# MTLP103 - Trempe d'un barreau cylindrique en acier 16MND5

**Résumé :**

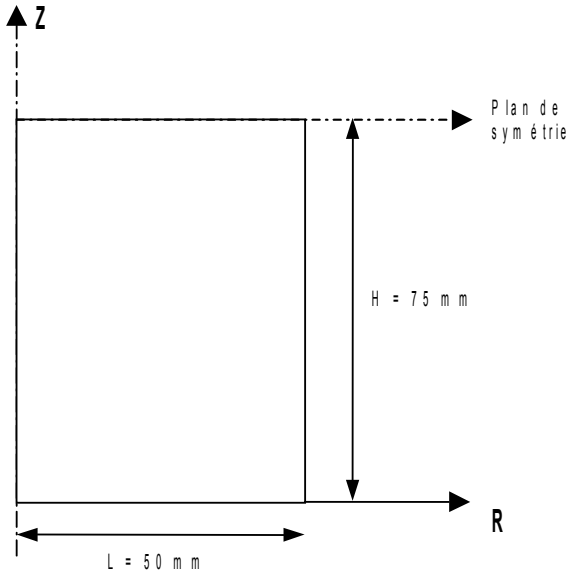
Ce cas-test constitue une validation des modèles de transformations métallurgiques au refroidissement dans les aciers. Il s'agit de la trempe d'un barreau cylindrique en acier 16MND5, pour lequel des données expérimentales de mesures de duretés finales sont disponibles. Le calcul de thermique non linéaire de la phase de refroidissement est tout d'abord effectué à partir de l'identification d'un coefficient d'échange thermique (lorsque le barreau est dans l'air), puis d'une densité de flux surfacique fonction du temps sur la frontière extérieure (lors de la trempe). Ces conditions aux limites ont été identifiées grâce à des mesures de températures par thermocouples effectuées lors de l'essai. Le calcul de l'évolution métallurgique est ensuite effectué en post-traitement du calcul thermique. Les valeurs de duretés finales calculées (dépendantes des proportions de phases formées) sont comparées aux mesures effectuées en différents points de la section du barreau.



Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 1 Problème de référence

## 1.1 Géométrie




Barreau cylindrique :

Hauteur totale : $2\mathrm{H}=150\,mm$
Diamètre : $2\mathrm{L}=100\mathrm{mm}$

## 1.2 Propriétés du matériau

Le barreau est en acier 16MND5. Les propriétés thermiques (conductivité et enthalpie du matériau) varient avec la température et sont données dans [bib1].

Coefficients pour la métallurgie :

TRC « standard »

$AR3=830\,°C \quad , \quad alpha=-0.0249$
$MS0=415\,°C \quad , \quad AC1=724\,°C \quad , \quad AC3=846\,°C$
$\tau_1=0.034 \quad , \quad \tau_3=0.034$

Microdureté des différentes phases métallurgiques :

pour la ferrite $d=184.\,HV$
pour la perlite $d=184.\,HV$
pour la bainite $d=309.\,HV$
pour la martensite $d=450.\,HV$
pour l'austénite $d=100.\,HV$



Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

## 1.3 Conditions aux limites et chargements

Coefficient d'échange thermique avec l'extérieur pendant 14 sec. (avant la trempe) calé sur les mesures de températures par thermocouples :

| Temps $(s)$ | $H(W.m^{-2}.°C^{-1})$ |
|---|---|
| 0. | 100. |
| 13 | 100. |
| 14. | 10000. |

$T_\infty = 25\,°C$

Densité surfacique de flux de chaleur fonction de la température $T$ sur les frontières (pendant la trempe) calée sur les mesures de températures :

| $T(°C)$ | 25. | 50. | 100. | 150. | 200. | 250 | 300. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Flux $(W.m-2)$ | 0. E+06 | -0.03 E+06 | -0.08 E+06 | -0.16 E+06 | -0.71 E+06 | -1.51 E+06 | -1.99 E+06 |
| $T(°C)$ | | 350. | 400. | 450. | 500. | 550. | 600. |
| Flux $(W.m-2)$ | | -2.53 E+06 | -3.34 E+06 | -3.78 E+06 | -6. E+06 | -7. E+06 | -7.9 E+06 |

## 1.4 Conditions initiales

$T(r,z) = 906\,°C.$

Barreau entièrement austénitisé à l'état initial soit $Zf(r,z)=0.$ , $Zp(r,z)=0.$ , $Zb(r,z)=0.$ et $Zm(r,z)=0.$

# 2 Solution de référence

Il n'existe pas de solutions analytiques. Cependant des résultats expérimentaux sont disponibles (mesures de dureté).

## 2.1 Résultats de référence

Calcul thermique : Température aux points T0, T9, T10 aux instant $t = 13\text{s}, 20\text{s}, 30\text{s},$

Calcul métallurgique : Profils de dureté à $t = 240\text{s}$ pour les segments H5, H10, H15, H25, H35, H38, H45, H55, H65, et H75.

## 2.2 Références bibliographiques

[1] A. BEBEY-FOURCOT, F. WAECKEL, Note EDF DER HI-74/98/003/0. Validation des modèles métallurgiques du Code_Aster via la simulation de deux trempes (10 juillet 1998).



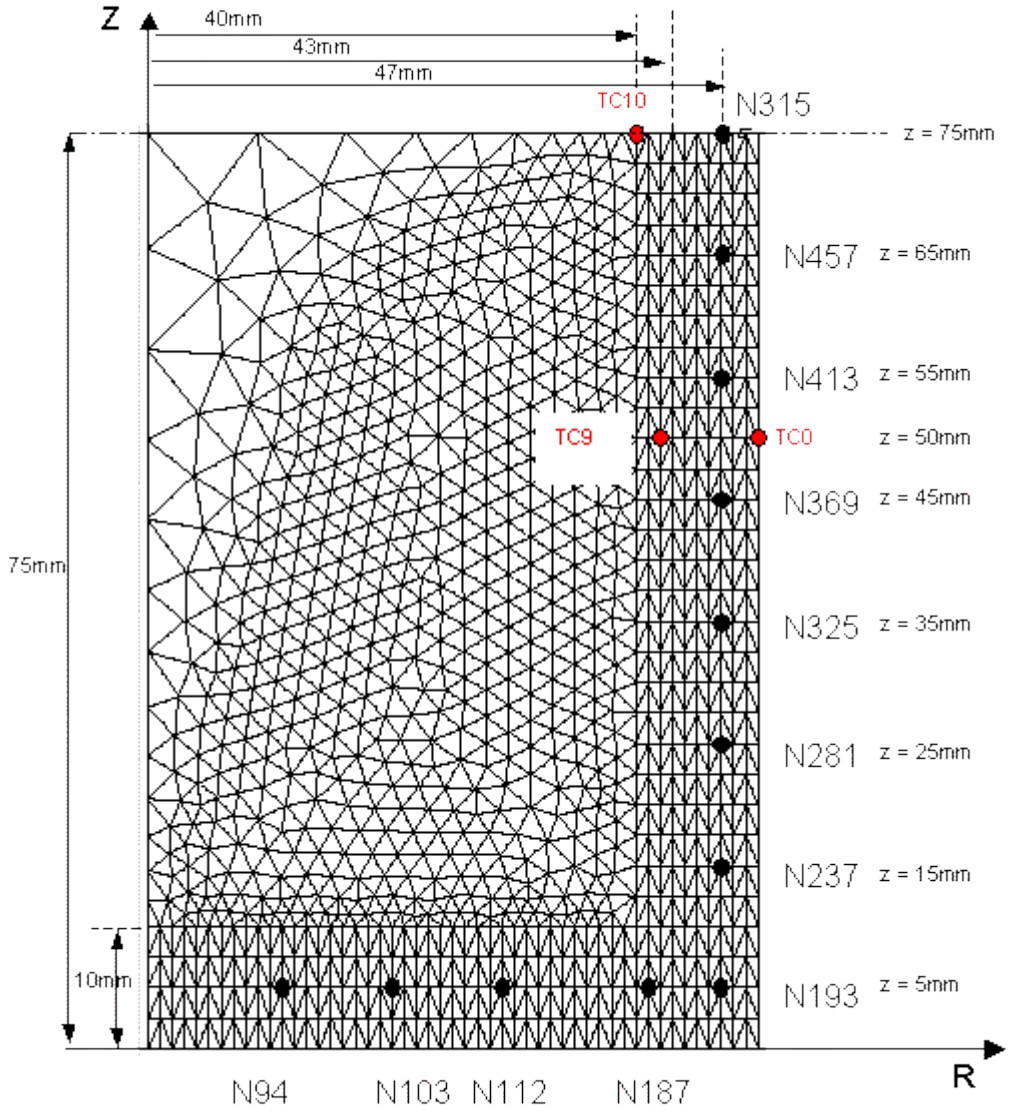
Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 3 Modélisation A

## 3.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation axisymétrique

Par raison de symétrie, on ne maille qu'une demi-section.




Conditions aux limites : Sur z = 75 mm

Adiabatique (symétrie : flux nul)

$$\phi = 0$$

sur x = 50mm et z = 0mm

De 0 à 14s :

$$-\lambda \cdot \partial T / \partial n = h(T(r,z,t) - T_{\infty})$$

de 14s à 240s :

$$-\lambda \cdot \partial T / \partial n = F(T(r,z,t))$$



Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

## 3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 4316
Nombre de mailles et types : QUAD8, SEG3

## 3.3 Remarques

105 pas de calcul de 0 à 240 s (60 pas de 1 s, puis 45 pas de 4 s).

## 3.4 Grandeurs testées et résultats

Champs TEMP et DURT_ELNO :

TPN : Température au nœud
HV : dureté de Vickers

| Identification | Grandeur | *Aster* |
|---|---|---|
| T = 13s, Nœud TC0 | TPN | 871,348 |
| T = 20s, Nœud TC0 | TPN | 291,800 |
| T = 30s, Nœud TC0 | TPN | 226,905 |
| T = 13s, Nœud TC9 | TPN | 890,128 |
| T = 20s, Nœud TC9 | TPN | 608,298 |
| T = 30s, Nœud TC9 | TPN | 432,164 |
| T = 13s, Nœud TC10 | TPN | 895,338 |
| T = 20s, Nœud TC10 | TPN | 717,098 |
| T = 30s, Nœud TC10 | TPN | 520,166 |

| Position | Nœud | maille | Grandeurs | *Aster* | mesures | Ecart (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Z (mm) = 5** | | | | | | |
| R (mm) = 11 | N94 | M101 | HV | 361,145 | 398 | -9,3 (relatif) |
| R (mm) = 20 | N103 | M120 | HV | 365,324 | 404 | -9,6 (relatif) |
| R (mm) = 29 | N112 | M137 | HV | 371,928 | 408 | -8,8 (relatif) |
| R (mm) = 41 | N187 | M341 | HV | 408,118 | 413 | -1,2 (relatif) |
| R (mm) = 47 | N193 | M353 | HV | 432,139 | 427 | 1,2 (relatif) |

| Position | Nœud | maille | Grandeurs | *Aster* | mesure | Ecart (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| H =15 ;R=41 | N231 | M421 | HV | 374,327 | 381 | -1,8 |
| H =15 ;R=47 | N237 | M433 | HV | 400,68 | 401 | -0,1 |
| H=25 ;R=41 | N275 | M501 | HV | 359,687 | 355 | 1,3 |
| H=25 ;R=47 | N281 | M513 | HV | 392,703 | 396 | -0,8 |
| H=35 ;R=41 | N319 | M581 | HV | 346,007 | 345 | 0,3 |
| H=35 ;R=47 | N325 | M593 | HV | 391,844 | 425 | -7,8 |
| H=45 ;R=41 | N363 | M661 | HV | 344,908 | 335 | 3,0 |
| H=45 ;R=47 | N369 | M673 | HV | 391,77 | 425 | -7,8 |
| H=55 ;R=41 | N407 | M741 | HV | 345,728 | 370 | -6,6 |
| H=55 ;R=47 | N413 | M753 | HV | 391,836 | 430 | -8,9 |
| H=65 ; R=41 | N451 | M821 | HV | 346,752 | 350 | -0,9 |
| H=65 ; R=47 | N457 | M833 | HV | 391,863 | 410 | -4,4 |
| H=75 ; R=41 | N3148 | M901 | HV | 346,871 | 330 | 5,1 |
| H=75 ; R=47 | N3154 | M913 | HV | 391,842 | 425 | -7,8 |

| moyenne (H=35 ; H=75) | Grandeurs | aster | mesure | Ecart (%) |
|---|---|---|---|---|
| R=41 | HV | 346,0532 | 346 | 0,0 |
| R=47 | HV | 391,831 | 423 | 7,4 |



Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 4 Synthèse des résultats

La comparaison calcul-mesures en termes de dureté est satisfaisante (moins de 10% d'écart relatif). Ce cas-test permet donc de valider le modèle de comportement au refroidissement de l'acier.



Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)