# HSNA104 – Détensionnement de joints hétérogènes soudés par friction

**Résumé :**

Ce cas-test correspond à une partie de l'étude décrite dans la note [bib1]. Il constitue une validation des modèles de comportement thermomécaniques tenant compte des transformations métallurgiques au refroidissement dans les aciers. Il s'agit de la simulation de la phase de refroidissement du détensionnement de joints bimétalliques Acier 16MND5 – Acier inoxydable 304L préalablement soudés par friction, afin de déterminer les contraintes résiduelles générées à la fin de ce refroidissement. Le calcul de thermique linéaire de la phase de refroidissement homogène est tout d'abord effectué, puis l'évolution métallurgique dans le 16MND5 est calculée (transformation de type ferritique). Après quoi la simulation du problème mécanique tenant compte des transformations de phases métallurgiques est effectuée en postulant au début de la phase de refroidissement un état de contraintes nul (parfaitement relaxé) dans la structure.

La modélisation mécanique est effectuée en tenant compte de la décarburation à l'interface 16MND5-304L et de la plasticité de transformation. Le comportement est élastoplastique avec écrouissage isotrope linéaire pour le 16MND5 (toutes les phases), et élastoplastique avec écrouissage isotrope non linéaire pour l'acier 304L.

Les résultats en contraintes résiduelles obtenues en peau externe sont comparés à des résultats de mesures effectuées par diffraction de rayon X [bib1].



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 1 Problème de référence

## 1.1 Géométrie

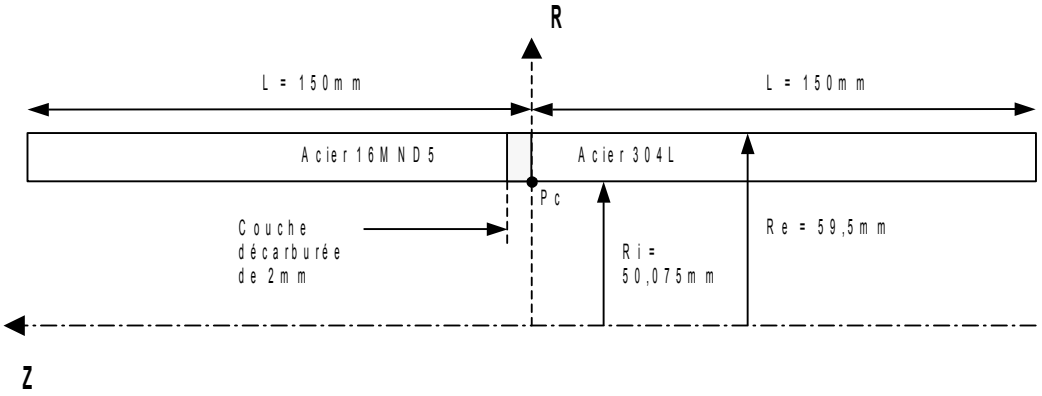



**Figure 1. : Géométrie des tubes**

Dimension des tubes :

- Rayon intérieur : $50{,}075\,mm$
- Rayon extérieur : $59{,}5\,mm$
- Epaisseur : $9{,}425\,mm$
- Longueur totale 2L : $300\,mm$

## 1.2 Propriétés des matériaux

Les tubes soudés sont en acier 16MND5 d'un coté et en acier 304L de l'autre. Les propriétés mécaniques varient avec la température pour ces deux matériaux. Elles sont données, ainsi que les propriétés métallurgiques pour le 16MND5 dans la référence [bib1].

Une décarburation est observée à l'interface 16MND5-304L, ce qui se traduit expérimentalement par une chute de dureté Vickers de $250\,HV$ à $2\text{mm}$ de l'interface, jusqu'à $130\,HV$ sur l'interface.

## 1.3 Conditions aux limites et chargements

**Calcul thermique** : Refroidissement homogène continu de $875\,°C$ à $20\,°C$

**Calcul métallurgique** :
Transformation de l'austénite en ferrite dans le 16MND5 entre $758{,}5\,°C$ et $650{,}5\,°C$
Pas de transformation dans l'inox.

**Calcul mécanique** :
1) Point $PC$ bloqué dans la direction $Z$
2) Chargement en température

## 1.4 Conditions initiales

$T(r,z)=875\,°C$.

L'acier 16MND5 est entièrement austénitique à l'état initial soit : $Zf=0$, $Zp=0$, $Zb=0$ et $Zm=0$.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 2 Solution de référence

Il n'existe pas de solution analytique. Cependant des résultats expérimentaux sont disponibles (mesures de contraintes résiduelles en peau externe par diffraction de rayons X [bib1]).

## 2.1 Références bibliographiques

[1] A. BEBEY-FOURCOT, F. WAECKEL, Note EDF DER HI-74/97/028/0. Simulation numérique de joints hétérogènes soudés par friction (19 janvier 1998).



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 3 Modélisation A

## 3.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation axisymétrique

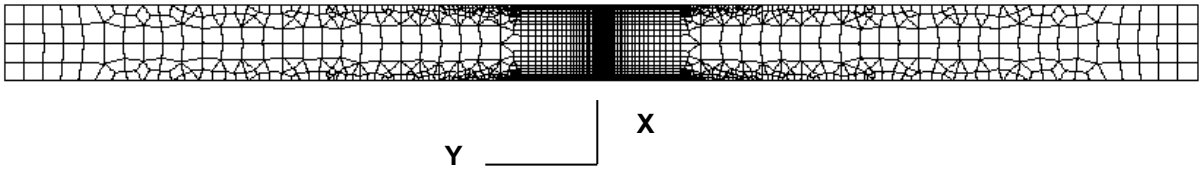



Figure 4.1-a : Maillage global du tube

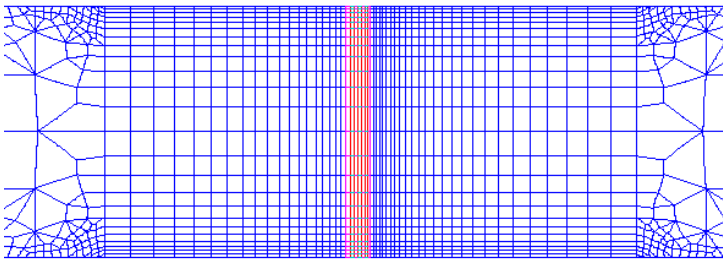


Figure 4.1-b : Maillage grossi de la jonction 16MND5-304L et détail de l'interface et de la zone décarburée

La densité élémentaire de nœuds à proximité de l'interface est de $0,2\,mm$ pour permettre une bonne représentation des pics de contraintes attendus à cet endroit.

## 3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 6513
Nombre de mailles et types : 2616 dont 1908 QUAD8, 204 TRIA6, 504 SEG3

## 3.3 Remarques

- Ecrouissage isotrope linéaire pour l'acier 16MND5 (toute phase confondue) : la limite d'élasticité définie en fonction de la température est la limite d'élasticité à $0\%$ de déformation plastique. La pente d'écrouissage linéaire (en fonction de la température) est la pente à $0,5\%$ de déformation plastique.
- Ecrouissage isotrope non linéaire pour l'acier 304L
- La chute de la dureté dans la zone décarburée est prise en compte dans la modélisation par une diminution de la limite d'élasticité de l'acier dans cette zone. Pour évaluer la diminution de la limite d'élasticité d'après les mesures de dureté, on postule que pour une même structure métallurgique, le rapport Rm/SY reste constant, et que la valeur de Rm vaut le tiers de la dureté mesurée [bib1].



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- 26 pas de calcul de 0 à $154000\ s$ (1 pas de $9000\ s$ ; 4 pas de $36000\ s$ ; 10 pas de $54000\ s$ ; 7 pas de $118000\ s$ ; 4 de $154000\text{s}$ ).

## 3.4 Grandeurs testées et résultats

| Noeud | Localisation | Type de valeur | Aster | Mesure | Ecart (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| N674 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = + 44,515 mm | SIYY | 64,245 | 60,23 | 6,7 |
| N882 | Peau externe (X = 59,5mm) Y = + 30,493 mm | SIYY | 113,819 | 99,58 | 14,3 |
| N1316 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = + 20 mm | SIYY | 141,806 | 119,07 | 19,1 |
| N1834 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = + 9,657 mm | SIYY | 169,971 | 109,07 | 55,8 |
| N2278 | Peau externe(X = 59,5mm) Y = + 4,739 mm | SIYY | 213,459 | 153,34 | 39,2 |
| N2719 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = + 1,872 mm | SIYY | 258,022 | 188,54 | 13,6 |
| N3755 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 1,872 mm | SIYY | -230,442 | -181,92 | 26,7 |
| N4199 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 4,739 mm | SIYY | -209,876 | -220,18 | -4,7 |
| N4525 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 9,657 mm | SIYY | -180,092 | -174,06 | 3,5 |
| N4742 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 20 mm | SIYY | -166,688 | -190,52 | -12,5 |
| N5458 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 30,493 mm | SIYY | -140,201 | -145,52 | -3,7 |
| N5759 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 44,515 mm | SIYY | -81,641 | -87,00 | -6,2 |

| Noeud | Localisation | Type de valeur | Aster | Mesure | Ecart (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| N674 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = + 44,515 mm | SIZZ | 30,937 | 40,35 | -23,3 |
| N882 | Peau externe (X = 59,5mm) Y = + 30,493 mm | SIZZ | 23,686 | 61,39 | -61,4 |
| N1316 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = + 20 mm | SIZZ | -9,541 | 48,03 | -119,8 |
| N1834 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = + 9,657 mm | SIZZ | -70,264 | 7,78 | -1003 |
| N2278 | Peau externe(X = 59,5mm) Y = + 4,739 mm | SIZZ | -104,430 | -64,98 | 60,71 |
| N2719 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = + 1,872 mm | SIZZ | -75,962 | -98,83 | -23,1 |
| N3755 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 1,872 mm | SIZZ | 15,857 | 29,26 | -45,8 |
| N4199 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 4,739 mm | SIZZ | 26,372 | -26,56 | -199,3 |
| N4525 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 9,657 mm | SIZZ | 40,284 | 53,15 | -24,2 |
| N4742 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 20 mm | SIZZ | 9,290 | 39,47 | -76,5 |
| N5458 | Peau externe (X = 59,5mm ) Y = - 30,493 mm | SIZZ | -23,355 | -16,58 | 40,9 |
| N5759 | Peau externe (X = 59,5mm ) | SIZZ | -34,912 | -40,32 | -13,4 |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Y = - 44,515 mm

# 4 Synthèse des résultats

Les valeurs de contraintes calculées sont en bon accord avec les profils de contraintes mesurés, qui comportent eux même une incertitude assez élevée (cf. courbes ci-dessous).

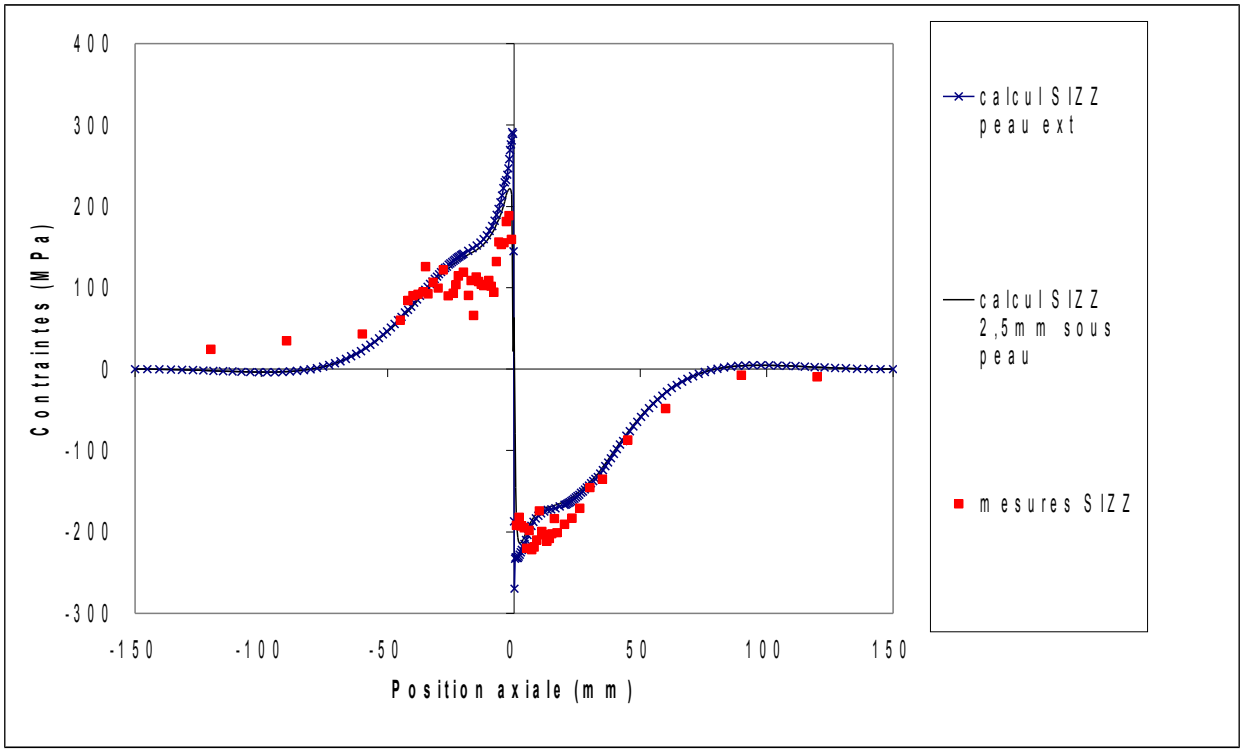
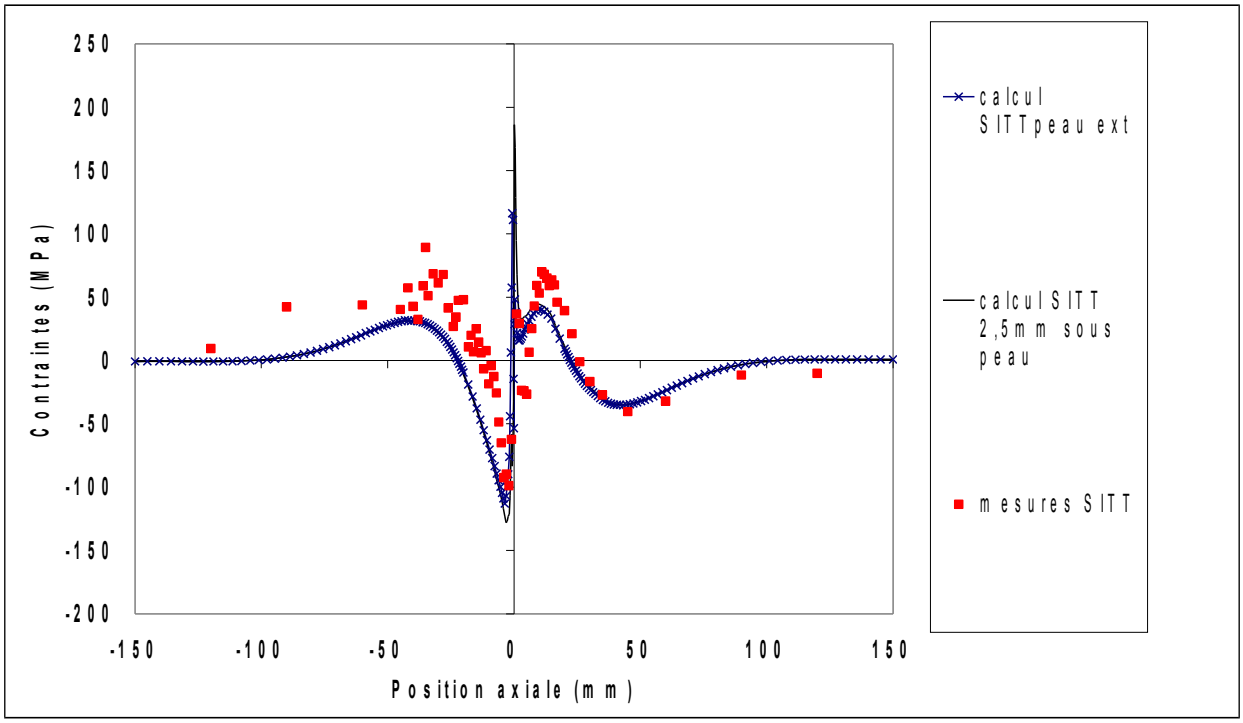



**Figure 4.1 : Profil des contraintes longitudinales calculées et mesurées en peau externe**






Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

**Figure 4.2 : Profil des contraintes circonférentielles calculées et mesurées en peau externe**



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)