

Date : 07/12/16

Emetteur :

NOTE TECHNIQUE

Note de synthèse - Justification de la tenue en service des fonds primaires des GV/RA 237 et GV/RA 239 de Dampierre 3

Réf : D5140/NT/16.172

Indice : 2

29 pages

annexe(s)

Documents associés :

Résumé : Les fonds primaires des GV/RA 237 et GV/RA 239 installés sur Dampierre 3 sont des pièces forgées issues de lingots conventionnels de 90 tonnes de fabrication JCFC. A ce titre, leur zone centrale est susceptible de présenter une zone de ségrégation majeure positive résiduelle en carbone. L'analyse proposée dans ce document évalue l'impact d'un abaissement local des propriétés de ténacité du matériau, lié à la présence de la ségrégation, vis-à-vis du risque de rupture brutale. Les résultats obtenus ne remettent pas en cause l'exigence définie d'intégrité, en toutes situations et donc l'aptitude au service de ces composants.

Domaine(s) métier(s) : /

		Accessibilité	
Concerné le manuel qualité :	Oui <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/>	Libre <input type="checkbox"/>	Restreinte <input type="checkbox"/>
Document de référence :	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Interne (EDF SA) <input checked="" type="checkbox"/>	Confidentielle <input type="checkbox"/>
Niveau de Qualité	AIP <input checked="" type="checkbox"/> QS <input type="checkbox"/>		

Note de synthèse [1].docx - 07/12/2016 17:35:22 - 1310044

E.D.F. C.N.P.E. Dampierre	Note de synthèse Justification de la tenue en service des fonds primaires des GV/RA 237 et GV/RA 239 de Dampierre 3				Indice	Page	
					2	2 / 29	
					Réf. :	D5140/NT/16.172	
Durée de conservation		Réexaminable			Périodicité de réexamen		
100 ans		Oui :	Non :	x			
Indice	REDACTION		CONTROLE		EXAMEN	DATE	B.P.A.
	NOM	VISA	NOM	VISA			
2							
Documentations : de référence - satellites - de travail							
LIEU DE CONSERVATION			Nb	LIEU DE CONSERVATION			Nb
Diffusion interne au CNPE (électronique)							
DESTINATAIRE			Nb	DESTINATAIRE			Nb
Diffusion externe							
DESTINATAIRE hors EDF DPI (papier)			Nb	DESTINATAIRE EDF DPI (électronique)			Nb

Sommaire

1 - OBJET	5
2 - DEMARCHE DE JUSTIFICATION	5
2.1 - CONNAISSANCE DE LA ZONE SEGREGEE ET RESULTATS DES MESURES DE TAUX DE CARBONE REALISEES EN 2016 SUR LES GV 2 ET GV 3 DE DAMPIERRE 3.	5
2.1.1 - Contrôles par spectrométrie	5
2.1.2 - Mesure de taux de carbone par prélèvement de copeaux	7
2.1.3 - Conclusion sur l'état de connaissance de la ségrégation carbone des GV/RA 237 et GV/RA 239 de Dampierre 3.....	8
2.2 - PROPRIETES DE TENACITE ET CONNAISSANCE DE LA ZONE SEGREGEE.....	9
2.3 - DEFAUTS POSTULES.....	10
2.3.1 - CND de fabrication.....	10
2.3.2 - Examen complémentaire par ressuage réalisé en 2016	12
2.3.3 - Examens complémentaires en UT réalisé en 2016.....	13
2.3.4 - Défaut postulés dans les analyses mécaniques.....	14
2.4 - SITUATIONS CONSIDEREES.....	17
2.5 - METHODE D'ANALYSE.....	17
3 - RESULTATS.....	18
3.1 - TRANSITOIRES DE CHOCS CHAUDS	18
3.1.1 - Situation d'épreuve hydraulique primaire au taux de 1,2.....	19
3.1.2 - Situations de catégories 2, 3 et 4 et situations hors DDS.....	21
3.2 - TRANSITOIRES DE CHOCS FROIDS	23
4 - PROGRAMME SUR PIECES SACRIFICIELLES	25
5 - CONCLUSION	26
6 - REFERENCES	28

1 - OBJET

Les fonds primaires des GV/RA 237 (GV2) et GV/RA 239 (GV3) installés sur la tranche 3 de Dampierre sont des pièces forgées écrasées issues de lingots conventionnels 90t de fabrication JCFC¹. A ce titre, ils sont susceptibles de présenter une zone de ségrégation majeure positive résiduelle

L'objectif de ce document est de justifier la tenue en service des fonds primaires des GV/RA 237 et GV/RA 239 en évaluant l'impact d'un abaissement local des propriétés de ténacité du matériau lié à la présence de ségrégation en carbone, vis-à-vis du risque de rupture brutale.

2 - DEMARCHE DE JUSTIFICATION

L'analyse de nocivité des défauts postulés dans les fonds primaires des GV/RA 237 et GV/RA 239 est présentée dans les documents [3] et [4].

Ces documents évaluent, dans le domaine fragile et de la transition, l'impact d'un abaissement local potentiel des propriétés de ténacité. Il s'agit plus précisément d'étudier la stabilité d'un défaut postulé dans la pièce en considérant une RT_{NDT} de fin de vie pour laquelle les effets du vieillissement et de la ségrégation sont pris en compte.

2.1 - CONNAISSANCE DE LA ZONE SEGREGEE ET RESULTATS DES MESURES DE TAUX DE CARBONE REALISEES EN 2016 SUR LES GV 2 ET GV 3 DE DAMPIERRE 3.

2.1.1 - Contrôles par spectrométrie

Les fond primaires de fabrication JCFC issus d'un lingot de 90t présentent une zone décarburée en surface externe, ainsi, seules les zones usinées au voisinage des tubulures peuvent faire l'objet de mesures de taux de carbone par spectrométrie d'émission optique à source étincelle avec une préparation de surface standard. La zone centrale du bol a également fait l'objet de mesures par spectrométrie d'émission optique

Le maillage retenu et les résultats obtenus sont détaillés sur les représentations graphiques simplifiées suivantes :

et rappelés

¹Le GV/RA 238, 3^{ème} GV installé sur Dampierre 3, est équipé d'un fond primaire de fabrication Creusot Forge mais issu d'un lingot à solidification dirigée (et non d'un lingot conventionnel). A ce titre, il n'est pas concerné par le risque de présence d'une zone de ségrégation carbone majeure positive résiduelle.

Figure 1 : Représentation simplifiée des mesures spectro du GV/RA 237 (GV2) de DAM3

L'ensemble des résultats du GV/RA 237 (GV2) permet de conclure que la zone de ségrégation atteint les tubulures et présente des valeurs moyennes de l'ordre de 0,20% et une valeur maximale de 0,25% au niveau de la zone de transition de la tubulure B et de la tubulure H.

Par ailleurs, les résultats confirment la présence d'une ségrégation majeure positive au centre du fond primaire du GV/RA 237 avec une valeur maximale de 0,34%. Ce point a fait l'objet d'un prélèvement de copeaux pour analyse du taux de carbone par combustion dont les résultats sont reportés au § 2.1.2.

Figure 2 : Représentation simplifiée des mesures spectro du GV/RA 239 (GV3) de DAM3

L'ensemble des résultats du GV/RA 239 (GV3) permet de conclure que la zone de ségrégation atteint les tubulures et présente des valeurs moyennes de l'ordre de 0,20% et une valeur maximale de 0,30% au niveau de la zone de transition de la tubulure B (valeur maximum pour la tubulure H de 0,23%).

Par ailleurs, les résultats confirment la présence d'une ségrégation majeure positive au centre du fond primaire du GV/RA 239 avec une valeur maximale de 0,30% en deux points. Ces deux points ont fait l'objet d'un prélèvement de copeaux pour analyse du taux de carbone par combustion dont les résultats sont reportés au § 2.1.2.

2.1.2 - Mesure de taux de carbone par prélèvement de copeaux

Les mesures de teneur en carbone classiquement mises en œuvre par spectrométrie d'émission optique à source étincelle en surface externe des fonds en exploitation ne permettant pas de s'affranchir entièrement de la zone décarburée au centre, elles ont été complétées par des analyses chimiques réalisées par prélèvements de copeaux. Les points de prélèvement ont été positionnés au droit de la teneur en carbone la plus élevée relevée par spectrométrie (cf. figures 1 et 2).

Les prélèvements de copeaux ont été réalisés à une profondeur comprise entre 2 et 4 mm compte tenu des préparations de surfaces successives (préparation de surface pour les mesures par spectrométrie et préparation de surface pour les prélèvements de copeaux).

Le document [8] démontre que la profondeur de prélèvement permet de s'affranchir de la zone décarburée.

Après analyse du carbone par combustion, les valeurs obtenues sont décrites dans le tableau suivant :

Les valeurs de carbone mesurées par analyse à combustion sont cohérentes avec les mesures par spectrométrie d'émission optique

Les valeurs maximales obtenues sont :

- 0,33% pour le GV/RA 237, mesuré au point E3.
- 0,26% pour le GV/RA 239, mesuré au point E1.

2.1.3 - Conclusion sur l'état de connaissance de la ségrégation carbone des GV/RA 237 et GV/RA 239 de Dampierre 3

Les contrôles par spectrométrie réalisés sur les bols des GV/RA 237 et GV/RA 239 ont permis de réaliser une cartographie des zones présentant une ségrégation carbone positive résiduelle.

Les points de ces cartographies présentant les valeurs de carbone les plus élevées ont fait l'objet de prélèvement de copeaux sous la couche décarburée. Ces copeaux ont fait l'objet d'une analyse du taux de carbone par combustion.

Les valeurs mesurées sont cohérentes avec les mesures par spectrométrie optique et permettent de conclure que la valeur maximale de carbone à retenir est 0,33% en zone centrale du bol et 0,25% en tubulures pour le GV/RA 237 (GV2) et 0,26% en zone centrale du bol et 0,30% en tubulures pour le GV/RA 239 (GV3).

2.2 - PROPRIETES DE TENACITE ET CONNAISSANCE DE LA ZONE SEGREGEE

La ténacité K_{IC} du matériau est définie selon le paragraphe ZG 6110 du code RCC-M :

Où :

- T est la température du matériau et à l'extrémité du défaut où l'analyse est effectuée
- RT_{NDT} est la température de transition de référence du matériau

La valeur de RT_{NDT} en fin de vie retenue prend en compte les effets du vieillissement et de la ségrégation et est déterminée suivant la formule :

$$RT_{NDT} = RT_{NDT}^{initiale} + \Delta RT_{NDT}^v + \Delta RT_{NDT}^{seg}$$

Avec :

- $RT_{NDT}^{initiale} = RT_{NDT}$ de recette du fond primaire hors effet de ségrégation majeure positive en carbone.

Les calculs [3] sont ainsi effectués pour une RT_{NDT} initiale de °C correspondant à la valeur maximale admissible selon le RCC-M.

Les calculs [3] et [4] sont également effectués pour une RT_{NDT} de °C correspondant à la valeur de recette maximale des deux GV considérés de DAM3 (GV/RA 237 : °C et GV/RA 239 : °C).

- ΔRT_{NDT}^v = décalage de RT_{NDT} tenant compte des effets de vieillissement

Le décalage retenu est égal à °C selon le chapitre ZG 6120 du code RCC-M.

- ΔRT_{NDT}^{seg} = décalage RT_{NDT} tenant compte d'un effet de ségrégation majeure positive en carbone.

Le décalage retenu est égal à °C en accord avec l'exploitation des essais de résilience réalisés sur le fond sacrificiel référencé GV/RP 381, caractérisé lors de la qualification technique ESPN puis dans le cadre d'un programme de R&D interne Areva . En complément, une sensibilité à un décalage forfaitaire ΔRT_{NDT}^{seg} égal à 70°C est également présentée.

Une sensibilité à un décalage complémentaire de °C a été également étudiée sur le fond du bol en paroi externe pour tenir compte des valeurs ponctuelles plus importantes en termes de teneur de carbone.

Une sensibilité à un décalage complémentaire de °C et °C a été également étudiée sur le fond du bol en paroi externe

Par ailleurs des mesures réalisées sur la peau interne des fonds 90t disponibles aux Renardières et à St-Marcel ont donné des valeurs de 0,18%. Il n'est donc pas attendu de ségrégation en peau interne pour ces fonds, y compris en tenant compte de la valeur de carbone à la coulée (de 0,19% pour les fonds de Dampierre 3 contre 0,18% pour les autres fonds et 0,17% pour Saint-Marcel). Au titre de la défense en

profondeur, une analyse est réalisée en considérant un décalage de ΔRT_{NDT}^{seg} égal à $^{\circ}C$, une sensibilité est également présentée pour un décalage forfaitaire de ΔRT_{NDT}^{seg} de $^{\circ}C$.

2.3 - DEFAUTS POSTULES

Les défauts potentiels générés par le procédé de fabrication des fonds primaires ont été identifiés.

Les défauts inacceptables retenus (Creusot Forge ou JCFC) sont :

- Les inclusions exogènes
- Les replis-criques
- Les défauts dus à l'hydrogène (DDH)
- Les défauts de surface en arrondis de tubulure liés à l'extrusion.

Cette analyse a été formalisée dans le cadre des premières fabrications de GV de rechange ESPN. Au vu des similarités de gammes de fabrication, elle peut être élargie aux fonds primaires JCFC obtenus à partir d'un lingot conventionnel.

Seule l'hypothèse d'élimination des défauts par l'usinage des surfaces n'est pas transposable aux surfaces externes des bols des fonds JCFC. Le contrôle complémentaire par ressuage réalisé en exploitation permet de se prémunir de la présence de tels défauts.

L'analyse réalisée, complétée par une relecture des procès-verbaux disponibles dans les Rapports de Fin de Fabrication (RFF) montre qu'aucun défaut inacceptable n'a été détecté lors des CND mis en œuvre en fin de fabrication.

2.3.1 - CND de fabrication

Ces contrôles correspondent à :

- **Des contrôles volumiques par ultrasons** réalisés conformément au MC2300 après usinage final ou à un stade aussi avancé que possible pour les parties non contrôlables au stade final.
Les zones inspectées correspondent à 100% du volume de la pièce, y compris les tubulures. L'exploration est effectuée au demi-bond à partir de la surface interne en :

Des travaux d'illustrations de performances visant à établir les capacités des CND UT vis à vis des défauts postulés pour les analyses mécaniques sont rappelés
Les résultats sont détaillés ci après :

En zone centrale et en zone courante des tubulures :

Des essais sur maquettes représentatives ont montré que le contrôle permet :

- La mise en évidence de défauts débouchants en paroi externe, d'orientation radiale ou circonférentielle et de dimensions x mm,
- La mise en évidence de défauts non débouchants d'orientation radiale ou circonférentielle et de dimensions x mm présentant un ligament par rapport à la paroi externe inférieur ou égal à x mm

Par ailleurs, des travaux de simulation illustrent la capacité du contrôle de fabrication à mettre en évidence des défauts d'orientation circonférentielle ou longitudinale, de dimensions x mm et présentant un ligament de x mm par rapport à la paroi externe,

Zone de transition des tubulures :

Des travaux de simulation démontrent la capacité du contrôle de fabrication à mettre en évidence des défauts circonférentiels, pouvant être localisés en toute position dans le volume de la zone contrôlée et de dimensions x mm,

Le CND est en capacité de détecter un défaut d'orientation circonférentielle, de dimension x mm, débouchant perpendiculairement en paroi externe ou présentant un faible ligament par rapport à la paroi externe.

En conclusion, les CND UT mis en œuvre lors de la fabrication ont des performances suffisantes pour détecter les défauts postulés dans les analyses mécaniques.

- **Un contrôle par ressuage** réalisé au stade final sur l'ensemble des surfaces à revêtir en paroi interne du bol. Le seuil de prise en compte et les critères de rejet des indications de surface requis par la spécification M2143 sont les suivants :

- **Un contrôle par magnétoscopie** réalisé au stade final. Les zones inspectées correspondent aux surfaces internes et externes de la tubulure et jusqu'à 250 mm mini du congé de raccordement sur les surfaces internes et externe du bol. Le seuil de prise en compte et les critères de rejet des indications de surface requis par la spécification M2143 sont les suivants :

2.3.2 - Examen complémentaire par ressuage réalisé en 2016

Pour les zones non couvertes par la magnétoscopie en peau externe, un examen complémentaire par ressuage a été mis en œuvre en 2016. La zone examinée est définie pour compléter le contrôle surfacique réalisé par magnétoscopie en fabrication sur les tubulures tout en assurant une zone de recouvrement significative entre les deux zones

Elle comprend :

- Une zone centrée sur le fond de GV de diamètre 1300 mm.
- Une prolongation de cette zone en direction des deux trous d'homme primaire (jusqu'au raccordement entre fond primaire et THP, à l'exclusion de la soudure).
- Les seuils retenus sont toute indication linéaire de longueur supérieure ou égale à mm pour le seuil de notation et à mm pour le seuil de caractérisation.

Aucune indication n'a été notée lors de ce contrôle complémentaire sur les fonds primaires des GV/RA 237 et GV/RA 239 de Dampierre 3

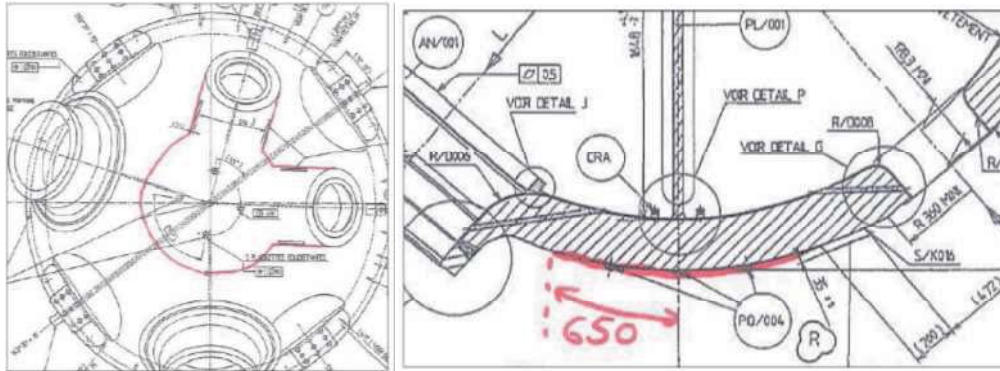


Figure 3 : Zone de ressuage effectué en 2016

2.3.3 - Examens complémentaires en UT réalisé en 2016

Le procédé de fabrication des fonds concernés ne conduit pas à suspecter la présence de défaut, y compris dans la zone de transition des tubulures. Les résultats des CND mis en œuvre en fabrication confirment cette conclusion.

Néanmoins, des contrôles volumiques complémentaires ont été mis en œuvre en exploitation :

- Par ultrasons sur la zone centrale du fond primaire (zone d'examen de rayon 650 mm) de la paroi externe jusqu'à la mi-épaisseur

Le procédé utilisé permet de détecter dans la zone d'examen et jusqu'à mm de profondeur tout défaut plan non débouchant de hauteur ($h=2 \times a$) de mm et de longueur de mm de forme elliptique et d'orientation radiale.

Pour les fonds GV/RA 237 et RA/239 de Dampierre 3, l'examen par ultrasons permet de conclure à l'absence de défaut plan tel que défini précédemment dans la zone couverte par le procédé (jusqu'à mm de profondeur) ; l'extension d'analyse pour la plage d'épaisseur mm à mi-épaisseur (mm) n'a mis en évidence aucun signal caractéristique du défaut recherché.

- Par ultrasons sur la zone de transition des tubulures sur un secteur angulaire s'étendant entre 0 et 180 par rapport à l'axe de chaque tubulure

Le procédé utilisé permet de détecter tout défaut plan de x mm perpendiculaire à la face de sondage (externe) et d'orientation longitudinale (dans l'axe de la tubulure) et présentant un ligament inférieur à mm par rapport à la paroi externe (cf réf 19). La détection d'un défaut de x mm est donc également acquise.

Pour les fonds GV/RA 237 et GV/RA 239 de Dampierre 3, l'examen par ultrasons permet de conclure à l'absence de défaut plan tel que défini précédemment dans le volume examiné.

Les performances des Contrôles Non Destructifs réalisés en fabrication et des Examens Non Destructifs réalisés en exploitation dans ces différentes zones, montrent que la détection des défauts postulés dans les analyses mécaniques (cf § 2.3.4) est assurée

2.3.4 - Défaut postulés dans les analyses mécaniques

L'analyse des gammes de fabrication, et particulièrement des taux de corroyage élevés ne conduit pas à suspecter la présence de défauts dans le volume de la pièce.

Pour la surface externe, cette conclusion est confirmée par l'analyse des CND de fabrication et vérifiée en zone centrale et en zone de transition des tubulures par des END complémentaires mis en œuvre en exploitation.

Pour la peau interne, cette conclusion est confirmée par l'analyse des CND de fabrication. Concernant le cas hypothétique des Défauts Sous Revêtement (DSR), il peut être noté que, d'une part, les précautions de fabrication vis-à-vis de la fissuration à froid ont été prises en fabrication, et que, d'autre part, dans la partie centrale des fonds, le revêtement a été déposé à l'électrode enrobée, ce qui conduit à des Zones Affectées Thermiquement (ZAT) de faible profondeur (inférieure à mm). Au delà de cette zone centrale d'un diamètre de mm, le fond est revêtu par un procédé automatique qui engendre une taille de ZAT inférieure à mm.

Dans le cas particulier des tubulures, les taux de corroyage élevés permettent de la même façon d'exclure la présence de défaut dans le volume. Par ailleurs, l'opération d'extrusion des tubulures ne conduit pas à générer des défauts en volume mais peut générer des défauts en surface interne et externe du type replis de matière en peau externe ou ouverture de défauts surfaciques en peau interne. Ce risque est couvert par le contrôle par magnétoscopie dont les résultats confirment l'absence de défauts surfaciques

Selon la méthode des fonctions d'influence décrite au chapitre II.2 de l'annexe 5.4 du RSE-M et utilisée dans les analyses mécaniques, le facteur d'intensité de contrainte en mode I, noté K_I , est défini comme suit (il en est de même pour les autres modes d'ouverture) :

Le facteur d'intensité de contrainte est donc fonction de coefficients d'influence (coefficients i_x), de la distribution de contrainte dans la zone du défaut postulé (coefficients σ_x) et d'un paramètre dimensionnel noté a et associé à la hauteur du défaut postulé.

Dans le cas d'un défaut semi-elliptique débouchant en peau interne et en peau externe, le paramètre dimensionnel a est directement égal à la hauteur du défaut comme précisé aux chapitres VII.2.2.1.1 et VII.2.2.2.1 de l'annexe 5.4 du RSE-M dont les figures sont reprises ci-dessous.

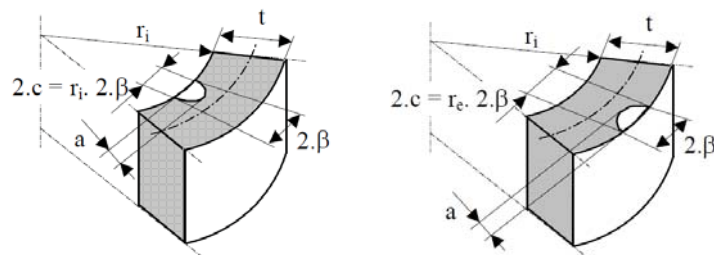


Figure 4 : Géométrie des défauts débouchants postulés

Dans le cas d'un défaut elliptique non débouchant, le paramètre dimensionnel a est égal à la demi hauteur du défaut comme précisé au chapitre VII.5.1.2 de l'annexe 5.4 du RSE-M dont une figure est reprise ci-dessous (la hauteur totale du défaut étant égale à $2a$).

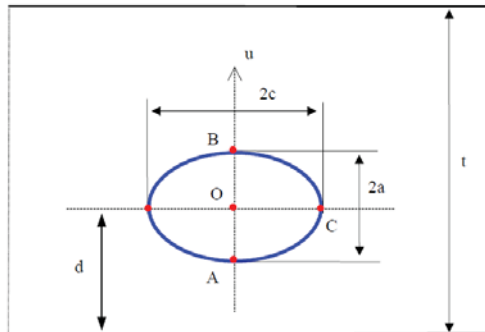


Figure 5 : Géométrie des défauts non débouchants postulés

Les défauts postulés dans les analyses mécaniques sont les suivants selon les zones d'études :

- En peau externe (sensible aux chocs chauds)

Dans l'ensemble des zones hors zone de transition, les défauts postulés dans les analyses mécaniques sont des défauts débouchants en peau externe et de forme semi-elliptique en accord avec l'annexe ZG du code RCC-M. Des défauts de dimensions (hauteur) x (longueur) mm sont analysés, des défauts de mm (hauteur) x mm (longueur) sont également étudiés au titre de la sensibilité.

Les défauts postulés en zone de transition sont des défauts débouchants en peau externe et de forme semi-elliptique de dimensions mm (hauteur) x mm (longueur). En effet, le contrôle UT des zones de transition des tubulures des fonds GV/RA 237 et RA/239 décrit au § 2.3.3 réalisé sur l'arrêt de 2016 ainsi que l'analyse des capacités de détection des CND permet de démontrer l'absence d'un défaut non débouchant de dimensions supérieures à mm x mm avec un faible ligament par rapport à la paroi externe

Dans le cas d'un défaut non débouchant suffisamment éloigné de la peau de la structure, l'hypothèse de plasticité confinée est vérifiée et les coefficients d'influence sont tels que le facteur d'intensité de contrainte d'un défaut débouchant de dimensions mm (hauteur) x mm (longueur) couvre celui obtenu pour un défaut non débouchant de dimensions mm x mm.

De plus, un choc thermique chaud en peau interne génère des contraintes de traction maximales en peau externe et qui diminuent en s'éloignant vers l'intérieur de la structure.

Les critères étant vérifiés pour un défaut débouchant en peau externe de dimensions mm x mm, la stabilité d'un défaut non débouchant de dimensions mm x mm est donc assurée.

- En peau interne (sensible aux chocs froids)

Dans l'ensemble des zones, les défauts postulés dans les analyses mécaniques sont des défauts débouchants en peau interne à l'interface entre le revêtement et le fond primaire et de forme semi-elliptique en accord avec l'annexe ZG du code RCC-M. Des défauts de mm (hauteur) x mm (longueur) sont étudiés. Ces défauts couvrent les éventuels défauts

sous revêtement compte tenu de la faible profondeur de la ZAT liée au procédé de soudage.

Ces défauts postulés sont placés selon différents axes par rapport au centre géométrique du fond primaire, sur une distance au centre suffisante pour couvrir l'étendue de la zone ségréguée et suivant deux orientations (cf [3] et [4]).

- Zone 1 : Entre 0 et 300 mm du centre du fond,
- Zone 2 : Entre 300 et 700 mm du centre du fond (cette plage permet de couvrir le raccordement entre le fond primaire sphérique et la tubulure),
- Zone 3 : Pour une distance supérieure à 700 mm du centre du fond, à l'exclusion des zones dites de transitions définies ci après,
- Zone 4 : Dans les zones de transition des tubulures et trous d'homme primaires (uniquement pour les chocs chauds).

La zone de transition des tubulures est définie comme la zone entre la partie mince de la tubulure (zone en direction de la tuyauterie raccordée et dont les dimensions sont similaires à celles de la tuyauterie) et la partie plus épaisse dont l'extrémité se raccorde au fond sphérique (cf. figure 6). La zone de transition des tubulures est directement soumise aux chargements extérieurs provenant de la boucle primaire.

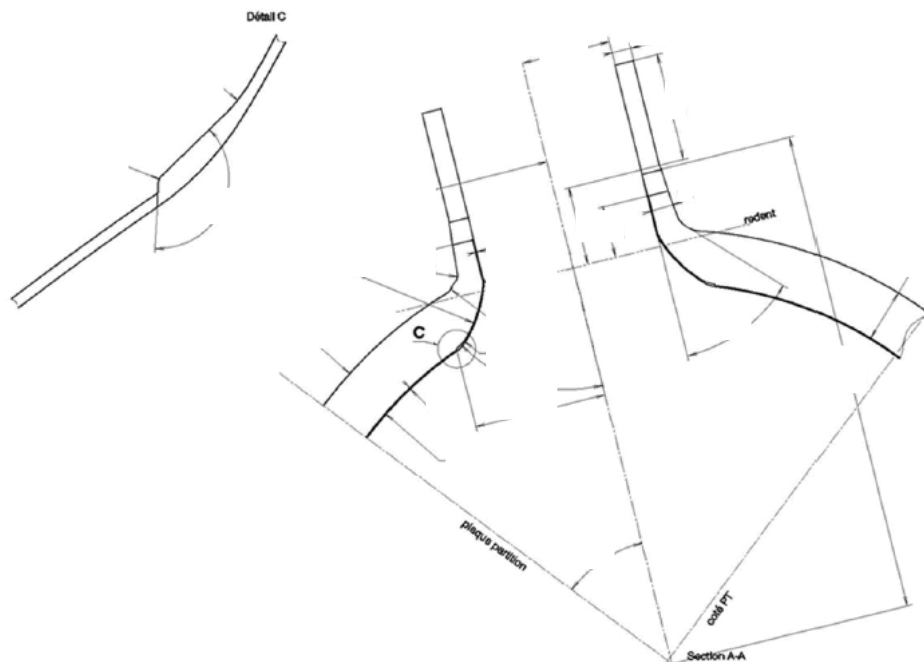


Figure 6 : Zone de transition des tubulures

La zone de transition des trous d'homme est définie comme la zone entre la face plane usinée du trou d'homme et le fond sphérique.

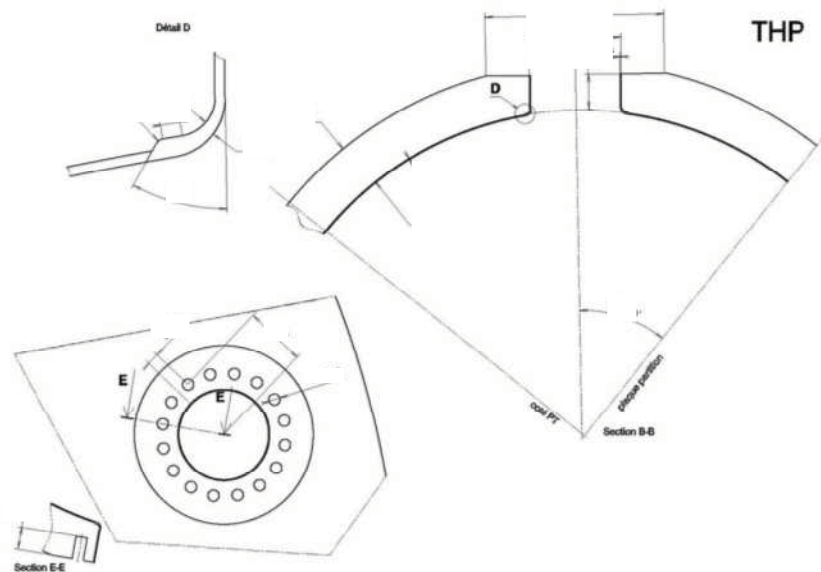


Figure 7 : Zone de transition des trous d'homme primaire

2.4 - SITUATIONS CONSIDEREES

Les situations considérées sont celles décrites dans le dossier des situations (DDS) mais également les situations additionnelles au DDS consécutives à la recherche de chocs thermiques chauds et chocs thermiques froids au niveau du fond primaire (cf. [3] et [4]).

Les situations générant des chocs thermiques chauds introduisent des gradients thermiques dans l'épaisseur qui génèrent des contraintes d'ouverture en cas de défauts postulés en peau externe (selon les hypothèses du paragraphe précédant). Les situations considérées sont prises en compte dans l'analyse mécanique [3].

L'occurrence d'un choc thermique froid en peau interne de structure génère une contrainte de traction (fonction de l'amplitude du choc) au voisinage de la peau interne mais cette contrainte s'atténue très rapidement dans l'épaisseur. Les situations considérées sont prises en compte dans l'analyse mécanique [4].

2.5 - METHODE D'ANALYSE

Les contraintes d'origine mécaniques et thermiques sont calculées par les simulations effectuées sur des modèles 3D aux éléments finis. Ces contraintes permettent ensuite de déterminer le facteur d'intensité de contrainte corrigé plastiquement, noté K_{cp} , et évalué pour chaque extrémité (fond ou paroi) du défaut postulé.

Le calcul de K_{cp} , s'appuie sur la méthode codifiée des fonctions d'influence ainsi que sur la méthode codifiée K_{cp} (afin d'évaluer l'effet de plasticité) en accord avec le chapitre ZG 5100 du code RCC-M et l'annexe 5.4 du code RSE-M.

Pour une situation donnée et pour chaque défaut postulé ; un facteur de marge noté F_m est défini comme suit :

$$F_m = \frac{K_{IC}}{\alpha \cdot K_{cp}} \quad (1)$$

Avec :

- K_{cp} = facteur d'intensité de contrainte corrigé plastiquement à l'extrémité (fond ou paroi) du défaut postulé
- K_{IC} = ténacité caractérisant la résistance du matériau à la rupture fragile (K_{IC} dépend de RT_{NDT})
- α = coefficient de sécurité

Selon l'annexe ZG du code RCC-M, le coefficient de sécurité α est défini comme suit :

La stabilité vis-à-vis du risque de rupture fragile d'un défaut postulé dans une zone ségréguée est démontrée dès lors que le facteur de marge (défini par la relation (1)) est supérieur ou égal à 1.

Le comportement mécanique des défauts postulés, vis-à-vis du risque de rupture brutale, est analysé pour :

- **Les transitoires de chocs chauds** pour des défauts situés en peau externe, au niveau du fond du bol GV hors zones de transitions (pour des décalages enveloppes de RT_{NDT} de °C, °C, °C, °C et °C), et au niveau des zones de transitions pour des décalages de RT_{NDT} de °C et °C).
- **Les transitoires de chocs froids** pour des défauts situés en peau interne au niveau du fond du bol GV et des zones de transitions des tubulures (pour des décalages de RT_{NDT} de °C et °C).

3 - RESULTATS

3.1 - TRANSITOIRES DE CHOCS CHAUDS

L'analyse du risque de rupture fragile des fonds de type RA pour des **décalages de °C et °C de RT_{NDT} sous transitoires de chocs chauds** est réalisée dans la note en référence [3]. Ce document évalue l'impact d'un abaissement local des propriétés de ténacité du matériau dans le domaine fragile, lié à la présence de la zone ségréguée en carbone.

Pour les différentes situations analysées, les RT_{NDT} initiales considérées sont :

- La RT_{NDT} maximale spécifiée de °C issue du code RCC-M
- La RT_{NDT} maximale de recette de °C (correspondant à la plus pénalisante parmi les 2 GV de DAM 3 considérés)

Quatre zones sont distinguées pour l'étude (cf. §2.3.4) :

- Entre 0 et 300 mm de l'axe du fond de GV
- Entre 300 et 700 mm de l'axe du fond de GV (incluant les pieds de tubulures)
- Supérieures à 700 mm de l'axe du fond de GV hors zones de transitions
- Les zones de transition des tubulures et des trous d'hommes primaires.

Les résultats en termes de facteurs de marge sont présentés ci-dessous :

- pour un défaut postulé débouchant en peau externe sur l'ensemble des zones hors zones de transition de dimensions mm (hauteur) x mm (longueur) et au titre de la sensibilité de dimensions mm (hauteur) x mm (longueur) [3].
- pour un défaut postulé débouchant en peau externe dans les zones de transition de dimensions mm (hauteur) x mm (longueur) et au titre de la sensibilité de dimension mm (hauteur) x mm (longueur) et de mm (hauteur) x mm (longueur) [3].

Les marges en situations de fonctionnement de catégories 2, 3 et 4 sont distinguées des situations d'épreuve hydraulique primaire sur site (taux d'épreuve égal à 1,2) car ces dernières ne sont pas associées à un risque sûreté.

Une sensibilité à un décalage complémentaire de °C a été également étudié sur le fond du bol pour tenir compte des valeurs ponctuelles plus importantes en termes de teneur de carbone pour les situations de fonctionnement de catégories 2, 3 et 4 et situations hors DDS.

Un complément d'analyse est apporté dans le document [21] au titre de la sensibilité pour un décalage complémentaire de RT_{NDT} °C et °C et pour une $RT_{NDT}^{initiale}$ de recette sur le fond du bol pour les situations de fonctionnement de catégories 2, 3 et 4 et situations hors DDS.

La est une étude de sensibilité aux forts décalages de RT_{NDT} (°C et °C) en zone centrale vis à vis des transitoires de chocs chauds. Cette étude est générique et applicable à tous les GV RA 900 (avec prise en compte de la RT_{NDT} de recette correspondante). En effet, pour cette étude la seule hypothèse liée à la tranche concerne les efforts aux tubulures (séisme et chargements de RGV). Or, l'impact de ces efforts aux tubulures est limité pour cette analyse qui porte sur la zone courante du bol hors zones de transition d'épaisseur.

3.1.1 - Situation d'épreuve hydraulique primaire au taux de 1,2

Nota : Ces résultats sont obtenus pour une température minimale d'épreuve de °C.

Zone 1, entre 0 et 300 mm du centre du fond

$RT_{NDT}^{initiale}$	ΔRT_{NDT}^{seg}	Défaut x mm	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{1,6K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{1,6K_{cp}}$

Zone 2, entre 300 et 700 mm du centre du fond

$RT_{NDT}^{initiale}$	ΔRT_{NDT}^{seg}	Défaut x mm	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{1,6K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{1,6K_{cp}}$

Zone 3, entre 700 et 1100 mm du centre du fond, à l'exclusion des zones de transition

$RT_{NDT}^{initiale}$	ΔRT_{NDT}^{seg}	Défaut x mm	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{1,6K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{1,6K_{cp}}$

Zone 4, dans les zones de transition des tubulures et trous d'homme

$RT_{NDT}^{initiale}$	ΔRT_{NDT}^{seg}	Défaut x mm	Défaut x mm	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{1,6K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{1,6K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{1,6K_{cp}}$

Etude du défaut de x mm hors zone de transition

En situation d'épreuve hydraulique au taux de 1,2, la stabilité vis-à-vis du risque de rupture fragile du défaut de x mm postulé est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C et °C sur l'ensemble de la zone d'étude pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées.

Au titre de la sensibilité, l'étude de la stabilité d'un défaut de x mm vis-à-vis du risque de rupture fragile est démontrée pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette démonstration est également apportée en zone 1 et 2 en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C.

Etude du défaut de x mm dans les zones de transition

En situation d'épreuve hydraulique au taux de 1,2, la stabilité vis-à-vis du risque de rupture fragile des défauts postulés est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C et °C sur les zones de transition pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées.

Au titre de la sensibilité, l'analyse de défauts de x mm et x mm sont également présentés. La stabilité d'un défaut de x mm est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} égal à et °C pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées. La stabilité d'un défaut de x mm est également démontrée pour un décalage de RT_{NDT} de °C pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées.

3.1.2 - Situations de catégories 2, 3 et 4 et situations hors DDS

L'application des mesures compensatoires permet de définir une température minimale égale à °C pour les transitoires de chocs chauds d'amplitude °C (situation 28D). Les facteurs de marge minimaux sont les suivants **pour les situations de catégories 2, 3 et 4.**

Zone 1, entre 0 et 300 mm du centre du fond

$RT_{NDT}^{initiale}$	ΔRT_{NDT}^{seg}	Défaut x mm	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$
°C			
°C			

Zone 2, entre 300 et 700 mm du centre du fond

RT _{NDT} ^{initiale}	ΔRT _{NDT} ^{seg}	Défaut x mm	Défaut x' mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$
°C			
°C			

Zone 3, entre 700 et 1100 mm du centre du fond, à l'exclusion des zones de transition

RT _{NDT} ^{initiale}	ΔRT _{NDT} ^{seg}	Défaut x mm	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$
°C			
°C			

Zone 4, dans les zones de transition des tubulures et trous d'homme

RT _{NDT} ^{initiale}	ΔRT _{NDT} ^{seg}	Défaut x mm	Défaut x mm	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$	$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$
°C				
°C				

Etude du défaut de x mm hors zone de transition

En situation de catégories 2, 3 et 4, la stabilité vis-à-vis du risque de rupture fragile du défaut de x mm postulé est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C, °C et °C sur l'ensemble de la zone d'étude pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées. Un complément d'analyse, au titre de la sensibilité, démontre également la stabilité du défaut de x mm en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C et °C pour la $RT_{NDT}^{initiale}$ de recette de °C.

Au titre de la sensibilité, la stabilité d'un défaut de x mm vis-à-vis du risque de rupture fragile des défauts postulés est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C, °C et °C sur l'ensemble de la zone d'étude pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées.

Etude du défaut de x mm dans les zones de transition

En situation de catégories 2, 3 et 4, la stabilité vis-à-vis du risque de rupture fragile du défaut de x mm postulé est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C et °C sur les zones de transition pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées.

Au titre de la sensibilité, l'analyse de défauts de x mm et x' mm sont également présentés. La stabilité d'un défaut de x mm est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} égal à et °C pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées. La stabilité d'un défaut de x mm est également démontrée pour un décalage de RT_{NDT} de °C pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées.

3.2 - TRANSITOIRES DE CHOCS FROIDS

L'analyse du risque de rupture fragile des fonds de type RA pour des **décalages de °C et une sensibilité à °C de RT_{NDT} sous transitoires de chocs froids** est réalisée dans la note en référence [4]. Ce document évalue l'impact d'un abaissement local des propriétés de ténacité du matériau dans le domaine fragile, lié à la présence de la zone ségrégée en carbone.

Pour les différentes situations analysées, la RT_{NDT} initiale considérée est la RT_{NDT} maximale de recette de °C (correspondant à la plus pénalisante parmi les 2 GV de DAM 3 considérés).

Quatre zones sont distinguées pour l'étude (cf. §2.3.4) :

- Entre 0 et 300 mm de l'axe du fond de GV
- Entre 300 et 700 mm de l'axe du fond de GV (incluant les pieds de tubulures)
- Supérieures à 700 mm de l'axe du fond de GV hors zones de transitions
- Les zones de transition des tubulures.

Les résultats en termes de facteurs de marge sont présentés pour un défaut postulé débouchant à l'interface entre le revêtement et le fond primaire sur l'ensemble des zones de dimensions mm (hauteur) x mm (longueur).

Les marges en situations de fonctionnement de catégories 2, 3 et 4 et situations hors DDS présentant des chocs froids sont analysées dans la note référence [4] avec prise en compte des mesures compensatoires mises en place pour limiter les transitoires de chocs froids

Les facteurs de marge minimaux sont les suivants **pour les situations de catégories 2, 3 et 4 et situations hors DDS.**

Zone 1, entre 0 et 300 mm du centre du fond

$RT_{\text{NDT}}^{\text{initiale}}$	$\Delta RT_{\text{NDT}}^{\text{seg}}$	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$

Zone 2, entre 300 et 700 mm du centre du fond

$RT_{\text{NDT}}^{\text{initiale}}$	$\Delta RT_{\text{NDT}}^{\text{seg}}$	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$

Zone 3, entre 700 et 1100 mm du centre du fond, à l'exclusion des zones de transition

$RT_{\text{NDT}}^{\text{initiale}}$	$\Delta RT_{\text{NDT}}^{\text{seg}}$	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$

Zone 4, dans les zones de transition des tubulures

$RT_{\text{NDT}}^{\text{initiale}}$	$\Delta RT_{\text{NDT}}^{\text{seg}}$	Défaut x mm
		$Fm = \frac{K_{IC}}{\alpha K_{cp}}$

Etude du défaut de x mm sur l'ensemble des zones

En situation de catégories 2, 3 et 4, la stabilité vis-à-vis du risque de rupture fragile du défaut de x mm postulé est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C sur l'ensemble de la zone d'étude et également pour un décalage de °C au titre de la sensibilité pour la valeur de RT_{NDT} indiquée.

4 - PROGRAMME SUR PIECES SACRIFICIELLES

un programme matériau est proposé.

L'objectif est de disposer de pièces sacrificielles représentatives en termes de distribution de ténacité et de teneurs en carbone.

La justification dans le domaine fragile s'appuiera ensuite sur la vérification que l'ensemble des points de ténacité reste enveloppé par la courbe de l'annexe ZG indexée sur la RT_{NDT} de recette décalée de la valeur ΔRT_{NDT}^{seg} .

La justification dans le domaine ductile consistera par ailleurs à vérifier la conformité des résultats obtenus vis-à-vis des valeurs de référence de l'annexe ZG du code RCC-M.

5 - CONCLUSION

Les fonds primaires de GV/RA 237 (GV2) et GV/RA 239 (GV3) installés sur Dampierre 3 sont des pièces forgées écrasées issues de lingots conventionnels 90 tonnes de fabrication JCFC. A ce titre, leur zone centrale et les tubulures sont susceptibles de présenter une zone de ségrégation majeure positive en carbone.

Une mesure par spectrométrie du taux de carbone a été mise en œuvre en 2016 sur ces 2 fonds de bols GV. Ces mesures ont été complétées par des prélèvements de copeaux, les résultats d'analyse sur ceux-ci sont cohérents avec les mesures par spectrométrie.

Les mesures de carbone réalisées montrent une ségrégation carbone positive sur la partie centrale du bol du GV/RA 237 (GV2) avec une valeur maximale de 0,33%. Au voisinage des tubulures, les valeurs moyennes mesurées sont de l'ordre de 0,20% avec des valeurs maximales de 0,25%.

Les mesures de carbone réalisées montrent une ségrégation carbone positive sur la partie centrale du bol du GV/RA 239 (GV3) avec une valeur maximale de 0,26%. Au voisinage des tubulures, les valeurs moyennes mesurées sont de l'ordre de 0,20% avec des valeurs maximales de 0,30%.

- Transitoires de chocs chauds

La stabilité d'un défaut postulé dans la zone centrale et dans les zones de transition (tubulures et trous d'homme primaires) a été étudiée, en considérant une RT_{NDT} fin de vie pour laquelle les effets de vieillissement et de ségrégation sont pris en compte.

Le défaut postulé hors zone de transition, un défaut débouchant de x mm en peau externe, est cohérent avec la sensibilité des CND et END appliqués.

Dans la zone de transition un défaut postulé de x mm débouchant en peau externe est étudié et justifié.

Par ailleurs, un contrôle UT permettant la détection d'un défaut de x mm sur la zone de transition des tubulures, présentant un ligament inférieur à mm par rapport à la paroi externe, a été mis en œuvre et a démontré l'absence d'un défaut supérieur au seuil de notation sur ces zones. Cela met en évidence des marges réelles supplémentaires compte tenu de la taille de défaut de x mm justifié dans les analyses mécaniques.

En situation d'épreuve hydraulique au taux de 1,2 :

- La stabilité vis-à-vis du risque de rupture fragile d'un défaut débouchant de dimensions x mm est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à °C et un décalage forfaitaire de °C sur l'ensemble de la zone d'étude hors zones de transition pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées.
- Un défaut débouchant de dimensions x mm est justifié dans les zones de transition en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à : °C et °C pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées.

En situations de catégories 2, 3 et 4, en appliquant les mesures compensatoires

- La stabilité vis-à-vis du risque de rupture fragile d'un défaut débouchant de dimensions x mm est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à $^{\circ}C$ et des décalages forfaitaires de $^{\circ}C$ et $^{\circ}C$ sur l'ensemble de la zone d'étude hors zone de transition pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées. Un complément d'analyse, au titre de la sensibilité, démontre également la stabilité du défaut de x mm en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à $^{\circ}C$ et $^{\circ}C$ pour la $RT_{NDT}^{initiale}$ de recette de $^{\circ}C$.
- Un défaut débouchant de dimensions x mm est justifié dans les zones de transition en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à $^{\circ}C$ et $^{\circ}C$ pour les deux valeurs de $RT_{NDT}^{initiale}$ indiquées.

- Transitoires de chocs froids

La stabilité d'un défaut postulé dans la zone centrale et dans les zones de transition des tubulures a été étudiée, en considérant une RT_{NDT} fin de vie pour laquelle les effets de vieillissement et de ségrégation sont pris en compte.

En situations de catégories 2, 3 et 4, en considérant l'application des mesures compensatoires en exploitation la stabilité vis-à-vis du risque de rupture fragile d'un défaut débouchant de dimensions x mm est démontrée en considérant un décalage de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à $^{\circ}C$ sur l'ensemble de la zone d'étude pour la valeur maximale de $RT_{NDT}^{initiale}$ de recette ($^{\circ}C$). La stabilité de ces défauts est également démontrée en considérant un décalage forfaitaire de RT_{NDT} dû à la ségrégation égal à $^{\circ}C$ au titre de la sensibilité pour cette même valeur de $RT_{NDT}^{initiale}$.

Un programme « Matériau » sur pièces sacrificielles sera également réalisé afin de consolider les hypothèses retenues pour le décalage de RT_{NDT} ($^{\circ}C$, $^{\circ}C$, $^{\circ}C$, $^{\circ}C$ et $^{\circ}C$)

Les hypothèses retenues en termes d'extension de la zone ségrégée, de décalage de RT_{NDT} et de défauts postulés, ont été analysées et argumentées. Ces éléments ont été consolidés par des mesures de carbone et des END par ressuage et ultrasons en amont de la remise en service de ces appareils au sens de l'arrêté en référence [24].

Avec l'ensemble des éléments disponibles, notre analyse permet de conclure que la présence d'une ségrégation résiduelle positive de carbone dans les fonds des Générateurs de Vapeur RA/237 (GV2) et RA/239 (GV3) de Dampierre 3, ne remet pas en cause l'exigence définie d'intégrité, en toutes situations et donc l'aptitude au service de ces composants.

6 - REFERENCES

- [3] BUCLR/NGV3097 indice B : Analyse du risque de rupture fragile des fonds primaires GV/RA de Dampierre 3.
- [4] BUCLR/NGV3116 indice A : Analyse du comportement de l'enceinte – Analyse du risque de rupture fragile des fonds primaires de Dampierre 3 soumis à des chocs froids.

[21] CMHMTC 2016.461 du 7 octobre 2016 – Analyse du risque de rupture fragile des fonds de type RA pour des décalages importants de RT_{NDT} sous transitoires de chocs chauds

[24] Arrêté du 10 novembre 1999 relatif à la surveillance de l'exploitation du circuit primaire principal et des circuits secondaires principaux des réacteurs nucléaires à eau sous pression.