Notice d'utilisation pour des calculs thermo-métallo-mécaniques sur des aciers

Résumé

L'objectif de cette note est de donner les informations nécessaires pour qu'un utilisateur puisse réaliser facilement un calcul thermo-métallo-mécanique dans *Code_Aster*. Ce type de calcul concerne les aciers qui subissent au cours d'un chauffage ou d'un refroidissement des transformations structurales.

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

Table des matières

1Les grandes lignes du calcul thermo-métallo-mécanique....3
2Que faire pour réaliser un calcul thermo-métallo-mécanique ?....3
2.1Étape 1 : quels documents lire – résumé....3
2.1.1Pour la partie thermique....3
2.1.2Pour la partie modèle de comportement métallurgique....3
2.1.3Pour la partie modèle de comportement mécanique avec effets des transformations métallurgiques....6
2.2Étape 2 : construction du fichier de commande....9
2.2.1Parties thermique et métallurgique....9
2.2.2Partie mécanique....9
2.2.3Exemple de fichier de commande....10
3Bibliographie....16

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

1 Les grandes lignes du calcul thermo-métallo-mécanique

Dans *Code_Aster*, les calculs thermique, métallurgique et mécanique sont découplés. Les étapes successives d'un calcul complet sont les suivantes :

1) On réalise un calcul thermique qui permet d'obtenir le champ de température en chaque nœud.

2) On réalise en post-traitement du calcul thermique, le calcul métallurgique qui permet d'obtenir la proportion des différentes phases métallurgiques en chaque nœud et éventuellement la dureté associée.
Dans *Code_Aster*, on peut traiter deux types de matériau différents, qui subissent des transformations métallurgiques : les aciers ou le ZIRCALOY. On ne s'intéresse ici qu'aux matériaux de type acier.
Pour un acier, on peut prendre en compte cinq phases métallurgiques différentes : la ferrite, la perlite, la bainite, la martensite, dites phase α, et l'austénite, dite phase γ.

3) À partir du champ de température et des phases métallurgiques, on réalise le calcul mécanique en choisissant un modèle de comportement qui prend en compte les différents effets possibles des transformations métallurgiques. On obtient ainsi les champs de contraintes, de déformations et de variables internes en chaque point de Gauss.

2 Que faire pour réaliser un calcul thermo-métallo-mécanique ?

2.1 Étape 1 : quels documents lire – résumé

2.1.1 Pour la partie thermique

Le document [R5.02.02] contient les informations nécessaires à la compréhension d'un calcul thermique non linéaire.

Dans *Code_Aster*, pour un calcul non linéaire, on traite la diffusion de la chaleur avec une formulation enthalpique. On peut fournir soit la conductivité et l'enthalpie en fonction de la température, soit la conductivité et la chaleur massique ρC_p en fonction de la température.

2.1.2 Pour la partie modèle de comportement métallurgique

Le document [R4.04.01] du *Code_Aster* décrit les différents modèles métallurgiques.

Résumé succinct :

Lorsqu'on chauffe un matériau, les phases α se transforment en phase γ. Quand on refroidit le matériau, l'austénite se transforme, selon la vitesse de refroidissement, en ferrite et/ou perlite et/ou bainite et/ou martensite. Il faut donc définir pour le chauffage la cinétique de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ et pour le refroidissement la nature et la cinétique des transformations possibles $\gamma \rightarrow \alpha$.

Cinétique de transformation au chauffage :

La loi d'évolution de l'austénite est donnée par l'équation :

$$\dot{Z}_\gamma = \frac{Z_{eq} - Z_\gamma}{\tau}$$

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

$$\text{avec } Z_{eq}=\begin{cases}0 & \text{si} \quad T\leq Ac1\\ \dfrac{T-Ac1}{Ac3-Ac1} & \text{si} \quad Ac1\leq T\leq Ac3\\ 1 & \text{si} \quad T\geq Ac3\end{cases}$$

$$\text{et } \tau=\begin{cases}\tau_1 & \text{si} \quad T\leq Ac1\\ \tau_1+\dfrac{T-Ac1}{Ac3-Ac1}(\tau_3-\tau_1) & \text{si} \quad Ac1\leq T\leq Ac3\\ \tau_3 & \text{si} \quad T\geq Ac3\end{cases}$$

où Z_γ est la proportion de phase γ, $Ac1$ la température quasi-statique de début de transformation des phases, $Ac3$ α la température quasi-statique de fin de transformation des phases α et τ_1, τ_3 deux coefficients du matériau. Z_{eq} correspond à l'évolution du taux d'austénite transformée lors d'évolutions quasi-statiques. Les températures de début $Ac1$ et de fin $Ac3$ de transformation austénitique et les paramètres τ_1 et τ_3 peuvent être identifiés à partir de données expérimentales fournissant pour des vitesses de chauffage différentes, la proportion d'austénite formée en fonction de la température. On trouvera dans [bib1] des précisions sur la méthode d'identification des coefficients.

Exemple :

Pour un acier 16MND5, les coefficients valent $Ac1=716\,°C$, $Ac3=802\,°C$, $\tau_1=12\text{s}$ *et* $\tau_3=0.5\text{s}$.

Cinétique de transformation au refroidissement :

Pour les transformations ferritiques, perlitiques et bainitiques, la cinétique est donnée par la relation suivante :

$$\dot{Z}=f(T,\dot{T},Z,M_s,d^c)\frac{(T-M_s)^+}{(T-M_s)} \text{ avec } Z=\{Z_F,Z_P,Z_B\}$$

où M_s représente la température de début de transformation martensitique, d^c la taille de grain austénitique et $(X)^+$ la partie positive de X. Pour les fonctions d'évolution f, on n'impose pas de formes particulières et l'identification de f se résume à la définition de diagrammes de type TRC (transformation en Refroidissement Continu). Ce diagramme permet de définir les évolutions de ferrite, perlite et bainite associées à une histoire thermique au refroidissement et à des conditions d'austénitisation données (pour une taille de grain d^c donnée).

Pour la transformation martensitique, on utilise la cinétique de Koistinen-Marburger donnée par l'équation :

$$Z_M=(1-Z_F-Z_P-Z_B)\left[1-\exp(\alpha(M_s-T^+))\right]$$

$$M_s=\begin{cases}M_{s0} & \text{si} \quad Z_F+Z_P+Z_B\leq seuil\\ M_{s0}+Akm(Z_F+Z_P+Z_B)+Bkm & \text{si} \quad Z_F+Z_P+Z_B>seuil\end{cases}$$

où M_{s0} représente la température de début de transformation martensitique lorsque celle ci est totale et α, Akm, Bkm et $seuil$ sont des paramètres matériaux.

Dans le cas le plus simple, on peut prendre la température M_s constante et donc égale à M_{s0}. Pour un acier 16MND6, M_{s0} vaut $365\,°C$.

Remarque :

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

Les diagrammes TRC sont relatifs à des conditions d'austénitisation données auxquelles correspondent une valeur de taille de grain d . Cette taille de grain résulte de l'histoire thermique subie au chauffage et n'évolue plus au refroidissement. Dans Code_Aster, il est possible de calculer à partir de l'histoire thermique au chauffage, l'évolution de la taille de grain et de tenir compte de son effet sur le comportement métallurgique au refroidissement (voir cas test de référence hsnv126a.comm, hsnv126b.comm et mtlp102a.comm pour l'utilisation).

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

Remarque :

Il est possible dans Code_Aster de calculer la dureté Hv du mélange multiphasé donnée par la relation $Hv=\sum_{k=1}^{5} Z_k Hv_k$ où Hv_k est la dureté associée à la phase k et renseignée sous l'opérateur DEFI_MATERIAU sous le mot clé 'DURT_META' . La dureté du mélange multiphasé est obtenue par l'opérateur CALC_META avec l'option 'DURT_ELNO' (dureté aux nœuds par élément).

2.1.3 Pour la partie modèle de comportement mécanique avec effets des transformations métallurgiques

Le document de référence de *Code_Aster* est la note [R4.04.02].

Plusieurs modèles de comportement sont disponibles dans le code. Ils permettent de modéliser les différents phénomènes suivants : comportement plastique ou comportement visqueux, écrouissage isotrope linéaire ou non linéaire ou écrouissage cinématique linéaire, plasticité de transformation, restauration d'écrouissage d'origine métallurgique, restauration d'écrouissage d'origine visqueuse. On peut réaliser un calcul en petites déformations mais également en grandes déformations (attention les grandes déformations pour un modèle avec écrouissage cinématique ne sont pas activées). Pour une compréhension sur l'aspect grandes déformations, lire les documents de référence [R5.03.21] (grandes déformations sans effet métallurgique) et [R4.04.03] (grandes déformations avec effets métallurgiques).

Résumé succinct :

Les effets des transformations structurales sur le comportement mécanique sont de 4 types :

- les caractéristiques mécaniques du matériau qui subit des transformations sont modifiées. En particulier, les caractéristiques plastiques (limites d'élasticité notamment) et le coefficient de dilatation thermique sont fortement affectés. Pour la limite d'élasticité du point multiphasé, on utilise une loi des mélanges non-linéaire donnée par :

$$\sigma_y=\left[1-g\left(\sum_{i=1}^{4} Z_i\right)\right]\sigma_{y\gamma}+g\left(\sum_{i=1}^{4} Z_i\right)\sigma_{y\alpha},\ \sigma_{ya}=\frac{\sum_{i=1}^{4} Z_i\sigma_{y\alpha i}}{\sum_{i=1}^{4} Z_i}$$

  où Z_i est la proportion de chaque phase α et g une fonction des Z_i .

- l'expansion ou la contraction volumique qui accompagne les transformations structurales se traduit par une déformation sphérique « de transformation » qui se superpose à la déformation thermique. En général, on regroupe cet effet avec celui dû à la modification du coefficient de dilatation thermique. La déformation thermique est donnée par :

$$\varepsilon^{th}=Z_\gamma\left[\alpha_\gamma(T-T_{ref})-(1-Z_\gamma^r)\Delta\varepsilon_{f\gamma}^{T_{ref}}\right]+\sum_{i=1}^{4} Z_i\left[\alpha_f(T-T_{ref})+Z_\gamma^r\Delta\varepsilon_{f\gamma}^{T_{ref}}\right]$$

  où α_γ et α_f sont les coefficients de dilatation des phases austénitiques et ferritiques, respectivement. $\Delta\varepsilon_{f\gamma}^{T_{ref}}$ traduit la différence de compacité entre les deux phases à la température de référence. On a $Z_\gamma^r=1$ lorsque la phase de référence est la phase austénitique et $Z_\gamma^r=0$ lorsque la phase de référence est la phase ferritique.

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

- une transformation se déroulant sous contraintes peut donner naissance à une déformation irréversible et ce, même pour des niveaux de contraintes très inférieurs à la limite d'élasticité du matériau. On appelle ce phénomène la plasticité de transformation. En petites déformations, ce terme supplémentaire apparaît dans l'expression de la déformation totale. La loi d'évolution de la déformation qui accompagne ce phénomène s'écrit :

$$\dot{\varepsilon}^{pt}=\frac{3}{2}\tilde{\sigma}\sum_{i=1}^{4}K_i F'_i(Z_\gamma)\cdot\langle\dot{Z}_i\rangle$$

où $\tilde{\sigma}$ est le déviateur du tenseur des contraintes, $\langle X\rangle$ la partie positive de X, K_i et F_i, des coefficients des 4 phases ferritiques. On considère que ce phénomène n'existe pas lors de transformations austénitiques.

- enfin, on peut avoir lors de la transformation un phénomène de restauration d'écrouissage : l'écrouissage de la phase mère n'est pas (ou pas totalement) transmis aux phases nouvellement créées. Les phases nouvellement créées peuvent soit naître avec un état d'écrouissage vierge, soit n'hériter que d'une partie de l'écrouissage de la phase mère ou soit hériter de la totalité de l'écrouissage de la phase mère.
  Dans le cas d'un écrouissage isotrope, la déformation plastique p n'est plus caractéristique de l'état de l'écrouissage et il faut définir d'autres variables pour chaque phase, notée r_k. L'écrouissage isotrope s'écrit alors :

$$R=\left(1-\bar{f}(Z)\right)R_\gamma+\frac{\bar{f}(Z)}{Z}\sum_{i=1}^{4}Z_i\cdot R_i,\ Z=\sum_{i=1}^{4}Z_i$$

où R_k est la variable d'écrouissage de la phase k qui peut être linéaire ou non linéaire par rapport à r_k et $\bar{f}(Z)$ une fonction dépendant de Z telle que $\bar{f}(Z)\in[0,1]$.
Les lois d'évolution des variables r_i sont données par :

$$\dot{r}_\gamma=\dot{p}+\frac{\sum_{i=1}^{4}\langle-\dot{Z}_i\rangle(\theta_{i\gamma}r_i-r_\gamma)}{Z_\gamma}-\underbrace{(Cr_{moy})^m}_{\text{uniquement en viscosité}}\quad\text{si}\quad Z_\gamma>0$$

$$\dot{r}_i=\dot{p}+\frac{\langle Z_i\rangle(\theta_{\gamma i}r_\gamma-r_i)}{Z_\gamma}-\underbrace{(Cr_{moy})^m}_{\text{uniquement en viscosité}}\quad\text{si}\quad Z_i>0$$

$$r_{moy}=\sum_{k=1}^{5}Z_k r_k$$
$$C=\sum_{k=1}^{5}Z_k C_k$$
$$m=\sum_{k=1}^{5}Z_k m_k$$

C_k et m_k sont les coefficients de restauration visqueuse associés à la phase k, $\theta_{i\gamma}$ et $\theta_{\gamma i}$ caractérisent la proportion d'écrouissage transmis lors de la transformation $\alpha\to\gamma$ et de la transformation $\gamma\to\alpha$, respectivement. La mémoire est inexistante si $\theta=0$, complète si $\theta=1$.

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

De manière équivalente, on écrit dans le cas d'un écrouissage cinématique :

$$X=(1-\bar{f}(Z))+\frac{\bar{f}(Z)}{Z}\sum_{i=1}^{4} Z_i \cdot X_i,\ Z=\sum_{i=1}^{4} Z_i$$

où X_k est la variable d'écrouissage cinématique de la phase k qui est linéaire par rapport à la variable α_k :

$$X_k=\frac{2}{3}H_k\alpha_k$$

Les lois d'évolution des variables cinématiques α_k sont données par :

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}_\gamma=\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p+\frac{\sum_{i=1}^{4}\langle \dot{Z}_i\rangle(\theta_{i\gamma}\boldsymbol{\alpha}_i-\boldsymbol{\alpha}_\gamma)}{Z_\gamma}+\underbrace{\frac{3}{2}(C\alpha_{eq})^m\frac{\boldsymbol{\alpha}}{\alpha_{eq}}}_{\text{uniquement en viscosité}} \quad \text{si} \quad Z_\gamma>0$$

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}_i=\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p+\frac{\langle \dot{Z}_i\rangle(\theta_{\gamma i}\boldsymbol{\alpha}_\gamma-\boldsymbol{\alpha}_i)}{Z_i}+\underbrace{\frac{3}{2}(C\alpha_{eq})^m\frac{\boldsymbol{\alpha}}{\alpha_{eq}}}_{\text{uniquement en viscosité}} \quad \text{si} \quad Z_i>0$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p=\frac{3}{2}\dot{p}\frac{(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}-\boldsymbol{X})}{(\sigma-X)_{eq}}$$

où H_k sont les pentes d'écrouissage associées à chaque phase k.

Pour un modèle de plasticité, le multiplicateur plastique est obtenu en écrivant la condition de cohérence $\dot{f}=0$ et on a :

$$\dot{p}\geq 0,\ f\leq 0 \text{ et } \dot{p}\,f=0$$

Dans le cas visqueux, $\dot{p}$ s'écrit :

$$\dot{p}=\left(\frac{\langle f\rangle}{\eta}\right)^n$$

où f est le seuil de plasticité donné par :

$f=\sigma_{eq}-R-\sigma_y$ dans le cas d'un écrouissage isotrope
$f=(\sigma-X)_{eq}-\sigma_y$ dans le cas d'un écrouissage cinématique

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

2.2 Étape 2 : construction du fichier de commande

2.2.1 Parties thermique et métallurgique

1) **Définition du diagramme TRC** : voir la commande DEFI_TRC dans le document [U4.43.04]. Cette commande est composée de trois parties : une partie où on définit les évolutions de ferrite, perlite et bainite associées à un ensemble d'histoire thermique au refroidissement et des conditions d'austénitisation données (taille de grain), une seconde partie qui définit les paramètres liés à l'évolution de la température Ms et une troisième partie qui définit l'influence de la taille de grain sur les transformations métallurgiques au refroidissement par le diagramme TRC. Cette dernière partie n'est pas obligatoire.

2) **Définition des phases métallurgiques initiales** : voir la commande CREA_CHAMP dans le document [U4.72.04]. Cette commande permet de définir les phases métallurgiques initiales présentes dans le matériau.

3) **Définition du matériau** : voir la commande DEFI_MATERIAU (document [U4.43.01]). Pour la partie thermique, il faut renseigner le mot clé THER_NL qui contient les valeurs de la conductivité thermique et celles de l'enthalpie, fonctions éventuellement de la température. Pour la partie métallurgique, il faut renseigner le mot clé META_ACIER dont la structure est la suivante :

META_ACIER :(
- ♦ TRC : nom du diagramme TRC définit en 1)
- ♦ AR3 : température quasi-statique de début de décomposition de l'austénite au refroidissement.
- ♦ ALPHA : cœfficient a de la loi de Koïstinen-Marbürger
- ♦ MS0 : température de début de transformation martensitique lorsque celle-ci est totale.
- ♦ AC1 : température quasi-statique de début de transformation en austénite au chauffage.
- ♦ AC3 : température quasi-statique de fin de transformation en austénite.
- ♦ TAUX_1 : paramètre intervenant dans la cinétique au chauffage.
- ♦ TAUX_3 : paramètre intervenant dans la cinétique au chauffage.
- ◊ LAMBDA : paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain.
- ◊ QSR_K : paramètre énergie d'activation intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain.
- ◊ D10 : paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain.
- ◊ WSR_K : paramètre énergie d'activation intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain.

4) **Réalisation du calcul thermique** : voir documentation d'Utilisation et de Référence des opérateurs thermiques : THER_LINEAIRE et THER_NON_LINE.

5) **Réalisation du calcul métallurgique** : voir la commande CALC_META (document [U4.85.01]). Cette commande permet d'obtenir à partir du calcul thermique précédent, les proportions des différentes phases métallurgiques. C'est à ce niveau qu'on renseigne l'état métallurgique initial (commande CREA_CHAMP).

2.2.2 Partie mécanique

1) **Définition du matériau** : voir la commande DEFI_MATERIAU (document [U4.43.01]). Selon les phénomènes que l'on souhaite modéliser, plusieurs mots clés doivent être renseignés.
Dans tous les cas, l'utilisateur doit compléter les mots clés :

   - ELAS_META(_FO) qui contient les informations sur les caractéristiques élastiques, de dilatations thermiques et de limites d'élasticité,
   - META_ECRO_LINE pour définir un écrouissage isotrope ou cinématique linéaire et META_TRACTION pour définir un écrouissage isotrope non linéaire.

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

Les autres phénomènes possibles (non obligatoires) sont les suivants :

- viscoplasticité + restauration d'origine visqueuse : mot clé facteur META_VISC(_FO)
- plasticité de transformation : mot clé facteur META_PT
- restauration d'origine métallurgique : mot clé facteur META_RE

Remarque :

_FO signifie que les coefficients peuvent éventuellement dépendre de la température.

2) **Réalisation du calcul mécanique** : commande STAT_NON_LINE (document [U4.51.03]). Sous le mot clé COMPORTEMENT, on doit préciser sous RELATION, le nom du modèle choisi parmi les 24 modèles ci-dessous et sous RELATION_KIT, le matériau 'ACIER'.

Les différents modèles sont :

```
/ 'META_P_IL'
/ 'META_P_INL'
/ 'META_P_IL_PT'
/ 'META_P_INL_PT'
/ 'META_P_IL_RE'
/ 'META_P_INL_RE'
/ 'META_P_IL_PT_RE'
/ 'META_P_INL_PT_RE'
/ 'META_P_CL'
/ 'META_P_CL_PT'
/ 'META_P_CL_RE'
/ 'META_P_CL_PT_RE'
/ 'META_V_IL'
/ 'META_V_INL'
/ 'META_V_IL_PT'
/ 'META_V_INL_PT'
/ 'META_V_IL_RE'
/ 'META_V_INL_RE'
/ 'META_V_IL_PT_RE'
/ 'META_V_INL_PT_RE'
/ 'META_V_CL'
/ 'META_V_CL_PT'
/ 'META_V_CL_RE'
/ 'META_V_CL_PT_RE'
```

Signification des lettres :

P = plasticité, V = viscoplasticité, IL = écrouissage isotrope linéaire, INL = écrouissage isotrope non linéaire, CL = écrouissage cinématique linéaire, PT = plasticité de transformation, RE = restauration d'écrouissage d'origine métallurgique.

2.2.3 Exemple de fichier de commande

L'exemple que nous présentons maintenant est celui d'un disque mince en acier 16MND5 qui est chauffé sur sa face supérieure par un faisceau laser puis refroidi à l'air ambiant. La modélisation est axisymétrique. Le chargement imposé est un flux sur une partie de la face supérieure, le reste des faces subissant des conditions de convection naturelle et de rayonnement. Initialement le disque est composé de 61% de ferrite et de 39% de bainite. Au chauffage, la ferrite et la bainite se transforme en austénite. Au refroidissement, l'austénite se transforme en bainite et martensite (il n'y a donc pas de perlite). Cette étude est présentée en détail dans le document HI-74/99/002.

On présente ci dessous le fichier de commande de cette simulation. On donne uniquement les commandes principales qui se réfèrent à un calcul métallurgique.

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

Fichier de commande
 # CALCUL SUR UN DISQUE EN ACIER 16MND5
 # I - PARTIE THERMIQUE ET METALLURGIQUE
 # I.1 - DEFINITION DU MAILLAGE
 # I.2 - DEFINITION DU MODELE

```
moth=AFFE_MODELE(
    MAILLAGE=mail,
    AFFE=_F(
        TOUT='OUI',
        PHENOMENE='THERMIQUE',
        MODELISATION='AXIS',),);
```

 # I.3 - DEFINITION DU MATERIAU
 # I.3.1 - DEFINITION DU DIAGRAMME TRC

```
TRC   = DEFI_TRC(
HIST_EXP=(
_F(VALE = (
-1.000D+00,  1.000D+01,  0.000D+00,  0.0000D+00,
 0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,  0.0000D+00,
 0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,  8.3000D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,  5.6520D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  1.000D-02,  5.6000D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  2.400D-02,  5.5062D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  7.600D-02,  5.3670D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  12.00D-02,  5.2960D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  22.70D-02,  5.1380D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  32.50D-02,  5.0155D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  41.80D-02,  4.8748D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  52.80D-02,  4.6595D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  57.60D-02,  4.5422D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  60.00D-02,  4.4531D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  69.00D-02,  4.0712D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  72.20D-02,  3.9157D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  7.500D-01,  3.6600D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  7.600D-01,  3.6080D+02, )),
_F(VALE = (
-3.400D+00,  1.000D+01,  0.000D+00,  0.0000D+00,
 0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,  0.0000D+00,
 0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,  8.3000D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,  5.6530D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  1.000D-02,  5.6000D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  5.980D-02,  5.4326D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  35.00D-02,  5.0750D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  44.00D-02,  4.9711D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  52.50D-02,  4.7641D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  65.00D-02,  4.2853D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  6.840D-01,  3.8393D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  6.800D-01,  3.8200D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  6.900D-01,  3.7670D+02,)),
_F(VALE = (
-8.000D+00,  1.000D+01,  0.000D+00,  0.000D+00,
 0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,
 0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,  8.300D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  0.000D+00,  5.570D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  1.000D-02,  5.500D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  1.800D-02,  5.4746D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  10.80D-02,  5.2087D+02,
```


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

```
 0.000D+00,  0.000D+00,  27.00D-02,  4.8780D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  37.30D-02,  4.5920D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  44.40D-02,  4.2560D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  49.70D-02,  3.7440D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  5.115D-01,  3.6400D+02,
 0.000D+00,  0.000D+00,  5.215D-01,  3.5660D+02, ))),
TEMP_MS = _F(
   SEUIL = 1.000D+00,
   AKM = 0.000D+00,
   BKM = 0.000D+00,
   TPLM = -5.000D-01 ) );
```

 # I.3.3 DEFINITION DU MATERIAU

```
ACIER=DEFI_MATERIAU(
   THER_NL=_F(
      LAMBDA= conductivite,
      BETA=enthalpie,),
   META_ACIER=_F(
      TRC=TRC,
      AR3=830.0,
      ALPHA=-0.0247,
      MS0=365.0,
      AC1=716.29,
      AC3=802.58,
      TAUX_1=12.0,
      TAUX_3=0.5,),);
```

 # I.3.4 - AFFECTATION DU MATERIAU
 # I.4 - CONDITIONS AUX LIMITES ET CHARGEMENT
 # I.5 - CALCUL THERMIQUE
 # I.5.1 - LISTE D INSTANTS
 # I.5.2 - RESOLUTION AU CHAUFFAGE ET AU REFROIDISSEMENT

```
TEMPE=THER_NON_LINE(
   MODELE=moth,
   CHAM_MATER=matc,
   EXCIT=_F(CHARGE=char_c,),
   INCREMENT=_F(
      LIST_INST=list,
      NUME_FIN=70,),
   TEMP_INIT=_F(VALE=28.0,),
   CONVERGENCE=_F(
      RESI_GLOB_RELA=5.E-05,
      ITER_GLOB_MAXI=40,),);

TEMPE=THER_NON_LINE(
   reuse =tempe,
   MODELE=moth,
   CHAM_MATER=matr,
   EXCIT=_F(CHARGE=char_r,),
   INCREMENT=_F(
      LIST_INST=list,
      NUME_INIT=70,),
   TEMP_INIT=_F(
      EVOL_THER=tempe,
      NUME_INIT=70,),
   NEWTON=_F(REAC_ITER=1,),
   CONVERGENCE=_F(
      RESI_GLOB_RELA=5. E-05,
      ITER_GLOB_MAXI=40,),);
```


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

 # I.6 - CALCUL METALLURGIQUE
 # I.6.1 - ETAT METALLURGIQUE DE DEPART
'v1' = Proportion de ferrite
'v2' = Proportion de perlite
'v3' = Proportion de bainite
'v4' = Proportion de martensite

```
PHASINIT=CREA_CHAMP(
    OPERATION='AFFE',
    TYPE_CHAM='CART_VAR2_R',
    MAILLAGE=MAIL,
    AFFE=_F(
        TOUT = 'OUI',
        NOM_CMP = ('V1', 'V2', 'V3', 'V4',),
        VALE = ( 0.61, 0.0, 0.39, 0.0,)))
```

 # I.6.2 - RESOLUTION METALLURGIQUE

```
TEMPE=CALC_META(
    reuse =TEMPE,
    MODELE=moth,
    CHAM_MATER=matr,
    RESULTAT=tempe,
    ETAT_INIT=_F(META_INIT_ELNO=phasinit,),
    COMPORTEMENT=_F(RELATION='ACIER',),);
```

 # II - CALCUL MECANIQUE AVEC UN MODELE ELASTOPLASTIQUE EN GRANDES DEFORMATIONS QUI PREND EN COMPTE LA PLASTICITE DE TRANSFORMATION ET LA RESTAURATION D ECROUISSAGE
 # II.1 DEFINITION DU MODELE

```
MOMECA=AFFE_MODELE(
    MAILLAGE=MAIL,
    AFFE=_F(
        TOUT='OUI',
        PHENOMENE='MECANIQUE',
        MODELISATION='AXIS',),);
```

 # II.2 - DEFINITION DU MATERIAU
 # II.2.1 DEFINITION DES COEFFICIENTS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE
Module d'Young E
Coefficient poisson Nu
Limites d élasticité de l'austénite Sy_a, de la ferrite Sy_f, de la bainite Sy_b et de la martensite Sy_m
fonction de plasticité multiphasée pour la limite d'élasticité mélange
Pentes d écrouissage pour l'austénite H_a et pour la ferrite, bainite et la martensite H_f
Coefficients de dilatation pour l'austénite $AlphaA$
et pour la ferrite, bainite et la martensite $AlphaF$
Fonctions de plasticité de transformation pour la bainite et martensite $FzBM$, pour la ferrite FzF
 # II.2.2 - DEFINITION DU MATERIAU

```
ACIERM=DEFI_MATERIAU(
    ELAS_META_FO=_F(
        E=E,
         NU=NU,
        F_ALPHA=ALPHAF,
        C_ALPHA=ALPHAA,
        PHASE_REFE='FROID',
        EPSF_EPSC_TREF=1.E-2,
```


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

```
          F1_SY=SY_F,
           F2_SY=SY_F,
          F3_SY=SY_B,
          F4_SY=SY_M,
          C_SY=SY_A,
          SY_MELANGE=MELANGE,),
       META_ECRO_LINE=_F(
          F1_D_SIGM_EPSI=H_F,
          F2_D_SIGM_EPSI=H_F,
          F3_D_SIGM_EPSI=H_F,
          F4_D_SIGM_EPSI=H_F,
          C_D_SIGM_EPSI=H_A,),
        META_PT=_F(
          F1_K=7.E-11,
          F2_K=7.E-11,
          F3_K=7. E-11,
          F4_K=7. E-11,
          F1_D_F_META=FZF,
          F2_D_F_META=FZF,
          F3_D_F_META=FZBM,
          F4_D_F_META=FZBM,),
        META_RE=_F(
          C_F1_THETA=0.0,
          C_F2_THETA=0.0,
          C_F3_THETA=0.0,
          C_F4_THETA=1.0,
          F1_C_THETA=0.0,
          F2_C_THETA=0.0,
          F3_C_THETA=0.0,
          F4_C_THETA=0.0,),);
```

 # II.2.3 - AFFECTATION DU MATERIAU

```
CHMATM=AFFE_MATERIAU(
    MAILLAGE=MAIL,
    AFFE=_F(
        TOUT='OUI',
        MATER=ACIERM,
        TEMP_REF=28.0,),);
```

 # II.3 - CONDITION LIMITE ET CHARGEMENT
 # ON IMPOSE LE CHAMP DE TEMPERATURE ET LA CARTE METALLURGIQUE OBTENUS EN I
 # II.4 - CALCUL MECANIQUE
 # II.4.1 - LISTE D INSTANTS
 # II.4.2 - RESOLUTION MECANIQUE

```
U=STAT_NON_LINE(
     MODELE=MOMECA,
    CHAM_MATER=CHMATM,
    EXCIT=_F(CHARGE=CHMECA,),
    COMPORTEMENT=_F(
        RELATION='META_P_IL_PT_RE',
        RELATION_KIT='ACIER',
        DEFORMATION='SIMO_MIEHE',
        TOUT='OUI',),
    INCREMENT=_F(LIST_INST=LISTM,),
    NEWTON=_F(
        REAC_INCR=1,
        MATRICE='TANGENTE',
```


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

```
    REAC_ITER=5,),
  RECH_LINEAIRE=_F(ITER_LINE_MAXI=3,),
CONVERGENCE=_F(
    RESI_GLOB_RELA=5.E-06,
     ITER_GLOB_MAXI=34,),);
```


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

3 Bibliographie

1) WAECKEL F. : Modélisation de la transformation austénitique dans *Code_Aster*. Note EDF/DER/IMA, note HI-74/95/017/0

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