



HAL
open science

Contribution à la modélisation des Transformations Tribologiques de Surface

Grégory Antoni, Thierry Esoyer, Frédéric Lebon

► **To cite this version:**

Grégory Antoni, Thierry Esoyer, Frédéric Lebon. Contribution à la modélisation des Transformations Tribologiques de Surface. XIXème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-01483067

HAL Id: hal-01483067

<https://hal.science/hal-01483067>

Submitted on 4 Mar 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Contribution à la modélisation des Transformations Tribologiques de Surface

G. ANTONI^{a,b}, T. DÉSOYER^{a,c}, F. LEBON^{a,b}

a. Université de Provence, Aix-Marseille 1, 3 place Victor Hugo 13003 Marseille, France

b. Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 31 Chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France

c. École Centrale de Marseille, Technopôle de Château-Gombert, 38 rue Frédéric Joliot-Curie, 13451 Marseille Cedex 20, France

Résumé :

Depuis une vingtaine d'années, certains types de rails du réseau ferroviaire sont affectés par un phénomène appelé Transformations Tribologiques de Surface et désigné plus couramment par l'acronyme TTS. Ces transformations correspondent, dans le cas des aciers constituant les rails, à des changements de phases solide-solide et peuvent conduire à terme à de l'endommagement surfacique, voire volumique. Afin de rendre compte de ce phénomène, on propose ici un modèle thermodynamiquement admissible qui s'inspire de travaux antérieurs sur la plasticité "TRIP" (TRansformation Induced Plasticity).

Abstract :

For about twenty years, some types of rails of the railroad network have been affected by a phenomenon called "Tribological Transformations of Surface", more commonly referred to with the acronym TTS. In the case of the steels composing the rails, these transformations correspond to changes of "solid-solid" phases and therefore lead to the surface and volume damage. We propose a thermodynamically admissible model to take account of this phenomenon which is inspired by previous works on TRansformation Induced Plasticity (TRIP).

Mots clés : Transformations tribologiques de surface, plasticité de transformation, thermodynamique des processus irréversibles, simulation numérique

1 Introduction

Les Transformations Tribologiques de Surface (TTS) sont apparues ces vingt dernières années, sur certains rails de voies ferrées, du fait de l'augmentation des vitesses et des charges aux essieux des convois. Ces TTS se caractérisent, sur la bande de roulement des rails, par la formation d'une couche blanche (white layer) qui correspond à une transformation de phase solide-solide. L'origine même de ces transformations semble inhérente au phénomène de fatigue de contact qui est de nature purement mécanique.

Lorsque cette zone présente une certaine épaisseur, une fissure peut apparaître en surface ou en volume, à l'interface zone saine/zone transformée, nécessitant dans le pire des cas, le changement d'un tronçon de rail.

Comme dans toute transformation de phase, les aciers constituant les rails pour voies ferrées possèdent une certaine structure métallurgique à température ambiante qui au cours du passage progressif des trains de marchandises, principalement, est amenée à changer de structure cristallographique.

Ces transformations métallurgiques s'accompagnent de modifications des propriétés mécaniques et physiques, mais aussi, le plus souvent, d'une variation de volume qui suivant le sens de la transformation produit une expansion ou une contraction.

Dans notre étude, nous nous focaliserons sur la modélisation thermo-mécanique de ces TTS. Afin de décrire de façon la plus précise possible ces transformations internes qui s'accompagnent systématiquement d'échanges thermiques et de variations de température, aussi faibles soient-ils, nous proposons une formulation thermodynamique s'inscrivant dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. Ce cadre thermodynamique d'écriture de modèles, obtenu par l'adjonction aux variables d'état température et déformation de variables complémentaires, dites "internes", se réduit à la définition d'un potentiel d'état et d'une surface seuil thermodynamiquement et physiquement admissibles.

2 Phénomène de plasticité de transformation (TRIP)

De façon générale, lors de transformations de phase sous charge, un écoulement plastique anormal se superpose à la plasticité classique existant dans les métaux même pour des niveaux de contraintes inférieurs à la limite d'élasticité de la phase la plus molle. Ce phénomène de plasticité, couramment appelé TRIP - TRansformation Induced Plasticity- peut s'expliquer par deux mécanismes de nature totalement différente.

Le premier mécanisme, initialement proposé par Greenwood-Johnson (1965) [1], considère que la plasticité de transformation est due à l'orientation de l'écoulement plastique, par la contrainte extérieure, autour de la nouvelle phase. Autrement dit, la micro-plasticité engendrée par les incompatibilités de volumes associées à la transformation de phases est orientée par la contrainte appliquée.

Le second mécanisme, proposée par Magee (1966) [4], est bien connu dans le cas des transformations sans diffusion comme les transformations martensitiques. D'après l'auteur, ce type de transformation de phase conduit, lors de l'application d'une contrainte extérieure, à l'orientation des produits de transformation. En d'autres termes, la contrainte extérieure oriente la phase nouvellement formée. Ce mécanisme peut également expliquer l'effet mémoire de forme de certains alliages. Dans la littérature, de nombreux modèles ont été proposés afin de décrire cette plasticité de transformation, e.g. le modèle de Leblond et al. (1989) [2][3].

3 Écriture d'un modèle de comportement

Nous nous plaçons dans le cadre des matériaux standards généralisés pour lesquels la loi de comportement peut être décrite par la connaissance de deux fonctions : un potentiel thermodynamique (e.g. l'énergie libre) pour les aspects réversibles et une surface seuil pour les aspects dissipatifs, i.e. irréversibles.

De plus, on se place dans le cadre de l'hypothèse des petites perturbations et d'un comportement thermo-élastique avec changement de phase.

En supposant un découplage entre la déformation élastique ϵ^e et la déformation de plasticité de transformation ϵ^{pt} , la déformation totale ϵ peut s'écrire :

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{pt} \quad (1)$$

Les termes ϵ^e , ϵ^{pt} représentent respectivement le tenseur de déformation élastique et le tenseur de déformation de plasticité de transformation.

Nous supposons que l'état du matériau peut être décrit à l'aide d'un certain nombre de variables d'état comme la température T , la déformation totale ϵ , la déformation de plasticité de transformation ϵ^{pt} et la variable métallurgique $z \in [0, 1]$ (traduisant la proportion volumique de la phase nouvellement formée).

3.1 Potentiel d'état

On propose l'expression suivante pour le potentiel d'état d'énergie libre massique :

$$\begin{aligned} \psi(T, \epsilon, \epsilon^{pt}, z) = & -C_\epsilon \frac{(T - T_0)^2}{2T_0} - \frac{1}{\rho_0} (3\lambda + 2\mu) \alpha(z) (T - T_0) \text{tr}(\epsilon - \epsilon^{pt}) \\ & + \frac{\lambda}{2\rho_0} \text{tr}(\epsilon - \epsilon^{pt})^2 + \frac{\mu}{\rho_0} [(\epsilon - \epsilon^{pt}) : (\epsilon - \epsilon^{pt})] + \frac{1}{2\rho_0} \beta z^2 + \psi_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{avec } \alpha(z) = (1 - z)\alpha_1 + z\alpha_2 \quad \text{et} \quad 0 \leq z \leq 1$$

où C_ϵ est la chaleur spécifique massique à déformation constante (supposée identique dans les deux phases),

λ, μ sont les coefficients de Lamé (supposés identiques dans les deux phases),

α_i , le coefficient de dilatation spécifique de la phase i ($i = 1, 2$) à la température T ,

ρ_0 , la masse volumique dans la configuration de référence (ici, l'état initial),

T_0 , la température absolue initiale,

β , une constante strictement positive,

ψ_0 , l'énergie libre massique initiale.

3.2 Fonctions d'état

Par définition, les fonctions d'état ou "forces thermodynamique" associées aux variables internes sont les dérivées partielles du potentiel d'état (au signe près, pour certaines d'entre elles). En l'occurrence, elles s'écrivent :

$$\begin{cases} A^T = -\frac{\partial\psi}{\partial T} = C_\epsilon \frac{(T - T_0)}{T_0} + \frac{(3\lambda + 2\mu)}{\rho_0} \alpha(z) \operatorname{tr}(\boldsymbol{\epsilon} - \boldsymbol{\epsilon}^{pt}) \\ A^\epsilon = \frac{\partial\psi}{\partial \boldsymbol{\epsilon}} = -\frac{(3\lambda + 2\mu)}{\rho_0} \{\alpha(z) (T - T_0)\} \mathbf{I} + \frac{\lambda}{\rho_0} \operatorname{tr}(\boldsymbol{\epsilon} - \boldsymbol{\epsilon}^{pt}) \mathbf{I} + \frac{2\mu}{\rho_0} (\boldsymbol{\epsilon} - \boldsymbol{\epsilon}^{pt}) \\ A^{\epsilon^{pt}} = -\frac{\partial\psi}{\partial \boldsymbol{\epsilon}^{pt}} = A^\epsilon \\ A^z = -\frac{\partial\psi}{\partial z} = \frac{(3\lambda + 2\mu)}{\rho_0} \{(\alpha_2 - \alpha_1) (T - T_0)\} \operatorname{tr}(\boldsymbol{\epsilon} - \boldsymbol{\epsilon}^{pt}) - \frac{1}{\rho_0} \beta z \end{cases} \quad (3)$$

– Les effets de viscoélasticité ne sont pas pris en compte dans cette étude. On a donc :

$$\boldsymbol{\sigma} = \rho A^\epsilon \quad (4)$$

– $s = A^T$, où s est l'entropie massique.

Par la suite, on suppose que $\rho = \rho_0$. Autrement dit, on suppose que la masse volumique dans la configuration actuelle, ρ , et initiale, ρ_0 , sont égales.

3.3 Équations d'évolution des variables internes

Afin de décrire l'évolution des processus dissipatifs, on définit une surface seuil de plasticité TRIP telle que :

- si $f^{pt} < 0$ ou $f^{pt} = 0$ et $\dot{f}^{pt} < 0$, la réponse du matériau est purement thermo-élastique.
- si $f^{pt} = 0$ et $\dot{f}^{pt} = 0$, la réponse du matériau est thermo-élastoplastique.

On propose l'expression suivante pour la surface seuil, qui s'inspire largement de celles usuelles en plasticité classique :

$$f^{pt}(\boldsymbol{\sigma}, \rho A^z) = \eta \sigma^{eq} + \chi \operatorname{tr}(\boldsymbol{\sigma}) + \kappa \rho A^z - \sigma_0(z, T, \mathbf{q}) \quad (5)$$

$$\text{avec } \sigma_0(z, T, \mathbf{q}) = \begin{cases} 0 & \text{si } T \geq T_c \text{ et } \|\mathbf{q}\| \geq q_c \\ \bar{\sigma}_0 & \text{si } T < T_c \text{ ou } \|\mathbf{q}\| < q_c \end{cases} \quad (6)$$

où ρA^z est la force thermodynamique associée à la variable z , σ^{eq} est la contrainte équivalente de Von Mises, $\sigma_0(z, T, \mathbf{q})$ désigne la contrainte d'écoulement de la plasticité de transformation (TRIP), \mathbf{q} est le flux de chaleur, $\|\cdot\|$ désigne la norme euclidienne, et $\bar{\sigma}_0$, T_c , q_c des paramètres matériau.

Ainsi, l'une des principales originalités de ce modèle réside dans le fait que la contrainte seuil dépend du flux de chaleur.

On suppose ensuite que l'évolution des variables internes suit une loi de dissipativité normale, soit, pour le tenseur des déformations plastique TRIP :

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{pt} = \dot{p}t \mathbf{n}^{pt} \text{ avec } \dot{p}t = (1 - z) \langle \dot{f}^{pt} \rangle \text{ et } \mathbf{n}^{pt} = \frac{\partial f^{pt}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (7)$$

Compte tenu de l'expression donnée pour $\dot{p}t$, le modèle proposé est donc de type élasto-viscoplastique. D'après l'équation (5), on a donc :

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{pt} = \dot{p}t \frac{\partial f^{pt}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \dot{p}t \left(\eta \frac{3}{2} \frac{\boldsymbol{\sigma}^d}{\sigma^{eq}} + \chi \mathbf{I} \right) \quad (8)$$

où σ^d est le déviateur des contraintes, \mathbf{I} le tenseur identité du second ordre et $\langle . \rangle$ est la fonction partie positive.

De la même façon, l'équation d'évolution de la variable métallurgique z s'écrit :

$$\dot{z} = \dot{p}t \frac{\partial f^{pt}}{\partial (\rho A^z)} = \kappa \dot{p}t = \kappa (1 - z) \langle f^{pt} \rangle \quad (9)$$

3.4 Dissipation intrinsèque et équation de la chaleur

Compte tenu des équations (3) et (4), la dissipation intrinsèque s'écrit :

$$\phi_{int} = \sigma : \dot{\epsilon}^{pt} + \rho A^z \dot{z} \geq 0 \quad (10)$$

ou encore, selon les équation (8) et (9) :

$$\phi_{int} = \dot{p}t [\eta \sigma^{eq} + \chi tr(\sigma) + \kappa \rho A^z] \quad (11)$$

Le multiplicateur $\dot{p}t$ étant strictement positif si et seulement si $f^{pt}(\sigma, \rho A^z) > 0$ (et nul sinon), la dissipation intrinsèque est bien strictement positive lors de l'évolution irréversible (et nulle sinon) puisque, selon l'équation (5) :

$$f^{pt}(\sigma, \rho A^z) > 0 \iff \eta \sigma^{eq} + \chi tr(\sigma) + \kappa \rho A^z > \sigma_0(z, T, \mathbf{q}) \geq 0 \quad (12)$$

Quant à l'équation de la chaleur, elle s'écrit :

$$\rho C_\epsilon \dot{T} - k \Delta T = -(3\lambda + 2\mu)T \left[(\alpha_2 - \alpha_1) \dot{z} tr(\epsilon - \epsilon^{pt}) + \alpha(z) tr(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^{pt}) \right] + \sigma : \dot{\epsilon}^{pt} + \rho A^z \dot{z} \quad (13)$$

où les termes de droite, dits termes "puits" (si négatifs) ou "sources (si positifs) de chaleur, sont dûs à la thermoélasticité et à la plasticité TRIP.

4 Simulation numérique

À titre d'illustration des performances du modèle proposé, on s'intéresse ici au problème 1D régi par les équations (1), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (13) - cette dernière sans les termes sources toutefois - et l'équation d'équilibre mécanique. Le problème considéré est celui d'une éprouvette pouvant subir un changement de phase sous un chargement thermo-mécanique.

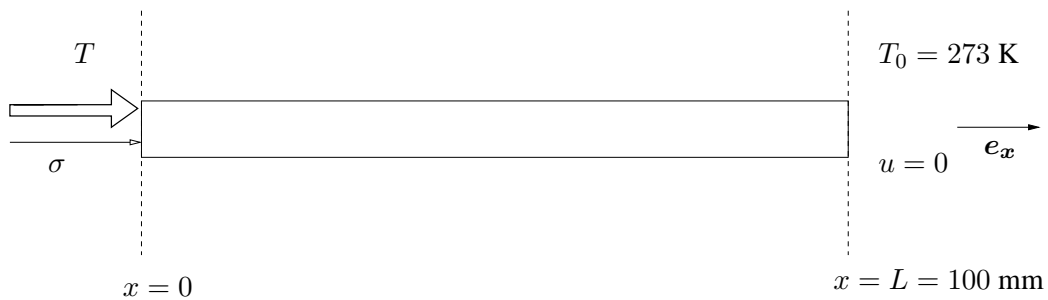


FIG. 1 – Géométrie du problème et conditions aux limites

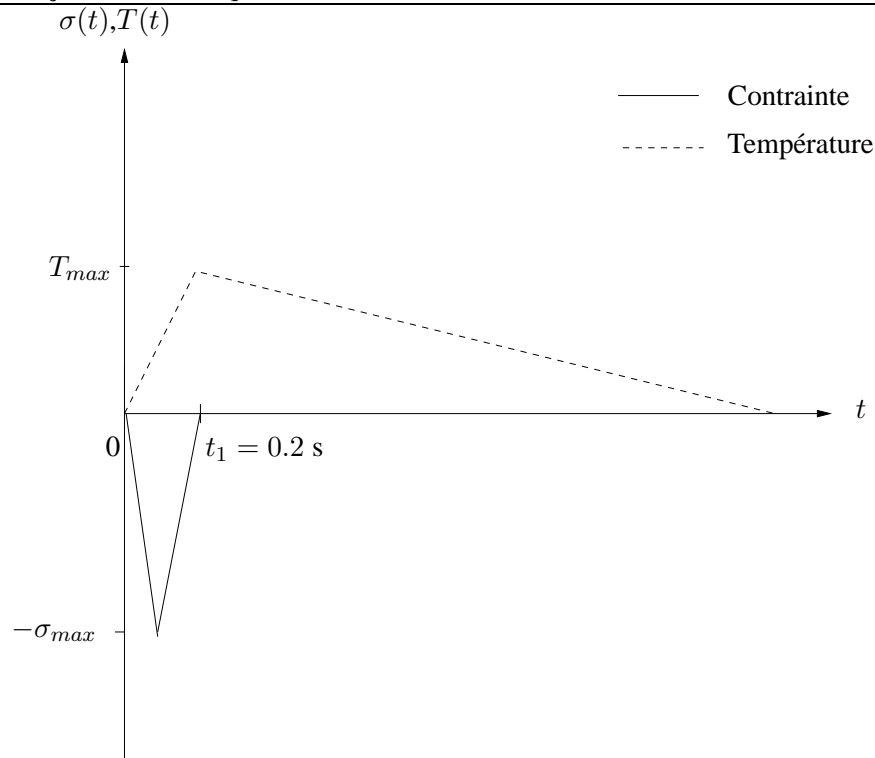


FIG. 2 – Chargements mécanique et thermique imposés

La figure 2 représente le chargement thermo-mécanique imposé dont les amplitudes maximales en contrainte et température sont respectivement $-\sigma_{max} = -70$ MPa et $T_{max} = 323$ K.

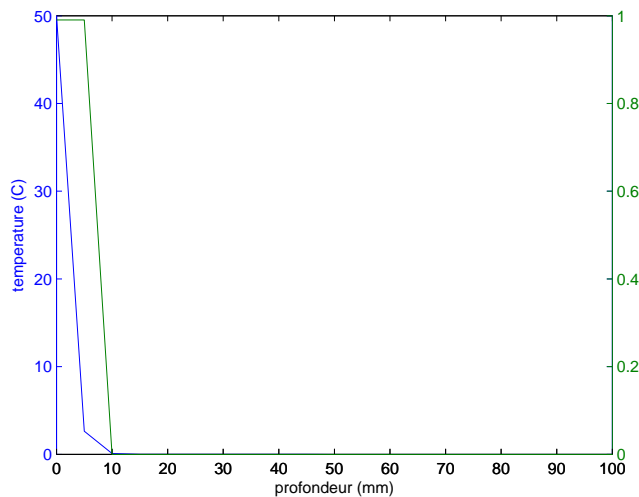


FIG. 3 – Distribution de la proportion de phase en fonction de sa profondeur (x) à $t = t_1$

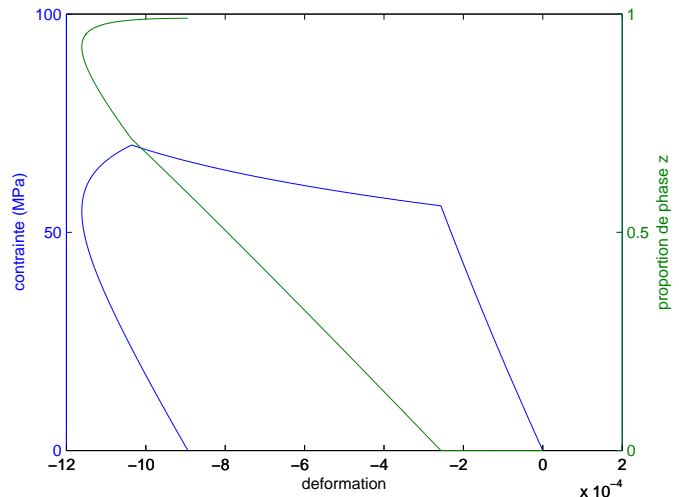


FIG. 4 – Courbe contrainte en fonction de la déformation au point $x = L/20$ (en valeur absolue pour la contrainte) entre $[0, t_1]$

Nous présentons les résultats au temps $t_1 = 0.2$ s (après décharge) de la distribution de la proportion de phase en fonction de l'abscisse de la barre (figure 3) et la contrainte en fonction de la déformation (figure 4) au point $x = L/20$.

La figure 3, nous montre qu'une transformation de phase s'est produite au bord et jusqu'à 10 mm de profondeur. Il est intéressant de noter que cette transformation est quasiment totale puisque $z \approx 1$. Il semble que le modèle présenté soit un bon candidat pour simuler des transformations tribologiques de surface dans la mesure où le front de transformation se propage bien du bord vers le coeur de la structure.

Paramètres-matériau usuels		Paramètres-matériau spécifiques du modèle proposé
Module d'Young commun aux deux phases	$E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$	$\eta = 1 \times 10^{-3}$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0.3$	$\chi = 0$
Coefficient de dilatation thermique phase 1 (ferrite)	$\alpha_1 = 17.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\kappa = 1$
Coefficient de dilatation thermique phase 2 (martensite)	$\alpha_2 = 12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$T_c = 293 \text{ K}$
Chaleur spécifique	$C = C_\epsilon = 450 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$q_c = 1 \times 10^{-2} \text{ W.mm}^{-2}$
Conductivité thermique	$k = 50 \times 10^{-3} \text{ W.mm}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\beta = 1 \text{ MPa}$
Masse volumique	$\rho = 7800 \times 10^{-9} \text{ kg.mm}^{-3}$	$\bar{\sigma}_0 = 80 \text{ MPa}$

FIG. 5 – Tableau récapitulatif.

Nous pouvons voir figure 4 que la courbe contrainte/déformation traduit bien tout d'abord un comportement thermo-élastique pour une déformation d'environ -2×10^{-4} . Ensuite, la transformation s'amorce et se poursuit même en décharge (ce qui explique la concavité de la courbe). La déformation plastique de transformation joue le rôle de la déformation inélastique qui perdure après décharge.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un modèle thermodynamiquement admissible permettant la prise en compte des transformations de phases. Le modèle présenté peut s'adapter aux solides subissant des sollicitations tribologiques de surface, et peut donc modéliser les TTS se manifestant sur les rails ferroviaires. L'originalité de cette étude réside dans la forme donnée à la surface seuil associée à la plasticité de transformation (ou effet TRIP), qui outre le fait qu'elle peut être activée mécaniquement, comme la plasticité classique, peut également être initiée thermiquement en satisfaisant des conditions sur la température et sur le gradient de température.

Références

- [1] Greenwood G.W., Johnson R.H. The deformation of metals under small stresses during phase transformations. Proceedings of the Royal Society of London, series A : Mathematical and Physique Sciences, vol. 293, pp. 403-422, 1965.
- [2] Leblond J.-B., Devaux J., Devaux J.-C. Mathematical modelling of transformation plasticity in steels—Case of ideal-plastic phases. International Journal of Plasticity, vol. 5, pp. 551-571, 1989.
- [3] Leblond J.-B., Devaux J., Devaux J.-C. Mathematical modelling of transformation plasticity in steels—Coupling with strain hardening phenomena. International Journal of Plasticity, vol. 5, pp. 573-591, 1989.
- [4] Petit-Grostabussiat S. Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2000.