditions sont réunies pour apporter toute la confiance sur les résultats de re-contrôle.

Projet d'Action n°11 :

EDF va compléter le dossier d'illustration des procédés END UT30 et UT36 afin d'y apporter des

éléments permettant de revendiquer que les défauts inacceptables retenus par le fabricant sont couverts. Ces illustrations, s'appuieront sur des simulations numériques CIVA et des essais de performances sur maquettes contenant des défauts. Ces compléments d'illustration permettront de couvrir les géométries des différentes réparations (collage en bord de chanfrein). Ces éléments seront transmis en juillet 2019.

Projet de Recommandation n°12 :

Le rapporteur recommande qu'EDF précise le domaine des températures correspondant aux enjeux de sûreté retenus dans l'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale des soudures de traversées VVP. Le rapporteur recommande également que le plus petit défaut qui puisse être retenu dans l'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale soit établi au regard des écarts constatés en réalisation et, en tout état de cause, soit de dimensions supérieures au défaut dit de « référence » défini dans le rapport préliminaire de sûreté.

Projet de Position n°12 :

Sans objet

Projet d'Action n°12 :

EDF précisera et apportera les éléments de justification du domaine de température présentant un « enjeu pour la sûreté » en cas de rupture des lignes VVP avant fin mai 2019. EDF considère que ce domaine se situe au-delà de 100 °C. En effet, en dessous de 100 °C, les GV's ne sont plus efficaces, ce qui implique que (1) un refroidissement engendré sur le fluide primaire en cas de brèche d'une tuyauterie vapeur sera lent et faible (le contrôle de la réactivité du cœur, le refroidissement du cœur par les trains RIS-RA et le confinement ne sont pas remis en cause) et (2) les effets énergétiques associés aux Ruptures de Tuyauteries à Haute Energie (RTHE) n'ont pas à être considérés.

EDF intégrera dans sa méthodologie que le plus petit défaut qui puisse être retenu dans l'analyse de résistance vis-à-vis du risque de rupture brutale soit de dimensions supérieures au défaut dit de « référence » défini dans le rapport préliminaire de sûreté (5mm x 20mm).

Projet de Recommandation n°13 :

Le rapporteur recommande qu'EDF décrive de manière détaillée les améliorations qu'il envisage pour le programme de suivi en service par rapport aux requis du code RSE-M. Ces améliorations devront justifier le renforcement du niveau de confiance dans l'intégrité de ces soudures, requis par la démarche d'exclusion de rupture. Ce renforcement devra être complété par des mesures compensatoires supplémentaires au regard des nombreux écarts affectant ces soudures. Ce haut niveau de confiance devra être évalué en considérant notamment les objectifs suivants :

- un seuil de notation suffisamment bas garantissant qu'un défaut dont les dimensions se rapprocheraient des dimensions caractéristiques d'un défaut inacceptable, soit détecté avec une marge suffisante ;
- la capacité d'attribuer des dimensions à l'indication détectée avec un niveau de confiance élevée pour des dimensions plus petites que celles considérées comme « inacceptables » par le fabricant ;
- des performances en résolution et reproductibilité permettant de détecter sans ambiguïté une

éventuelle évolution des dimensions de l'indication ;

- la définition des conditions de mise en œuvre des procédures de CND permettant de garantir l'absence de perturbations causées par la présence d'une couche de peinture sur certaines soudures de traversée.

Projet de Position n°13 :

Illustration des performances complétée :

Les actions engagées par EDF au titre de la recommandation n°11 vont permettre de renforcer le niveau de confiance en complétant l'illustration des performances du procédé actuel. Cette démonstration s'appuiera sur la base des dimensions du défaut inacceptable, sur des simulations numériques CIVA et des essais de performances sur maquettes contenant des défauts, sans modifier le seuil de notation, déjà très bas et renforcé par rapport au requis du code. A l'issue de ces actions, EDF tirera les conclusions pour adapter, éventuellement, les modalités du contrôle END définies pour les procédés qualifiés.

Modalité de caractérisation de l'indication

EDF prévoit de déployer le même mode opératoire de caractérisation qui décrit les gestes complémentaires de caractérisation de défaut à l'identique de ceux déjà été réalisés lors de re-contrôles CND. L'analyse sera réalisée par des caractérisateurs N2 CENE et supervisée par un expert. Ce point zéro constituera une référence lors de la VCI. Il permettra de se prononcer sur l'évolution de l'indication lors des visites ultérieures conformément aux règles du code RSEM. Ces règles permettent d'échapper aux incertitudes de mesures et ainsi d'apporter de la robustesse au diagnostic.

L'état de l'art sur les conditions de caractérisation d'indications en UT montre sur tous les dossiers qu'il est très difficile de dimensionner des défauts de hauteur inférieure à 3mm. En effet, le moyen de caractérisation consiste à exploiter le phénomène de diffraction en extrémité de défaut (tête/pieds). La diffraction est difficilement exploitable pour des hauteurs inférieures à 3mm (les échos de tête et de pieds sont confondus). Pour reprendre l'indication concernée par ces considérations, sa morphologie, qui n'a pas un caractère parfaitement plan ainsi que sa proximité à la paroi externe sont des difficultés complémentaires à prendre en considération dans les limites des procédés UT.

Aussi, la configuration la plus adaptée est de réaliser une mesure relative des niveaux de réflectivité entre les deux visites en utilisant les mêmes moyens de caractérisation comme évoqué ci-dessus.

Conditions préalables à la mise en œuvre des UT :

- Une préparation de surface est prévue par la procédure au droit de la zone de balayage des transducteurs afin de s'affranchir d'éventuelles traces d'oxydation.
- Elle sera mise en œuvre pour éliminer le résiduel de peinture, si toutefois cette dernière ne se dégradait pas au cours de l'exploitation.
- Ce broyage mécanique automatisé a été développé et sera réalisé par l'intermédiaire d'une brosse rotative à fils métalliques avec placage par pression d'air.

In fine, un examen visuel télé-opéré pourra être déployé en amont des contrôles UT ultérieurs.

L'ensemble de ces dispositions sera valorisé pour les contrôles UT en service prévus par EDF sur les soudures de traversées : à la première Visite Complète du CPP puis à chaque Visite Partielle et Visite

Décennale.

Projet d'Action n°13 :

Cf action suite au projet de recommandation n°11.

Projet de Recommandation n°14 :

Le rapporteur recommande que, dans une approche de défense en profondeur vis-à-vis du risque de rupture brutale, et dans l'hypothèse où les soudures de traversée seraient maintenues avec les propriétés mécaniques actuelles, EDF procède à l'élimination du défaut détecté dans la soudure de traversée EPP6208TWM-S1.

Projet de Position n°14 :

EDF estime que la demande d'élimination du défaut n'est pas justifiée pour les raisons suivantes :

Confiance sur les CND mis en œuvre en usine :

Les résultats des recontrôles réalisés par EDF au titre de la surveillance sur ces traversées ne sont pas du tout comparables à ceux obtenus sur le reste des soudures du CSP réalisés en UT manuels.

En effet, sur l'ensemble des 20 soudures des traversées et points fixes ARE/VVP, seule une indication de très faible dimension et en limite de seuil est déclarée Non Conforme suite aux contrôles contradictoires par ultrasons automatisés engagés par EDF au titre de la surveillance (soit 75m linéaire de soudures contrôlées dont 38m sur les 8 VVP, rapportés à 8mm de longueur conservative mesurée pour cette indication). Pour rappel, la proportion de non-conformité des soudures contrôlées manuellement sur site est de 1/3 non conformes. Les causes racines relevées sur ces écarts par rapport aux CND initiaux ne sont pas du tout transposables aux CND réalisés en usine sur les soudures de traversées.

EDF a transmis son analyse à l'IRSN et à l'ASN (courrier D309518025570 du 17 août 2018) et a précisé que la reproductibilité des contrôles UT, à elle seule, pouvait expliquer la non prise en compte de cette indication lors des contrôles initiaux.

EDF estime que les résultats obtenus sur ces recontrôles donnent confiance sur la qualité des CND mis en œuvre en usine (donc la compacité de ces soudures). Cet écart constaté par la reproductibilité de la mesure faite entre deux contrôles est expliqué ci-dessous.

Reproductibilité de la mesure à prendre en compte dans un re-contrôle :

S'agissant d'un CND UT censé être réalisé une seule fois, le code RCCM n'intègre pas cette incertitude liée à la reproductibilité de la mesure dans le cadre d'un re-contrôle, contrairement au RSEM. C'est pourquoi, pour que le re-contrôle CND UT réalisé au titre de la surveillance puisse se prononcer sur la qualité des CND initiaux, il doit être tenu compte de l'effet de cette reproductibilité inhérente à toute mesure reconduite dans des conditions industrielles.

Le code RSEM établit ainsi des critères de variation significative d'une indication entre deux mesures pour intégrer les incertitudes liées aux variations acceptables en sensibilité de la chaîne de mesure, avant de se prononcer. Ceci contribue au caractère industriel d'un code en prenant en considération tous les paramètres influents d'une mesure UT et de sa reconduction dans le temps.

Comme pour tout le suivi des indications réalisé depuis la mise en exploitation du parc, compte tenu de la reproductibilité intrinsèque au procédé UT, cette population d'indications en limite de seuils peut

être mise en évidence sur tout re-contrôle voire passer sous les seuils, y compris au titre de la VCI.

L'ensemble des informations issues des autres sens de contrôles ne met pas en évidence de niveau d'amplitude suffisant pour déclencher le seuil d'évaluation ($H_m/H_0 \geq \text{CAD} -6 \text{ dB}$. au titre de la procédure appliquée par le fabricant : 128001-0505 ind. N).

Le fait que cette indication n'ait pas été détectée lors des contrôles UT initiaux réalisés par le fabricant en usine s'explique comme suit :

- dans la mesure où l'écart de réflectivité entre le niveau d'amplitude relevé lors des contrôles contradictoires par l'OT45 côté Flasque et le seuil de notation appliqué lors des contrôles initiaux du fabricant est compris dans la reproductibilité des procédés de contrôle UT ($\pm 3 \text{ dB}$ au sens du RSE-M A 5224-1), l'absence de notation lors des contrôles initiaux du fabricant n'est pas de nature à remettre en cause la validité de ces contrôles ;
- les faibles dimensions du défaut physique à l'origine de l'indication (de manière conservative²⁹, le défaut est considéré comme étant compris dans un rectangle de 8mm par 2,5mm) sont vraisemblablement à l'origine du positionnement « en limite de seuil » de l'indication UT, et ainsi de la différence de diagnostic entre les contrôles initiaux du fabricant et les contrôles contradictoires engagés par EDF ;
- le trajet acoustique important conduisant à détecter l'indication au-dessus du seuil avec double rebond du faisceau sur la paroi interne puis la paroi externe (fig. 45 du projet de rapport p 143) peut conduire à une reproductibilité en limite des bornes des incertitudes du RSEM de $\pm 3 \text{ dB}$.

Analyse de l'indication au regard des dimensions des défauts inacceptables :

Le guide ASN N°19 précise les modalités attendues de l'exigence relative aux CND. Le fabricant a identifié les défauts inacceptables et EDF doit justifier (cf projet de recommandation n°10) que les procédés de contrôle non destructifs, notamment ultrasonores, mis en œuvre ont la capacité de détecter et d'identifier les indications possédant les caractéristiques définies par le fabricant pour les défauts inacceptables.

L'indication 9 relevée assimilée à un manque de fusion par conservatisme et dans la logique du guide ASN N°19, le CND mis en œuvre a permis de détecter un défaut proportionnellement de très petite dimension au regard du défaut inacceptable : 8mm de longueur, versus ci-dessous :

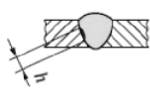
Manque de fusion	Collage		<p>5 manques de fusion de dimension égale à une hauteur de passe, de plus de 10 mm de long sur la circonférence de la soudure. Longueur cumulée de plus de ¼ de la circonférence, avec une hauteur égale à une hauteur de passe. (Nota : les défauts plans de type collage non débouchant et parallèles aux peaux sont acceptables).</p>
------------------	---------	---	--

Tableau 14 : Définition des défauts inacceptables

De plus, cette indication fait l'objet d'un calcul de nocivité révélant des marges très importantes.

²⁹ En effet, cette valeur est issue de la réflectivité mesurée qui correspond à celle d'un trou à fond plat de diamètre 2mm. Cette réflectivité est ensuite multipliée par quatre, afin d'intégrer les conditions les plus pénalisantes (paramètres influents) pour définir une surface qui servira à estimer sa hauteur à partir du ratio (long/hauteur). En considérant la longueur minimale mesurée de 5mm sa **hauteur englobante** retenue est **estimée à 2,5mm**. Sa **longueur** retenue est la mesure la plus pénalisante parmi trois acquisitions donnant des valeurs de 6 ; 6 ; et 8mm. (référence D309518019486 révision C).

Mesures compensatoires :

Les mesures compensatoires retenues par EDF dans le cadre du suivi en service de cette indication sont de nature à donner une totale confiance sur l'absence d'évolution en exploitation. Il est également utile de préciser que les lignes VVP ne sont pas soumises à un phénomène de fatigue et que la propagation calculée d'un défaut de 3 mm de hauteur sur 60 ans est de 0,1 mm.

Risques associés à une réparation :

Les risques associés à une telle réparation sont similaires à ceux évoqués dans les positions suite aux projets de recommandations n°2 et 3. Ainsi, il serait nécessaire de réaliser les analyses de faisabilité et de dérisquage (via notamment l'entraînement sur maquettes) avant de pouvoir engager une telle opération.

Projet d'Action n°14 :

Sans objet

Projet de Recommandation n°15 :

Le rapporteur recommande qu'EDF décrive de manière détaillée les contrôles non destructifs qui seront réalisés sur les soudures pour lesquelles une réparation ou une remise à niveau est envisagée et justifie qu'ils sont de nature à garantir la qualité requise au titre de la démarche d'exclusion de rupture. Pour ce faire, le rapporteur recommande que les mesures dites « compensatoires » de nature organisationnelles et techniques, qui avaient été définies en 2018 à l'occasion des contrôles de fin de fabrication, soient reprises et adaptées pour ces contrôles après réparation ou remise à niveau.

Concernant spécifiquement les contrôles par radiographie, le rapporteur recommande qu'EDF renforce les dispositions permettant de garantir que la mise en œuvre et l'interprétation des radiogrammes apporte le niveau de confiance requis vis-à-vis de la compacité de ces soudures réparées ou remises à niveau.

Projet de Position n°15 :

Les mesures compensatoires de nature organisationnelles et techniques qui ont été définies en 2018 à l'occasion des contrôles de fin de fabrication de la task-Force re-contrôles CND UT du CSP sont intégrées dans le référentiel technique et organisationnel applicable.

UT manuels

Le retour d'expérience de 2018 en lien avec votre demande formulée dans le courrier ASN CODEP-DEP-2018-039023 du 24 juillet 2018, nous amène à reconduire cette organisation pour les opérations de CND UT mises en œuvre après des opérations de réparation ou de remises à niveau des soudures et renforcer nos dispositions pour être en adéquation avec le cadre réglementaire par :

- La réalisation de l'AIP CND UT par le contrôleur GMES (sous-traitant du fabricant FRA) et un contrôleur EDF, tous deux certifiés Cofrend 2. Chaque contrôleur aura été sensibilisé à la bonne mise en œuvre de la procédure. In situ, dans la phase de détection, les deux contrôleurs visualisent en permanence le signal pour s'assurer de l'absence d'indication. Chaque contrôleur pourra à tout moment reprendre le contrôle pour attester de la bonne application de la procédure et confirmer la présence ou l'absence d'une indication, sa prise en compte ou non suivant les critères de la procédure et revérifier les caractéristiques d'une

indication. A l'issue de ce contrôle, dans la phase de rapportage, les contrôleurs constituent le PV et dans le cadre de cette analyse, ils peuvent être amenés à effectuer des reprises d'acquisition, notamment sur des situations en limite de seuil de notation pour statuer sur le résultat à consigner dans le PV.

Le traducteur est tenu par l'opérateur du GMES et son binôme participe à l'intégralité du contrôle et vérifie à la fois le geste manuel d'acquisition (pour s'assurer de la bonne couverture de la zone de contrôle) ainsi que le signal d'acquisition ultrasonore. L'action du contrôleur du GMES étant réalisée sous la responsabilité du fabricant, l'implication du contrôleur d'EDF est ainsi réalisée au titre de la surveillance et des contrôles contradictoires demandés par l'ASN en juillet 2018.

Au titre de la réglementation ESPN (évaluation de la conformité selon le module G), le GMES porte et valide le PV comme sous-traitant du fabricant. FRAMATOME, fabricant réglementaire, réalise la surveillance de son sous-traitant GMES.

EDF valide ce PV pour attester de la conformité des résultats en tant qu'exploitant.

- Le contrôle technique est assuré par des Niveau 3 Cofrend GMES/FRA qui n'ont pas participé au contrôle, conformément à l'arrêté INB. Le niveau 3 EDF atteste de la conformité des résultats en tant qu'exploitant pour s'assurer de leur robustesse.
- Au titre de l'arrêté INB, les inspections par EDF et FRAMATOME feront l'objet d'un programme pour s'assurer de la conformité des dispositions prises (technique, organisationnelles, ...).

Avec cette évolution, le rôle réglementaire du Fabricant est assuré par :

- le contrôle technique assuré avec le GMES par des niveaux 3 Cofrend,
- la surveillance pour s'assurer de la conformité des dispositions prises (technique, organisationnelles, ...) de son sous-traitant et de l'organisation mise en place.

Le rôle réglementaire de l'Exploitant est assuré par :

- la surveillance pour s'assurer de la conformité des dispositions prises (technique, organisationnelles, ...) et de l'organisation mise en place,
- l'implication du contrôleur d'EDF est ainsi réalisée au titre de la surveillance et des contrôles contradictoires demandés par l'ASN en juillet 2018.

Radiographie

La mise en œuvre des contrôles CND par radiographie des soudures Q1 N1 du CSP est devenue une AIP a proprement dit depuis juillet 2018 avec évolution et précision en conséquence de la liste des AIP dans le référentiel applicable. La surveillance d'EDF a pour objectif visé de prioriser de façon hebdomadaire la surveillance de ces mises en œuvre sur ce scope. Celle-ci n'a pas mis en évidence de difficulté opératoire dans la bonne déclinaison de l'AIP.

Les relectures par les RT2 et/ou RT3 d'EDF et de FRAMATOME sont engagées suivant l'application des dispositions déclinées dans la procédure radiographique du GMES Nordon Ponticelli référencée 128001- 501 (pour les soudures de niveau 1). Les relectures par EDF et FRAMATOME sont réalisées sur l'ensemble des radiogrammes constitutifs de la soudure et sont engagées sans information des autres CND préalablement déroulés et ce afin de garantir l'intégrité du diagnostic RT par application des critères de la procédure allouée.

Ces relectures n'ont pas conduit à invalider les interprétations initiales du GMES Nordon Ponticelli (pas d'émission de Fiches de Constats d'Ecart (FCE) ou de Fiches d'Observation (FO)).

Dans le cadre spécifique des caractérisations ultrasonores des soudures présentant des indications non conformes en Task Force recontrôles CND du CSP (cadre en dehors du CND RT initial), EDF, pour étayer les avis techniques dédiés, a systématiquement engagé une corrélation, par interprétations à dire d'experts des radiogrammes, ciblées dans la zone d'intérêt de l'indication UT non conforme. Ces interprétations réalisées par un Niv 3 COFREND ont permis de pouvoir corréler, pour certaines, la présence ainsi que la nature de l'indication et ce par une expertise très fine des radiogrammes en dehors des critères nominaux applicables du référentiel technique.

Projet d'Action n°15 :

EDF rassemblera dans un courrier en juin 2019 l'ensemble des dispositions prévues pour la mise en œuvre des contrôles non destructifs pour les réparations et remises à niveau des soudures après les Essais A Chaud.

Projet de Recommandation n°16 :

Le rapporteur recommande qu'EDF justifie que ces réparations locales n'altèrent pas les propriétés des matériaux et respectent ainsi les exigences du référentiel d'exclusion de rupture définies lors de la SPN de 2005 complétées par les spécifications du fabricant.

EDF devra justifier que la maquette réalisée pour le matériau d'apport EMK35Cr est représentative des soudures ayant fait l'objet de réparations locales vis-à-vis de son objectif (la quantification du VSD de l'EMK35Cr lorsqu'il est déposé dans les passes de remplissage).

Projet de Position n°16 :

EDF rappelle que :

- Le remplissage des soudures en TIG orbital est issu d'une combinaison des QMOS R181AC (pour la partie TIG manuel EMK35Cr) et R180AC (pour la partie TIG Orbital DMO-IG). La conformité du métal déposé EMK35Cr repose d'une part sur la QMOS R181AC qui a fait l'objet de tests mécaniques, d'autre part sur les recettes des lots de métal d'apport.
- Lorsque l'EMK35Cr est utilisé en réparation, cela est effectué selon la QMOS R181AC, en combinaison avec la QMOS R180AC. Il s'agit donc d'une configuration de combinaison de QMOS similaire à celle employée par le remplissage. Cette mise en œuvre est autorisée par le RCCM et l'EN ISO 15614-1.
- Pour un acier ferritique, le procédé de soudage ne modifie pas la contrôlabilité.
- Le comportement de l'EMK35Cr est vérifié au travers de la QMOS R181AC (remplissage du coupon de qualification sur une hauteur de 12 mm) et également confirmé par les essais dans les zones de racine des coupons témoins.

La maquette qui sera remplie uniquement en EMK35Cr (TIG Manuel suivant les paramètres du DMOS de réparation) est destinée à évaluer la quantification du VSD de ce consommable seul qu'il soit utilisé en peau ou en racine. Elle nécessite donc la réalisation de maquette avec une hauteur suffisante pour prélever des éprouvettes uniquement dans ce métal déposé. Par ailleurs la réalisation sur cette

maquette d'essais de traction en métal déposé et de résilience en peau permettront de renforcer la connaissance des propriétés mécaniques de ce métal déposé.

L'approche proposée par EDF est donc suffisante pour garantir que les propriétés mécaniques ne seront pas altérées.

Par ailleurs, dans la mesure où la maquette vise à caractériser le produit d'apport et qu'elle sera réalisée selon le DMOS de réparation utilisé pour les soudures de production, la représentativité de cette maquette par rapport aux soudures de production est assurée.

Projet d'Action n°16 :

Sur la base des éléments présentés ci-dessus, EDF confirmera que les réparations locales en EMK35Cr n'altèrent pas les propriétés mécaniques des matériaux en valorisant les résultats des essais mécaniques réalisés sur la maquette EMK35Cr établie pour la quantification du VSD en septembre 2019.

Projet de Recommandation n°17 :

Le rapporteur recommande qu'EDF identifie, en préalable du programme d'essai, les causes liées aux inversions de Rm mises en évidence sur les produits d'apports EMK35Cr et DMOI-G. EDF vérifiera que le phénomène de vieillissement sous déformation est bien à l'origine de cette inversion.

Projet de Position n°17 :

EDF rappelle que :

- Pour l'EMK35Cr, aucune inversion de Rm n'a été constatée sur les coupons témoins puisque que les épaisseurs déposées ne permettent pas le prélèvement de traction longitudinale. C'est pour cette raison qu'EDF prévoit la réalisation de la maquette DN500 épaisseur 38mm entièrement remplie en EMK35Cr destinée à la quantification du VSD.
- Pour le DMO-IG, et d'une manière générale pour les autres procédés, deux phénomènes ont été investigués pour expliquer l'inversion de Rm :
 - Le vieillissement sous déformation ;
 - Une mauvaise exécution des tests de traction à l'ambiante et à 300°C. Pour vérifier cette hypothèse, des essais contradictoires ont été réalisés (par le CT Erlangen) sur le CT 15-0054 (coupon présentant une inversion de Rm significative). Les résultats obtenus étant cohérents avec ceux constatés par le GMES, cette hypothèse a été écartée.
- Ainsi seul le VSD est jugé vraisemblable pour expliquer l'inversion des Rm.
- L'absence d'inversion des valeurs de Rm n'est cependant pas considérée comme une absence de sensibilité au VSD. Ainsi la quantification du VSD est réalisée indépendamment de la constatation ou non d'une inversion de Rm.

Ainsi, EDF considère que ce projet de recommandation ne peut pas être un préalable à la réalisation du programme d'essais de quantification du VSD dans la mesure où la quantification du VSD est réalisée sur les métaux d'apport indépendamment du constat d'inversion des Rm.

Projet d'Action n°17 :

Sans objet

Projet de Recommandation n°18 :

Le rapporteur recommande que le programme de caractérisation du vieillissement sous déformation pour le produit d'apport DMOI-G soit réalisé sur des maquettes de dimensions identiques aux soudures des lignes VVP. A défaut EDF devra justifier que la maquette retenue permet bien d'obtenir un vieillissement sous déformation, si celui-ci est en effet avéré, enveloppe de celui affectant les soudures de la ligne VVP.

Projet de Position n°18 :

EDF rappelle que la méthode d'écroissage à 5% proposée est enveloppe des déformations permanentes pouvant être rencontrées par le matériau en service. Cet écroissage crée des dislocations en plus de celles déjà créées lors des opérations de soudage (plus particulièrement en racine).

Or l'azote libre capable de migrer vers les dislocations est lui en quantité finie. Dès lors, la méthode de quantification du VSD proposée garantit que l'azote libre disponible peut migrer vers des sites de dislocation aisément accessibles, selon une cinétique très rapide (qui dépend de la densité de dislocation).

Ainsi, cette méthode garantit d'atteindre et de converger vers un état de vieillissement très sévère au regard de ce que pourraient connaître les soudures en service, que ce soit en peau ou en racine.

L'effet que peut avoir un changement de diamètre et d'épaisseur entre les soudures est essentiellement sur le bridage lors de la réalisation des premières passes. Il va ensuite s'estomper lors du remplissage. Il peut donc y avoir un effet potentiellement différent d'écroissage sur la racine. Pour autant, l'application d'un écroissage de 5% aura pour effet de générer une abondance de dislocations pour fixer l'azote libre, et donc d'aboutir à un vieillissement maximal. La seule différence pouvant subsister sera liée à l'effet de l'écroissage lui-même, qui n'est pas lié au VSD.

Ainsi l'épaisseur de la maquette est du second ordre pour la quantification du VSD.

Les éléments de bibliographie montrent par ailleurs que les tests réalisés dans le passé étaient le plus souvent sur du métal déposé à plat sur tôles, sans faire de distinction entre racine et peau des soudures, et avec des épaisseurs diverses.

EDF considère donc que la maquette proposée en DN500 épaisseur 32 mm est suffisante pour quantifier le Vieillissement Sous Déformation du métal d'apport DMOIG de manière représentative par rapport aux soudures de production.

Projet d'Action n°18 :

Sans objet

Projet de Recommandation n°19 :

Le rapporteur recommande que l'exploitant apporte la garantie que les procédés de contrôle non destructifs, notamment volumiques, mis en œuvre lors des contrôles de fin de fabrication ont la capacité de détecter et d'identifier, avec un haut niveau de confiance, les indications possédant les

caractéristiques considérées par le fabricant comme inacceptables au regard de la maîtrise de ses procédés de fabrication. En l'absence il devra se conformer aux dispositions du paragraphe S7610 du code RCC-M.

Projet de Position n°19 :

La capacité des procédés de contrôle CND à détecter, avec un haut niveau de confiance les indications correspondants au défaut inacceptable, est traitée, entre autre, par les compléments d'illustrations de performances des contrôles CND UT qui sont proposés en réponse aux projets de recommandations n°11 et n°13. L'organisation de la mise en œuvre des contrôles CND UT telle que décrite en réponse à la recommandation n°15 avec, notamment, une surveillance à 100 % du résultat par les contrôleurs EDF, sécurise le respect des performances lors du diagnostic final.

Projet d'Action n°19 :

Sans objet

Projet de Recommandation n°20 :

Le rapporteur recommande que l'exploitant justifie, pour chacune des soudures impactée par un écart de désalignement, l'absence d'impact de ces dénivellations et des éventuelles autres imperfections géométriques sur les performances des contrôles volumiques ainsi que l'absence d'impact d'une amplification potentielle des coefficients de contrainte sur la prévention des dommages vis-à-vis de la déformation progressive.

Projet de Position n°20 :

Dans le cadre de l'instruction pour l'autorisation de reprise du soudage pour la soudure FW7 train 4, EDF avait apporté les éléments ci-dessous suite à l'écart de désalignement :

- *Dommages vis-à-vis de la déformation progressive :*

La définition des indices de contraintes est présentée dans le §B3683 du RCC-M. Pour les soudures arasées répondant aux conditions du B3683.1 c), ainsi que dans le cas où l'épaisseur t est supérieure à 6 mm, le défaut d'alignement maximal admissible δ peut être égal à 0 dans le calcul des indices de contraintes C . Dans le cas d'une transition d'épaisseur de pente supérieure à 1/3, seuls les indices de contraintes d'adaptation plastique et de déformation progressive de pression et de moments ($C1$ et $C2$) seront impactés par un désalignement.

De façon conservatrice (épaisseur soudure > 6mm), pour la soudure FW7 du train 4, des indices de contrainte majorants ont été calculés impactant les ratios de l'équation 10.

- *Performances des contrôles volumiques (porté par l'avis technique D309518034904) :*

En paroi externe, l'arasage permet d'adoucir le raccordement au droit du désaccostage en obtenant une pente de 7°maximum. Par ailleurs, les dispositions prévues dans la révision U de la procédure de parachèvement 128001- 0612 garantissent désormais la compatibilité du profil externe avec la contrôlabilité par UT (introduction d'un examen UT « à blanc » avec critère sur la conformité du couplage acoustique pour valider l'état de parachèvement externe).

Concernant la paroi interne, le désaccostage interne ainsi que l'absence d'arasage du cordon de pénétration sont de nature à potentiellement générer des échos dit « de géométrie », qui sont susceptibles d'excéder le seuil de notation. Ces échos constituent un risque de sur-notation (pas

de dégradation des capacités de détection de l'examen¹), dans la mesure où un écho de géométrie, ne correspondant pas à un défaut technologique de soudage, pourrait être attribué à tort à un défaut et être classé non conforme.

Un recul suffisant est ainsi nécessaire de part et d'autre de la soudure pour pouvoir engager les gestes de discrimination permettant de différencier ces singularités de véritables défauts technologiques de soudage.

Pour la soudure VVP FW7 du train 4, le recul disponible par rapport au bord de métal fondu est supérieur à deux fois l'épaisseur, ce qui est suffisant (avec une marge confortable) pour la réalisation des gestes de discrimination.

Ainsi, les éventuels écarts de désalignement qui seraient précisés dans les matrices de conformité des soudures seront traités de manière similaire.

Projet d'Action n°20 :

Sans objet.

Projet de Recommandation n°21 :

Le rapporteur recommande qu'EDF définisse, en préalable des affouillements, des critères concernant l'acceptation des zones de dilution, en termes d'étendue et de pénétration permettant de considérer l'influence de ces résidus sur les propriétés de la soudure négligeable. L'exploitant devra s'assurer que la partie de la soudure comprenant les zones de dilution en électrodes enrobées et les passes de racine et de soutien réalisées en TIG manuel ne remet pas en cause la résistance à la rupture brutale des soudures remises à niveau.

Projet de Position n°21 :

EDF a prévu de définir des critères opérationnels qui permettront de garantir l'élimination autant que possible des résidus. EDF vise à conserver une passe de racine/soutien de 5 mm au maximum, qui est en EMK35Cr ou EML5. Les soudures seront re-remplies en Tenacito-R ou DMOIG qui ont des caractéristiques mécaniques satisfaisants les exigences pour l'Exclusion De Rupture, et ne présente donc pas de risque de rupture fragile.

Dans le cas particulier des soudures ayant des passes de racine et de soutien en EMK35Cr, qui présente de bonnes propriétés mécaniques, seuls quelques résidus d'électrode enrobée sont susceptibles d'être présent, à l'interface avec les passes de remplissage. Ces zones situées dans l'épaisseur à 5 mm seront de dimensions très limitées et seront entourées de matériau présentant les propriétés conformes au référentiel technique applicable, ce qui garantit l'absence de risque vis-à-vis de la rupture brutale.

Dans le cas particulier des soudures ayant des passes de racine et de soutien en EML5, qui vérifie les requis du RCC-M niveau 1, la courbe de ténacité définie pour les soudures vérifiant ces requis est applicable. Pour les analyses de nocivité de défauts des lignes VVP en racine, il a été vérifié que le défaut conventionnel de 10 mm de profondeur est systématiquement justifié à la fois dans le domaine fragile et ductile. Aussi, un défaut hypothétique qui serait situé dans la matière non éliminée serait limité au plus à une profondeur maximale de 5 mm. Il serait donc couvert avec marge par cette démonstration.

De manière indépendante à l'argument précédent, dans le cas hypothétique d'un défaut de 5 mm ou

moins qui n'aurait pas été détecté et qui aurait amorcé, il faut noter que la matière de remplissage (que ce soit de l'Electrode Enrobée TENACITO R ou du fil TIG DMOI-G) présente des propriétés ductiles sur l'ensemble du domaine de fonctionnement et que cette caractéristique conduira à stopper la propagation. Ceci est vrai pour une propagation :

- dans le domaine fragile : d'une part le caractère ductile du nouveau matériau de remplissage assurant l'absence de risque de rupture par clivage et une meilleure ténacité que celle de l'EML5, et d'autre part la forte épaisseur du matériau de remplissage garantissent l'arrêt de la fissure. Cette situation est différente de celle où l'arrêt de fissure se produirait dans la matière fragile. Dans ce cas l'arrêt de la fissure serait plus complexe à garantir car il serait lié à l'épuisement de la dynamique et de la sollicitation de la fissure.
- ou dans le domaine ductile : de manière évidente puisque la propagation est stable et contrôlée par la sollicitation 'instantanée' du défaut et la ténacité de la matière située devant le défaut.

Ainsi, les éléments développés ci-dessus permettant de justifier que les résidus d'une soudure remise à niveau comprenant les zones de dilution en électrodes enrobées et les passes de racine et de soutien réalisées en TIG manuel ne remettent pas en cause leur résistance à la rupture brutale.

Projet d'Action n°21 :

EDF définira des critères opérationnels pour l'élimination et l'acceptation des résidus en ce qui concerne les zones de dilution, en termes d'étendue et de pénétration à échéance d'août 2019.

Projet de Recommandation n °22 :

Le rapporteur considère que l'exploitant doit pouvoir justifier dans son dossier de qualification de l'électrode enrobée Tenacito-R que le procédé de soudage permet d'atteindre les exigences mécaniques requises par le référentiel d'exclusion de rupture issu de la SPN de 2005, complété par les spécifications de l'exploitant et du fabricant, dans les conditions d'utilisation prévues sur le chantier de l'EPR de Flamanville et, pour la robustesse de la démarche, sans avoir à valoriser les recommandations opératoires.

Projet de Position n°22 :

Afin de qualifier le procédé de soudage TENACITO-R, EDF a engagé la démarche suivante :

- Définition du référentiel technique applicable intégrant notamment les exigences du Fabricant pour l'Exclusion De Rupture ;
- Analyse du REX d'utilisation de l'Electrode Enrobée TENACITO-R ;
- Définition des précautions opératoires (épaisseurs de passe, diamètre d'électrode, énergie de soudage,...) sur la base du REX ;
- Réalisation d'assemblages conventionnels pour la qualification conformément au RCC-M ;
- Réalisation de QMOS selon les règles du RCC-M ;
- Réalisation d'essais de robustesse en faisant varier les paramètres identifiés dans les précautions opératoires pour s'assurer de l'absence d'effet falaise sur les caractéristiques mécaniques si l'on s'éloigne des paramètres définis pour la mise en œuvre.

Ainsi, EDF considère que la démarche de qualification du procédé TENACITO-R intègre déjà des essais au titre de la robustesse et que chercher à respecter les critères applicables en s'affranchissant de toutes précautions opératoires n'aurait pas de sens vis-à-vis des bonnes pratiques du soudage.

Projet d'Action n°22 :

Sans objet

Projet de Recommandation n°23 :

Le rapporteur recommande qu'EDF conforte les essais réalisés par une comparaison avec la méthode « classique » afin d'évaluer l'absence d'impact des modes de prélèvements.

Projet de Position n°23 :

L'analyse de la bibliographie réalisée par EDF montre que différentes méthodes ont été mises en œuvre et qu'elles ne mettent pas en évidence un « effet de la méthode » sur les résultats. La méthode proposée par EDF a fait l'objet d'une mise au point, montrant que l'écroissage sur bloc est homogène (Cf. rapport WOOD cité en réf. [50] dans le projet de rapport).

Projet d'Action n°23 :

EDF effectuera une comparaison des résultats obtenus entre la méthode d'écroissage proposée par EDF et celle considérée comme « classique » dans le projet de rapport. Cela consistera à réaliser, sur une même matière, d'une part un écroissage sur des ébauches de dimensions proches des dimensions d'une éprouvette de résilience, d'autre part un écroissage sur bloc, afin de montrer une équivalence des méthodes. Une note décrivant le programme d'essais envisagé sera transmise avant le 31 mai 2019.

ANNEXE 2 : complément aux projets de positions n°2-3

Analyse des risques du scénario de remise à niveau des soudures de traversées VVP (scénario 3)

Légende

	Risque majeur	Nécessite un entraînement des opérateurs au préalable
	Risque important avec moyen de mitigation identifié	REX existant sur l'opération
	Risque résiduel	

Phase	Identification des contraintes associées et risques majeurs potentiels	Parades	Risque résiduel
préparation chantier	introduction des équipements	étude détaillée d'introduction et stockage des équipements. Les lieux de stockage intermédiaires sont à définir en lien avec la séquence des opérations et les capacités des plateformes et des outils de manutention	accessibilité de tous les équipements dans l'EE
	installation des points de manutention dans l'espace EE	étude détaillée pour déterminer les points ancrages possibles et moyens de manutention	faisabilité de toutes les manutentions et capacité à exclure tous les risques de chute
	préparation et protection environnement chantier	étude détaillée vise à définir: (1) les équipements environnants (chemin de câbles, dépose plateformes permanentes...) à déposer et lieux de stockage, (2) la mise en place de dispositions spécifiques de maintien en propreté et évacuation des déchets, (3) la mise en place des systèmes supports (fluide, électrique) pour la réalisation des opérations (4) la mise en place de dispositions de protection des équipements contre les chocs	faisabilité de démontage des chemins de câbles
	installation de plateformes de travail et d'accès	étude détaillée pour déterminer les zones d'accès à réglementer et sécuriser et les zones de travail à sécuriser	garantir le travail en toute sécurité pour les hommes et matériels environnants
	schéma d'ensemble du bridage des tuyauteries	étude détaillée	accessibilité des points de bridage et réalisation
	travail en espace exigu	étude détaillée pour déterminer les dispositions HSE spécifiques : ventilation, extraction des fumées et refroidissement, protection collective...	prévention des risques chantier classiques (incendie, anoxie, exposition aux polluants et poussières...)
démolition de la réservation GC	protection du compensateur et des équipements environnants contre les projections des débris issus de l'opération de découpe GC	étude de faisabilité pour démontrer l'innocuité du procédé v/v de la protection du compensateur définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation des intervenants	endommagement du compensateur
	maintien en propreté de l'EE et	étude détaillée pour déterminer les	

Phase	Identification des contraintes associées et risques majeurs potentiels	Parades	Risque résiduel
	évacuation des débris issus de l'opération de découpe GC	dispositions spécifiques à mettre en œuvre (SAS, ...)	
	garantir l'absence d'endommagement des fers de l'EE	cartographie préliminaire du ferrailage	endommagement de fers
	risque HSE spécifique à la mise en œuvre du procédé de découpe du GC : hydrocution, projection, nuisance sonore	définition de moyens de prévention collectifs et individuels	
découpe du compensateur	recherche et/ou développement d'une technique de coupe du compensateur	étude de faisabilité	faisabilité d'une technique de découpe "non agressive" pour le compensateur et l'environnement
	protection du compensateur lors l'opération de découpe de la soudure	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur (en inox) sensibilisation du personnel intervenant à proximité définition de marquage spécifique	endommagement du compensateur
	maintien en position du compensateur lors de l'opération de découpe	étude détaillée visant à définir l'outillage de manutention et de maintien du compensateur utilisation du REX de l'opération de montage initial du compensateur	
retrait plaque de fermeture et ailette	protection du compensateur lors l'opération de découpe de la soudure	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation du personnel intervenant à proximité définition de marquage spécifique utilisation du REX de l'opération de montage initial du compensateur	
mise en retrait du pare-jet	endommagement de la tuyauterie VVP	étude et définition d'un outillage spécifique de guidage et de maintien utilisation du REX de l'opération d'introduction initial du pare jet	
	endommagement du liner lors de l'opération de découpe des taquets	étude et définition d'un outillage spécifique utilisation du REX de l'opération d'introduction initial du pare jet	risque d'endommagement sur le liner
déplacement du compensateur	protection du compensateur lors l'opération de déplacement	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation du personnel intervenant à proximité	
	développement d'un outil de guidage / maintien du compensateur	étude détaillée	
retrait guard pipe	développement d'un outillage de retrait et de maintien en position du guard pipe (4 T) pour éviter son ripage lors de la découpe de la soudure	étude détaillée	endommagement des clarinettes et fluid pipe
	agression du fluid pipe pendant découpe	Protection adaptée	
découpe lignes connectées clarinette	protection clarinette, fluid pipe et vannes	définition de dispositions spécifiques de protection	
bridage/supportage	risque de mise en contraintes des éléments traversées	étude détaillée pour ajouter bridage/supportage des 2 côtés du flasque, modélisation par calcul des contraintes	désaccostage résiduel non maîtrisé, non-respect géométrie traversée

Phase	Identification des contraintes associées et risques majeurs potentiels	Parades	Risque résiduel
	protection des éléments de traversées (fluid pipe, compensateur, manchette, flasque ...)	étude détaillée pour ajouter bridage/supportage des 2 côtés du flasque, modélisation par calcul des contraintes	
	manutention et contraintes environnementales pour opérationnels ultérieures	étude détaillée pour confirmer que la cinématique des opérations est réalisable avec le bridage mis en œuvre	
affouillement et remise à niveau soudure W1 (BAS)	problème d'accessibilité pour réaliser l'affouillement au vu de l'exiguïté	étude détaillée des outillages d'affouillement	
	maîtrise de l'affouillement (attaque de la passe racine)	dispositions à mettre en œuvre pour garantir le positionnement précis de la soudure mesures et empreintes à réaliser au cours de l'affouillement, exploitation du REX soudures CSP	sous-épaisseur, désalignement, effondrement de la soudure
	réalisation des soudures avec un haut niveau de qualité	Entraînement soudeurs et maquette à l'échelle 1	
	Difficultés réalisation CND et introduction robot par MSIV. Risque introduction corps migrant	étude détaillée	endommagement fluid pipe
	Difficultés de mise en œuvre d'un mode de soudage en automatique ou en manuel. Risque sur la qualité de la soudure.	Etude détaillée sur le choix du mode opératoire de soudage le plus adapté pour garantir l'obtention de la qualité visée. Réalisation maquette. Décision du choix de soudage confirmée après.	multiple réparations de la soudure
Remise en place du guard pipe	développement d'un outillage de retrait et de maintien en position du guard pipe pour éviter son ripage lors de la découpe de la soudure	étude détaillée	endommagement des clarinettes et fluid pipe
	Difficultés chanfreinage flasque et guard pipe possiblement pendant la découpe. Difficultés d'installation machines.	Développement machines	endommagement du fluid pipe et du compensateur
	protection du compensateur lors des opérations de chanfreinage/soudage et TTD	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation du personnel intervenant à proximité	
	difficultés réalisation TTD	étude outillage	performance TTD non suffisante du fait de l'épaisseur
	difficultés réalisation CND	étude détaillée	
déplacement compensateur	protection du compensateur lors l'opération de déplacement	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation du personnel intervenant à proximité	
	développement d'un outil de guidage / maintien du compensateur	étude détaillée	
découpe manchette pour accéder à soudure W2 (BR)	protection du compensateur lors l'opération de découpe	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation du personnel intervenant à proximité	
	maintien du beurrage inconel sur la soudure manchette / fourreau	étude détaillée pour définir les dispositions à mettre en œuvre lors de la coupe de la soudure pour conserver suffisamment du beurrage inconel côté GC	si perte du beurrage inconel, réalisation d'un TT ayant un impact sur le béton
réalisation du beurrage inconel sur le flasque	protection du compensateur et du fluid pipe lors l'opération de découpe	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur et fluid	endommagement du compensateur et du fluid pipe

Phase	Identification des contraintes associées et risques majeurs potentiels	Parades	Risque résiduel
		pipe sensibilisation du personnel intervenant à proximité étude visant à confirmer la nécessité de réaliser le beurrage inconel du flasque	
	faisabilité de réaliser l'opération de beurrage sur le flasque	étude détaillée de faisabilité de réaliser le beurrage réalisation d'une maquette à l'échelle 1	impossibilité de faire le TT sur la soudure flasque/manchette => remise en cause de la remise à niveau W2
affouillement et remise à niveau soudure W2 (BR)	problème d'accessibilité pour réaliser l'affouillement au vu de l'exiguïté	étude détaillée des outillages d'affouillement	
	maîtrise de l'affouillement (attaque de la passe racine)	dispositions à mettre en œuvre pour garantir le positionnement précis de la soudure mesures et empreintes à réaliser au cours de l'affouillement, exploitation du REX soudures CSP	sous-épaisseur, désalignement, effondrement de la soudure
	réalisation des soudures avec un haut niveau de qualité	Entraînement soudeurs et maquette à l'échelle 1	
	Difficultés réalisation CND	étude détaillée utilisation du REX de l'opération initiale	contrôlabilité à 100%
	Difficultés de mise en œuvre d'un mode de soudage en automatique ou manuel. Risque sur la qualité de la soudure.	Etude détaillée sur le choix du mode opératoire de soudage le plus adapté pour garantir l'obtention de la qualité visée. Réalisation maquette. Décision du choix de soudage confirmée après.	multiple réparations de la soudure
repose manchette demi-coquille	protection du compensateur et du fluid pipe lors l'opération de repose de la manchette	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur et fluid pipe sensibilisation du personnel intervenant à proximité	endommagement du compensateur et du fluid pipe
	développement d'un outil de guidage / maintien des 2 demi-coquilles lors des opérations de accostage / soudage	étude détaillée pour définir les dispositions de mises en œuvre, en particulier lors du soudage des demi-coquilles (e.g. orientation des demi-coquilles...)	
	déformation des demi-coquilles	réalisation de maquette lors de l'approvisionnement pour garantir que les demi-coquilles ne se déforment pas lors des opérations de fabrication, transport et soudage dans l'œuvre	sous-épaisseur
	faisabilité de réaliser les CND sur les soudures longitudinales et les soudures bout à bout	étude détaillée	contrôlabilité à 100%
	capacité industrielle à approvisionner les manchettes demi-coquilles	prospection pour sécuriser l'approvisionnement	
remise en place du compensateur (y.c. ailettes)	protection du compensateur lors de l'opération de soudage (soudure compensateur / manchette GC et soudure ailettes)	réalisation d'une maquette à l'échelle 1 définition d'une protection adaptée du compensateur sensibilisation du personnel intervenant à proximité exploitation du REX : opération déjà réalisée	endommagement du compensateur
	Difficultés de mise en œuvre du soudage	étude détaillée pour définir les dispositions spécifiques de mises en œuvre (mise en place des machine) utilisation du REX de l'opération initiale de mise en place du compensateur réalisation d'une maquette à	

Phase	Identification des contraintes associées et risques majeurs potentiels	Parades	Risque résiduel
		l'échelle 1	
	faisabilité CND	étude détaillée utilisation du REX de l'opération initiale de mise en place du compensateur	
remise en place du pare jet	Non identifié à date	utilisation du REX de l'opération initiale de mise en place du pare-jet	
réfection GC	protection du compensateur lors de l'opération de réfection GC	utilisation du REX de l'opération initiale de mise en place du béton 2nde phase	endommagement du compensateur