

Date : 21 décembre 2016

NOTE TECHNIQUE
Note de synthèse
Justification de la tenue en service des fonds primaires
des Générateurs de Vapeur de Fessenheim 1

D5190-16.0925 - NT03MC0920 Indice : 0 22 Pages 0 annexe(s) 0 pièce(s) jointe(s)

Périmètre d'applicabilité : Tranche 1

Entité émettrice : Service Mécanique Chaudronnerie

Documents associés :

Résumé : Les fonds primaires des GV 1, GV 2 et GV 3 (GV/RA 262, GV/RA 264 et GV/RA 263 respectivement) installés à Fessenheim 1 sont des pièces forgées écrasées issues de lingots conventionnels 120 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.

Date de réexamen : S.O.
Annule et Remplace : S.O.
Accessibilité : EDF
Durée de conservation : SITE
Classement documentaire : Documentation de Référence
Niveau Qualité : QS



Note de synthèse
Justification de la tenue en service des fonds primaires
des Générateurs de Vapeur de Fessenheim 1

Page : 2 / 22

Réf. : D5190-16.0925 - NT03MC0920

Indice : 0

FICHE QUALITÉ

Ind.	Rédacteur(s)		Contrôleur(s)		Approbateur		
	Nom	Visa	Nom	Visa	Nom	Visa	Date du Visa
0							

Identification du fichier : D5190-16 0925-X00.docx - 1001383 Octets - 21/12/2016 18:43:00

Identification du formulaire : Note issue du modèle Note_UNIE - Version 2007-01



FICHE DE DIFFUSION

Diffusion interne à l'unité

Destinataire(s) pour application	Nb	Destinataire(s) pour information	Nb

Diffusion externe à l'unité

Destinataire(s)	Organisme(s)	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 GV1, GV2 ET GV3 DE FESSENHEIM 1	5
2.2. PROPRIETES DE TENACITE - DECALAGES DE RTNDT A CONSIDERER TENANT COMPTE D'UNE SEGREGATION MAJEURE POSITIVE RESIDUELLE EN CARBONE	9
2.3. DEFAUTS POSTULES	9
2.3.1. CND de fabrication	10
2.3.2. Examen complémentaire par ressuage réalisé en 2016	11
2.3.3. Examens complémentaires par ultrasons réalisés en 2016	12
2.3.4. Défauts postulés à prendre en compte dans les analyses mécaniques	13
2.4. SITUATIONS CONSIDEREES	14
2.5. METHODE D'ANALYSE	15
3. RESULTATS DES ANALYSES MECANIQUES	15
3.1. TRANSITOIRES DE CHOCS CHAUDS	15
3.1.1. Concernant les fonds de bols GV, hors zones de transitions des tubulures	15
3.1.2. Concernant les zones de transitions des tubulures :	18
3.2. TRANSITOIRES DE CHOCS FROIDS	19
4. PROGRAMME SUR PIECES SACRIFICIELLES	20
5. CONCLUSION	21
6. REFERENCES	22

1. OBJET

Les fonds primaires des GV 1, GV 2 et GV 3 (GV/RA 262, GV/RA 264 et GV/RA 263 respectivement) installés à Fessenheim 1 sont des pièces forgées écrasées issues des lingots conventionnels de 120 tonnes de fabrication JCFC (Japan Casting Forging Corporation). A ce titre, ils sont susceptibles de présenter une zone de ségrégation majeure positive résiduelle en carbone

L'objectif de ce document est de justifier la tenue en service des fonds primaires des GV/RA 262, GV/RA 264 et GV/RA 263 en évaluant l'impact d'un abaissement local des propriétés de ténacité du matériau, lié à la présence de la ségrégation en carbone, vis-à-vis du risque de rupture brutale.

2. DEMARCHE DE JUSTIFICATION

L'analyse de nocivité des défauts postulés dans le fond primaire des GV/RA 262, GV/RA 264 et GV/RA 263 est présentée dans les documents [2], [3] et [4].

Ces documents évaluent, dans le domaine fragile et de 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} 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 GV1, GV2 ET GV3 DE FESSENHEIM 1

Les fonds primaires de fabrication JCFC présentent une zone décarburée en surface externe. Toutefois, pour les fonds JCFC issus de lingots 120 tonnes, de modèle 47/22 avec pieds intégrés, un méplat central a été usiné en surface externe après traitement thermique (cas des GV/RA 262, GV/RA 264 et GV/RA 263 de FESSENHEIM 1). Cet usinage est suffisant pour retirer la couche décarburée, des mesures par spectrométrie optique à source étincelle ont été réalisées dans cette zone.

Les zones au voisinage des tubulures sont également des zones usinées. Elles peuvent faire l'objet de mesures de taux de carbone par spectrométrie d'émission optique à source étincelle.

Le maillage retenu et les résultats obtenus sont détaillés
graphique simplifiée suivante :

et rappelés sur la représentation

Figure 1 - Résultats mesures Carbone GV/RA 262 (GV1) – FSH1

Ces mesures mettent en évidence sur le GV/RA 262:

- une zone ségrégée au centre du bol avec des teneurs en carbone maximales détectées atteignant 0,31%. Au-delà du méplat central, les valeurs obtenues confirment la présence d'une couche décarburée en surface extérieure.
- une zone ségrégée au niveau des tubulures avec des valeurs moyennes de 0,22% de carbone sur la tubulure TH et 0,23% sur la tubulure TB et des valeurs maximales détectées atteignant 0,24% sur la zone de transition de la tubulure TH et 0,22% sur la zone de transition de la tubulure TB.

Figure 2 - Résultats mesures Carbone GV/RA 264 (GV2) – FSH1

Ces mesures mettent en évidence sur le GV/RA 264:

- une zone ségrégée au centre du bol avec des teneurs en carbone maximales détectées atteignant 0,37% (point E1). Au-delà du méplat central, les valeurs obtenues confirment la présence d'une couche décarburée en surface extérieure.
- une zone ségrégée au niveau des tubulures avec des valeurs moyennes de 0,30% de carbone sur la tubulure TH et 0,28% sur la tubulure TB et des valeurs maximales détectées atteignant 0,31% dans la zone de transition des tubulures TH et TB

Figure 3 - Résultats mesures Carbone GV/RA 263 (GV3) – FSH1

Ces mesures mettent en évidence sur le GV/RA 263:

- une zone ségrégée au centre du bol avec des teneurs en carbone maximales détectées atteignant 0,34% (point B2). Au-delà du méplat central, les valeurs obtenues confirment la présence d'une couche décarburée en surface extérieure.
- une zone ségrégée au niveau des tubulures avec des valeurs moyennes de 0,23% de carbone sur la tubulure TH et 0,21% sur la tubulure TB et des valeurs maximales détectées atteignant 0,31% sur la zone de transition de la tubulure TH et 0,27% sur la zone de transition de la tubulure TB.

Conclusion sur l'état de connaissance de la ségrégation carbone des GV :

Les mesures par spectrométrie d'émission optique mettent en évidence :

- une zone ségrégée au centre du bol avec des teneurs en carbone maximales détectées atteignant jusqu'à 0,37% au niveau du GV/RA 264. Au-delà du méplat central, les valeurs obtenues confirment la présence d'une couche décarburée en surface extérieure.
- Au niveau des zones de transition, une zone ségrégée a été caractérisée avec des valeurs maximales détectées atteignant 0,31% de carbone au niveau de la zone de transition des tubulures du GV/RA 264 (tubulures TH et TB) et du GV/RA 263 (tubulure TH)

2.2. PROPRIETES DE TENACITE - DECALAGES DE RTNDT A CONSIDERER TENANT COMPTE D'UNE SEGREGATION MAJEURE POSITIVE RESIDUELLE EN CARBONE

La ténacité KIC du matériau est définie selon le paragraphe ZG 6110 du code RCC-M :

- **T** est la température du matériau à l'instant considéré 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} fin de vie retenue prend en compte les effets de vieillissement et de la ségrégation et est déterminée suivant la formule suivante :

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

Avec :

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

$$GV/RA 262 (GV1) - RT_{NDT}^{initiale} = \quad ^\circ C$$

$$GV/RA 264 (GV2) - RT_{NDT}^{initiale} = \quad ^\circ C$$

$$GV/RA 263 (GV3) - RT_{NDT}^{initiale} = \quad ^\circ C$$

Les calculs sont ainsi effectués pour une RT_{NDT}^{initiale} de \quad °C correspondant à la valeur maximale admissible selon le RCC-M et pour une RT_{NDT}^{initiale} de \quad °C correspondant à la valeur de recette **maximale** pour le fond des GV/RA 262, GV/RA 264 et GV/RA 263 de FESSENHEIM 1

- **ΔRT_{NDT}^v** = décalage de RT_{NDT} tenant compte des effets de vieillissement.
Le décalage retenu est égal à \quad °C selon le chapitre ZG 6120 du code RCC-M.
- **ΔRT_{NDT}^{seg}** = décalage de RT_{NDT} tenant compte d'un effet de ségrégation majeure positive en carbone.

Les mesures de taux de carbone présentées dans le paragraphe précédent conduisent à considérer des zones moins ségréguées d'une part, regroupant les zones de transitions des tubulures et la paroi interne du fond primaire pour laquelle la teneur maximale en carbone en peau interne peut être évaluée de manière conservative à 0,26 % et une zone plus ségréguée d'autre part, correspondant à la zone centrale des fonds primaires.

Pour les premières zones, en accord avec le REX obtenu sur les calottes de Flamanville 3 et 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 deux décalages ΔRT_{NDT}^{seg} de \quad °C et \quad °C sont retenus.

Pour les autres zones, deux décalages additionnels de RT_{NDT} de \quad et \quad °C viennent compléter l'analyse de l'impact d'un abaissement de propriété de ténacité du fait d'une ségrégation carbone. Ces valeurs additionnelles sont cohérentes avec le décalage enveloppe de RT_{NDT} de \quad °C associé à la présence d'une zone de ségrégation majeure positive pouvant atteindre 0,39 % de carbone

L'ensemble des analyses mécaniques relatives à l'étude de tenue à la rupture brutale de défauts postulés dans les zones ségréguées, avec prise en compte des valeurs enveloppes de décalages de RT_{NDT}, est développé dans la présente note. L'influence des transitoires de types chocs chauds et froids est prise en compte.

2.3. DEFAUTS POSTULES

Les défauts potentiels générés par le procédé de fabrication des fonds primaires ont été identifiés. Les défauts inacceptables retenus 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 la référence 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 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 dans le document . Les résultats sont détaillés ci après :

En zone centrale (y compris les trous d'homme) et en zone courante des tubulures :

Des travaux de simulation et 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 :

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 mm par rapport à la paroi externe,

Les capacités de détections associées aux CND réalisés en zone centrale s'appliquent également aux zones de transitions fond/trous d'homme.

En 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 225 mm mini du congé de raccordement sur les surfaces interne 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

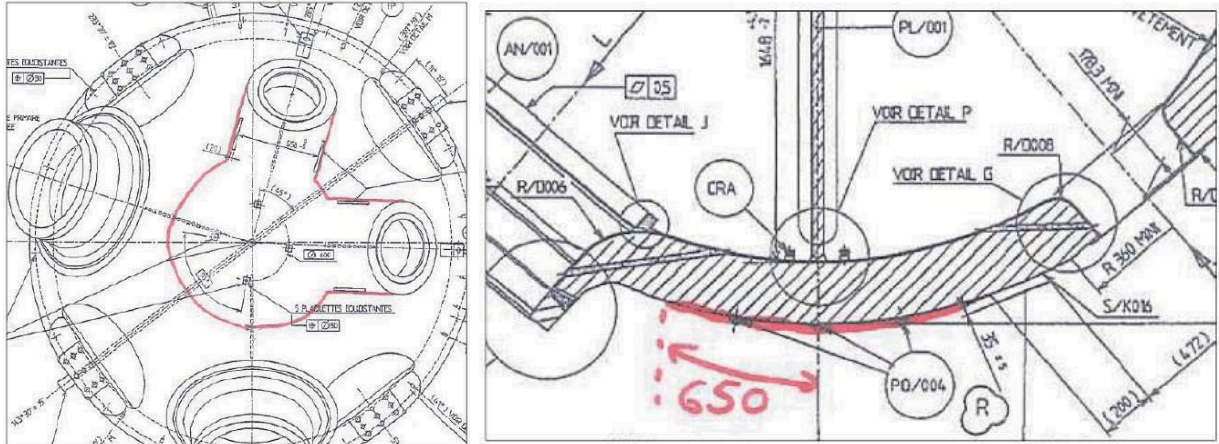
Pour les zones non couvertes par la magnétoscopie, un **examen complémentaire par ressuage** a été mis en œuvre lors de l'arrêt 1P29/2016. La zone examinée est définie pour compléter le contrôle surfacique réalisé par magnétoscopie en fabrication sur les tubulures tout en assurant une zone de recouvrement 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 début du congé côté fond primaire, à l'exclusion des congés eux-mêmes).
- 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 262, GV/RA 264 et GV/RA 263 de FES1

Zone du ressuage effectué en 2016 (1P29) sur le fond des GV de FES1 :



2.3.3. Examens complémentaires par ultrasons réalisés en 2016

Le procédé de fabrication du fond concerné 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 par ultrasons ont été mis en œuvre lors de l'arrêt intermédiaire de décembre 2016

- 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 mm et de longueur mm, de forme elliptique et d'orientation radiale.

Pour les fonds des GV/RA 262, GV/RA 264 et GV/RA 263 de FESSENHEIM 1, 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 à mi-épaisseur 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.

Pour les fonds des GV/RA 262, GV/RA 264 et GV/RA 263 de FESSENHEIM 1, 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. Défauts postulés à prendre en compte 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 par des END complémentaires mis en œuvre en exploitation (cf. paragraphe 2.3.2).

Pour la surface 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 surfaces 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

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

- En peau externe (sensible aux chocs thermiques chauds) : défaut semi-elliptique de dimensions x mm situé dans le bol, hors zones de transitions des tubulures, et défauts semi-elliptiques de dimensions x mm dans la zone de transition des tubulures et x mm dans les zones de transitions des THP. Ce dernier est enveloppe de celui détectable dans la zone de transition des THP (de x mm), comme précisé dans la note en référence
- En peau interne (sensible aux chocs froids) : défaut semi-elliptique de dimensions x mm couvrant 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.

Plusieurs zones sont distinguées en fonction de la distance au centre géométrique du fond primaire :

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

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 4 ci-dessous). La zone de transition des tubulures est directement soumise aux chargements extérieurs provenant de la boucle primaire.

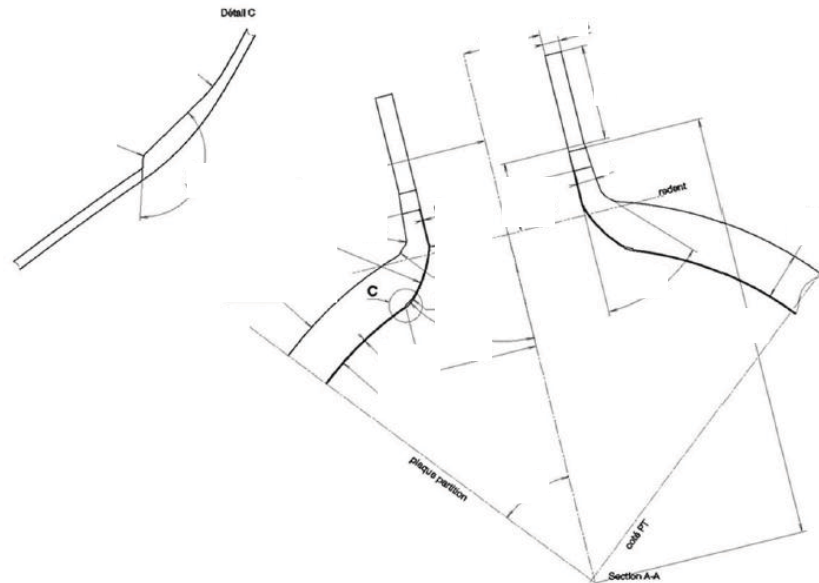


Figure 4 - Zone de transition des tubulures

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.

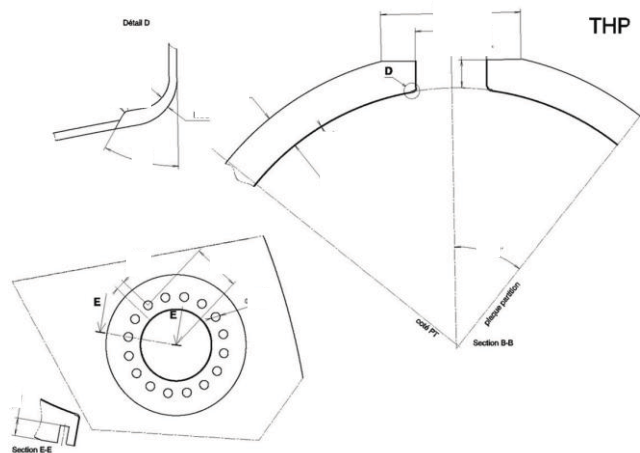


Figure 5 - Zone de transition des trous d'homme primaire

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.

Les situations générant des chocs thermiques chauds introduisent effectivement des gradients thermiques dans l'épaisseur qui génèrent des contraintes d'ouverture en cas de défauts postulés en peau externe. Les situations considérées sont prises en compte dans les notes [2] et [4].

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. Les situations considérées sont prises en compte dans l'analyse mécanique [3].

2.5. METHODE D'ANALYSE

Les contraintes d'origines mécanique et thermique sont calculées par des simulations effectuées sur les modèles éléments finis 3D. 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 la 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 la température indexée sur 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 des tubulures (pour des décalages enveloppes de RT_{NDT} de °C et °C), et au niveau des zones de transitions des tubulures (pour des décalages de RT_{NDT} de °C et °C).
- **Les transitoires de chocs froids** pour un défaut situé **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). Un défaut enfoui est également étudié afin d'analyser l'impact d'une baisse de ténacité entre la peau interne et la mi-épaisseur.

3. RESULTATS DES ANALYSES MECANIQUES

3.1. TRANSITOIRES DE CHOCS CHAUDS

Les résultats des analyses des chocs chauds sont scindés en deux parties en fonction du niveau de ségrégation constaté :

- augmentation de RT_{NDT} de °C et °C (cf. référence [4]) : concerne les fonds des bols GV hors zone de transitions.
- augmentation de RT_{NDT} de °C et °C (cf. référence [2]) : concerne les zones de transitions des tubulures,

3.1.1. Concernant les fonds de bols GV, hors zones de transitions des tubulures

L'analyse du risque de rupture fragile des fonds de type RA pour des **décalages importants de RT_{NDT} sous transitoires de chocs chauds** 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 ségréguée en carbone.

Plus particulièrement, il y est évalué le risque de rupture fragile des fonds primaires de GV/RA en peau externe sollicités sous **chocs chauds pour les décalages de RT_{NDT} de** et ° C en dehors des zones de transitions des tubulures pour les situations normales et perturbées et pour le transitoire de perte RRA (transitoire pénalisant vis-à-vis des situations de catégories 3 et 4). 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.

Les RT_{NDT} initiales retenues sont :

- ° C correspondant à la RT_{NDT} de recette la plus élevée parmi les GV/RA 262, GV/RA 263 et GV/RA 264 de FES1.
- ° C, valeur du code RCC-M permettant de couvrir l'ensemble des fonds RA (considérée ici à titre informatif).

Trois zones sont distinguées pour l'étude :

- 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.

L'analyse est réalisée en situations normales et perturbées sur la base du DDS VD3. Ces situations de catégorie 2 couvrent celles de catégorie 3 grâce à l'application des mesures compensatoires d'exploitation mises en place pour pallier les risques de chocs chauds. Une analyse du transitoire de perte RRA (transitoire de 4^{ème} catégorie) est également présentée.

Le défaut postulé est débouchant en peau externe de dimensions x mm hors zones de transition.

Les facteurs de marge F_m sont calculés pour différentes situations considérées et localisations dans le bol GV.

• **Situations normales et perturbées :**

Les valeurs de F_m présentées dans les 3 tableaux ci après sont issues de la note [4] et sont données pour des valeurs de RT_{NDT} initiale de ° C et de ° C, ce dernier cas étant enveloppe de la valeur de RT_{NDT} initiale maximale pour les GV de Fessenheim 1 de ° C.

- Pour une distance comprise entre 0 et 300 mm de l'axe du GV :

RT_{NDT} initiale	ΔRT_{NDT}	Défaut mm	
		$K_{Ic} / (2 K_{cp})$	Transitoire
° C	—	—	1C
			1C
° C	—	—	1C
			1C

- Pour une distance comprise entre 300 et 700 mm de l'axe du GV :

RT_{NDT} initiale	ΔRT_{NDT}	Défaut mm	
		$K_{Ic} / (2 K_{cp})$	Transitoire
° C	—	—	1C
			1B
° C	—	—	1C
			1B

- Pour une distance supérieure à 700 mm de l'axe du GV, hors zones de transitions des tubulures :

RT _{NDT} initiale	ΔRT _{NDT}	Défaut mm	
		$K_{ic} / (2 K_{cp})$	Transitoire
° C	—		1C
			1C
° C	—		1C
			1C

Les résultats montrent qu'en situations normales et perturbées, la stabilité d'un défaut postulé de x mm, situé en peau externe, est démontrée ($F_m \geq 1$) avec des décalages enveloppes de RT_{NDT} de ° C et ° C dans les zones considérées.

- **Transitoire de** _____ :

Le transitoire de _____ peut être scindé en deux variantes caractérisées par des températures initiales différentes : ° C et ° C, conformément à la note en référence [4].

- Pour une distance comprise entre 0 et 300 mm de l'axe du GV :

RT _{NDT} initiale	ΔRT _{NDT}	Défaut mm	
		$K_{ic} / (1,2 K_{cp})$	Transitoire

- Pour une distance comprise entre 300 et 700 mm de l'axe du GV :

RT _{NDT} initiale	ΔRT _{NDT}	Défaut mm	
		$K_{ic} / (1,2 K_{cp})$	Transitoire

- Pour une distance supérieure à 700 mm de l'axe GV, hors zones de transitions des tubulures :

RT _{NDT} initiale	ΔRT _{NDT}	Défaut mm	
		$K_{ic} / (1,2 K_{cp})$	Transitoire

Les résultats des calculs montrent que la variante 2 (température initiale de ° C) est la plus pénalisante. Pour un défaut de x mm et un décalage enveloppe de RT_{NDT} de ° C et de ° C, les critères sont respectés en considérant la RT_{NDT} initiale de recette des GV de ° C.

Conclusion pour les fonds de bols GV, hors zones de transitions des tubulures :

Ces éléments montrent que, sous chargement de type « chocs chauds », le risque de rupture fragile est écarté pour les 3 fonds de GV de Fessenheim 1 dans l'ensemble des zones des bols primaires hors zones de transitions des tubulures (celles-ci étant traitées par la suite selon [2]) et pour toutes les catégories de situations, en considérant :

- Un défaut débouchant en peau externe de dimension x mm.
- La RT_{NDT} initiale de recette des fonds primaires des GV/RA 262, GV/RA 263 et GV/RA 264 de Fessenheim 1 ($^{\circ}C$).
- Un décalage enveloppe de RT_{NDT} de $^{\circ}C$ et $^{\circ}C$.

3.1.2. Concernant les zones de transitions des tubulures :

L'analyse du risque de rupture fragile sous chocs chauds est réalisée dans la note [2].

Les résultats en termes de facteurs de marge sont présentés ci-dessous pour des défauts débouchants postulés en peau externe, de dimensions de x mm dans les zones de transitions des tubulures et de x mm dans les zones de transitions des trous d'homme primaires (THP) selon

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

- La RT_{NDT} maximale spécifiée de $^{\circ}C$ issue du code RCC-M.
- La RT_{NDT} maximale de recette de $^{\circ}C$ issue des RFF

Nota : les résultats fournis avec la RT_{NDT} de $^{\circ}C$ sont fournis à titre informatif, seuls les résultats issus de la RT_{NDT} de recette ($^{\circ}C$) étant à prendre en compte pour les conclusions de l'analyse.

Les décalages de RT_{NDT} pris en compte dans l'analyse ($^{\circ}C$ et $^{\circ}C$) restent applicables compte tenu des valeurs de taux de carbone mesurées dans les zones de transitions de tubulures selon les résultats de la note

Analyse des situations précisées dans le DDS et des transitoires hors DDS :

L'analyse des transitoires du DDS VD3 900 MWe ainsi que des transitoires hors DDS a été étudiée dans la note [2].

Le tableau ci-dessous synthétise, pour les situations étudiées, les marges disponibles par rapport au critère RCC-M en fonction de la localisation du défaut et en prenant en compte les mesures compensatoires de la note en référence

- Pour les zones de transitions des tubulures (défaut de x mm), les facteurs de marge **minimaux** sont les suivants :

RT_{NDT} initiale	ΔRT_{NDT}	Défaut x mm	
		$K_{ic} / (\alpha K_{cp})$	Transitoire
$^{\circ}C$			
$^{\circ}C$			

Par ailleurs, un cas d'étude complémentaire a également été réalisé afin de déterminer le décalage de RT_{NDT} admissible dans la zone de transition des tubulures du GV/RA 264 (GV2) de Fessenheim 1. La valeur obtenue est de °C. En effet, avec ce décalage le facteur de marge minimal est de 1,00 en considérant la RT_{NDT} de recette de ce GV issue des RFF de °C, pour l'ensemble des situations étudiées et pour un défaut de x mm (annexe B de la note [2]).

- Pour les zones de transitions des THP (défaut de x mm), les facteurs de marge **minimaux** sont les suivants :

RT_{NDT} initiale	ΔRT_{NDT}	Défaut x mm	
		$K_{ic} / (\alpha K_{cp})$	Transitoire
° C	—	—	—
° C	—	—	—

En considérant l'application des mesures compensatoires en exploitation et la valeur de RT_{NDT} initiale maximale issue des recettes (° C), avec un décalage ΔRT_{NDT} égal à ° C ou ° C, les résultats ci-dessus montrent que la stabilité des défauts considérés de mm x mm pour les **zones de transition des tubulures** est démontrée dans toutes les catégories de situation. La stabilité est également démontrée dans toutes les catégories de situation pour un défaut de mm x mm (largement enveloppe du défaut détectable de x mm), **pour les zones de transition des THP**.

3.2. TRANSITOIRES DE CHOCS FROIDS

L'analyse mécanique en référence [3] évalue l'impact d'un abaissement local des propriétés de ténacité du matériau lié à la présence d'une zone ségréguée en carbone, vis-à-vis de la stabilité d'un défaut postulé débouchant (dimension x mm et x mm) en peau interne du fond primaire GV.

L'analyse d'un défaut non débouchant de x mm, enfoui à mm de la peau interne est également réalisée dans la note avec prise en compte d'un décalage enveloppe ΔRT_{NDT} de ° C.

Les transitoires de 2ème, 3ème et 4ème catégories retenus sont analysés dans la note en référence [3] avec prise en compte des mesures compensatoires mises en place pour limiter les transitoires de chocs froids

La RT_{NDT} maximale de recette de ° C associée à des décalages ΔRT_{NDT} de ° C et de ° C liés à la ségrégation carbone, est considérée pour analyser l'impact éventuel d'un abaissement des propriétés de ténacité.

Les facteurs de marge F_m sont calculés pour différentes situations considérées et localisations dans le bol GV. Seuls les transitoires présentant les marges les plus faibles sont détaillés.

- **Pour une distance comprise entre 0 et 300 mm de l'axe du GV :**

RT_{NDT} initiale	ΔRT_{NDT}	Défaut mm		Défaut mm	
		$K_{ic} / (\alpha K_{cp})$	Transitoire	$K_{ic} / (\alpha K_{cp})$	Transitoire
° C	—	—	28B2-2	—	28B2-2
			58-2		58-2

- Pour une distance comprise entre 300 et 700mm de l'axe du GV :

RT _{NDT} initiale	ΔRT _{NDT}	Défaut mm		Défaut mm	
		K _{ic} / (α K _{cp})	Transitoire	K _{ic} / (α K _{cp})	Transitoire
° C	-		57-21		28B2-2
			58-2		58-2

- Pour une distance supérieure à 700 mm de l'axe du GV, hors zones de transitions des tubulures :

RT _{NDT} initiale	ΔRT _{NDT}	Défaut mm		Défaut mm	
		K _{ic} / (α K _{cp})	Transitoire	K _{ic} / (α K _{cp})	Transitoire
° C	-		28D2-2		28D2-2
			58-2		58-2

- Pour les zones de transitions des tubulures :

RT _{NDT} initiale	ΔRT _{NDT}	Défaut mm		Défaut mm	
		K _{ic} / (α K _{cp})	Transitoire	K _{ic} / (α K _{cp})	Transitoire
° C	-		A1		28D2-2
			58-2		58-2

Conclusion :

Pour l'ensemble des transitoires et zones étudiés, les facteurs de marges sont tous supérieurs à 1.

Le défaut étudié de x mm, débouchant en peau interne du fond primaire et des zones de transitions des tubulures, ne présente donc pas de risque de rupture fragile sous chargements de chocs froids en considérant des décalages ΔRT_{NDT} de et ° C et la RT_{NDT} initiale de recette des 3 GV des Fessenheim 1 de ° C.

Les valeurs maximales de teneur de carbone estimées montrent que la ségrégation carbone est plus importante à mi-épaisseur qu'en peau interne. Une analyse a donc été menée en postulant un décalage forfaitaire enveloppe de RT_{NDT} (° C de décalage) et en plaçant un défaut non débouchant située à mm de l'interface revêtement/métal de base. Vis-à-vis des contraintes thermiques induites par un choc froid, cet emplacement de défaut est plus pénalisant qu'un défaut enfoui plus profondément dans la matière. Cette analyse a permis de démontrer qu'un défaut non débouchant de dimensions x mm, situé à mm de la peau interne ne présente pas de risque de rupture fragile en considérant un décalage de RT_{NDT} de ° C. Ceci permet donc de couvrir l'ensemble des défauts enfouis de x mm situés entre la peau interne et la mi-épaisseur.

4. PROGRAMME SUR PIÈCES SACRIFICIELLES

un programme matériau est proposé. L'objectif est de disposer, sur des pièces sacrificielles représentatives, d'une distribution de ténacités associées à des teneurs en carbone variables.

La justification de résistance mécanique 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 du code RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de recette décalée de la valeur ΔRT_{NDT}^{seg}.

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

5. CONCLUSION

Les fonds primaires des GV 1, GV 2 et GV 3 (GV/RA 262, GV/RA 264 et GV/RA 263) installés à Fessenheim 1 sont des pièces forgées écrasées issue de lingots conventionnels de 120 tonnes, de fabrication JCFC. A ce titre, leur zone centrale est susceptible de présenter une zone de ségrégation majeure positive résiduelle en carbone. Par ailleurs, les mesures de carbone réalisées au cours de l'arrêt spécifique de décembre 2016 attestent que des zones ségrégées en carbone affectent le fond du bol primaire et les zones de transition des tubulures.

Ces mesures ont mis en évidence une zone ségrégée en carbone au niveau de la zone de transition des tubulures avec des valeurs maximales détectées atteignant 0,31 % en carbone. Au centre du bol, une zone plus ségrégée a été relevée avec des teneurs en carbone maximales détectées localement atteignant jusqu'à 0,37 %.

La stabilité d'un défaut postulé dans ces zones a été étudiée en considérant une RT_{NDT} fin de vie pour laquelle les effets de vieillissement et de ségrégation en carbone sont pris en compte (effet enveloppe).

Les CND mis en œuvre lors de la fabrication et les END surfaciques (ressuages) et volumiques (ultrasons) réalisés en exploitation n'ont pas mis en évidence d'indications supérieures au seuil de notation sur les fonds de bol GV, ni sur les zones de transitions des tubulures. En outre, 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, y compris dans les zones de transitions des tubulures.

Les analyses mécaniques mettent en évidence :

- Transitoires de chocs chauds :

Sous chargement de chocs chauds, le risque de rupture fragile est écarté pour les fonds primaires des GV 1, GV 2 et GV 3 (GV/RA 262, GV/RA 263 et GV/RA 264) de Fessenheim 1 dans l'ensemble des zones des bols primaires, hors zones de transitions des tubulures et pour toutes les catégories de situations, en considérant :

- Un défaut débouchant en peau externe de dimensions x mm.
- La RT_{NDT} de recette des fonds primaires des GV n° 1, 2 et 3 ($^{\circ}$ C).
- Un décalage ΔRT_{NDT} de $^{\circ}$ C et $^{\circ}$ C lié à la ségrégation carbone.

Pour les zones de transitions, en considérant l'application des mesures compensatoires en exploitation et la valeur de RT_{NDT} initiale maximale issue des recettes ($^{\circ}$ C), avec un décalage ΔRT_{NDT} égal à $^{\circ}$ C ou $^{\circ}$ C, les calculs montrent que les défauts considérés de $mm \times mm$ en zone de transition des tubulures et de $mm \times mm$ en zone de transition des THP (largement enveloppe de celui qui peut être détecté qui serait de 5x30mm) n'induisent pas de risque de rupture fragile pour toutes les situations.

- Transitoires de chocs froids :

Pour l'ensemble des transitoires et zones étudiés (fond des bols GV et zones de transitions des tubulures), les facteurs de marges sont tous supérieurs à 1.

Le défaut étudié (x mm), débouchant en peau interne du fond primaire, n'induit donc pas de risque de rupture fragile sous chargements de chocs froids en considérant des décalages ΔRT_{NDT} de $^{\circ}$ C et $^{\circ}$ C et la RT_{NDT} initiale de recette des GV de $^{\circ}$ C.

De plus, l'analyse menée montre que le défaut non débouchant de dimensions x mm, situé à mm de la peau interne ne présente pas de risque de rupture fragile en considérant un décalage enveloppe ΔRT_{NDT} de $^{\circ}$ C.

Les mesures de carbone ont été réalisées sur la surface extérieure du fond du bol (concentration locale maximale de 0,37 % en carbone sur le GV 2) ainsi qu'au niveau des tubulures (concentration locale maximale de 0,31 % en carbone dans la zone de transition des tubulures sur le GV 2 et sur la zone de transition de la tubulure TB du GV3).

Les hypothèses retenues en termes d'extension de la zone ségrégée, de décalage de RT_{NDT} et de défaut postulé, ont été analysées et justifiées. Ces éléments ont été consolidés par des END en amont de la remise en service de ces appareils au sens de l'arrêté en référence [17]. Un programme « matériau » sur pièces sacrificielles sera également réalisé pour conforter le caractère enveloppe des hypothèses retenues pour le décalage de RT_{NDT} .

Avec l'ensemble des éléments disponibles, notre analyse permet de conclure que la présence d'une ségrégation majeure positive résiduelle en carbone dans les fonds des GV 1, GV 2 et GV 3 de Fessenheim 1, ne remet pas en cause l'exigence définie d'intégrité, en toutes situations et donc l'aptitude au service de ces composants

6. REFERENCES

- [2] Note AREVA-BUCLRA/NGV3083 rév. C – Analyse du comportement de l'enceinte Analyse du risque de rupture fragile des fonds primaires GV/RA de Fessenheim 1.
- [3] Note AREVA BUCLRA/NGV3120 rév. A – Analyse du comportement de l'enceinte Analyse du risque de rupture fragile des fonds primaires GV/RA JCFC de Fessenheim 1 soumis à des chocs froids.
- [4] Note AREVA CMHMTC 2016.461 – Analyse du risque de rupture fragile des fonds de type RA pour des décalages importants de RTNDT sous transitoires de chocs chauds.

- [17] Arrêté du 10 novembre 1999 relatif à la surveillance de l'exploitation du CPP et des Circuits Secondaires Principaux.