



HAL
open science

Modélisation multi-physique couplée d'un procédé de traitement thermique

David Cardinaux, François Bay, Yvan Chastel, Julien Feraille

► **To cite this version:**

David Cardinaux, François Bay, Yvan Chastel, Julien Feraille. Modélisation multi-physique couplée d'un procédé de traitement thermique. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01508937

HAL Id: hal-01508937

<https://hal.science/hal-01508937>

Submitted on 15 Apr 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.

Public Domain

Modélisation multi-physique couplée d'un procédé de traitement thermique

D. Cardinaux*** — F. Bay* — Y. Chastel***,* — J. Féraïlle**

* *Centre de Mise en Forme des Matériaux, CEMEF
Ecole des Mines de Paris, U.M.R. CNRS 7635
1 rue Claude Daunesse – BP207, F-06904 Sophia Antipolis cedex
david.cardinaux@ensmp.fr*

** *PSA Peugeot Citroën, Centre technique de Vélizy
Route de Gisy, F-78943 Velizy Villacoublay cedex
*** Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux, LIM
Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, U.M.R. CNRS 8006
151 boulevard de l'Hôpital, F-75013 Paris*

RÉSUMÉ. La simulation numérique vise à prédire le comportement des structures que ce soit pour leur tenue en service ou lors de leur mise en forme. Ces simulations font de plus en plus intervenir des couplages multi-physiques complexes, comme par exemple lors de traitements thermiques par induction. Cet article présente la simulation du chauffage par induction d'un vilebrequin automobile. L'outil numérique qui a été développé est présenté en commençant par le modèle mathématique, puis en poursuivant par la résolution numérique par éléments finis faisant intervenir électromagnétisme, thermique, mécanique et métallurgie. Les résultats permettant d'expliquer les phénomènes de distorsions concluent cet article.

ABSTRACT. Numerical simulation aims at predicting the behaviour of structures for both in-life properties and material processing. These simulations call increasingly rely on complex multi-physical couplings, as for example, thermal induction treatments. In this article, we will present induction heating simulation of an automotive crankshaft. The developed numerical tool will be presented dealing with mathematical modelling, and then, with methods using finite element resolution and including many fields as electromagnetism, heating, mechanics and metallurgy. Finally, first results will be presented showing distortion phenomenon.

MOTS-CLÉS : traitement thermique, couplage multi-physique, modélisation numérique, éléments finis, électromagnétisme, thermique, mécanique, métallurgie, austénitisation, trempe.

KEYWORDS: heat treatment, multi physics coupling, numerical modelling, finite elements, electromagnetism, heat transfer, mechanics, metallurgy, austenitizing, quenching.

1. Les objectifs

Le traitement thermique permet de durcir certaines zones d'une pièce et de créer des gradients de propriétés mécaniques dans le matériau. Le traitement thermique se décompose en deux étapes. La première consiste à chauffer par induction la pièce jusqu'à austénitisation de l'acier. La seconde est une trempe à l'eau. La zone affectée thermiquement étant maîtrisée lors de la première étape, la seconde consiste à tremper la pièce soit par douche, soit par immersion totale. De cette manière, seules les zones contenant de l'austénite subiront une trempe.

Le travail porte sur le développement d'un outil de simulation numérique par éléments finis d'un procédé de trempe locale après chauffage par induction. La simulation d'un procédé aussi complexe nécessite la prise en compte de phénomènes électromagnétiques, thermiques, mécaniques, métallurgiques, ainsi que de leurs interactions mutuelles pendant tout le traitement : chauffage et refroidissement. Tous ces phénomènes sont couplés ; certains couplages, selon les cas, peuvent être négligés. Eric Barrere (Barrere, 1992) propose certaines hypothèses parmi lesquelles nous retiendrons celles qui nous paraissent le moins influentes. Ainsi, la figure 1 présente les couplages que nous négligerons et ceux que nous modéliserons.

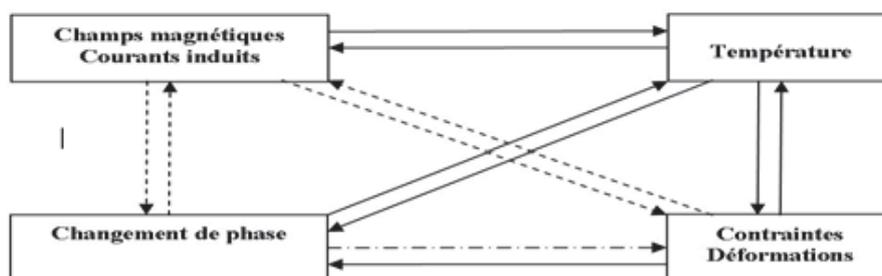


Figure 1. Ensemble de couplages lors d'une trempe par induction. Les traits discontinus représentent les effets négligés et les traits mixtes les effets négligeables selon Barrere (Barrere, 1992) mais pris en compte dans notre cas.

2. Modélisation numérique

2.1. Electromagnétisme

Pour la discrétisation spatiale des équations de Maxwell, notre choix s'est porté sur la méthode des éléments finis de Nédélec (Nédélec, 1986). Ce type d'éléments permet entre autres de restreindre la continuité des champs à leur composante tangentielle et non à leur composante normale comme dans certaines formulations traditionnelles.

2.2. Résolution thermique

Le problème thermique est résolu à l'aide de tétraèdres linéaires P1 en température. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à (Chenot *et al.*, 2005).

L'équation de la chaleur est intégrée numériquement en temps par un schéma de différence finie du second ordre à deux pas de temps. Pour traiter les non-linéarités dues à la dépendance en température, on utilise une technique de linéarisation détaillée dans (Zlamal, 1971).

2.3. Résolution mécanique

Le problème mécanique est résolu à l'aide d'une formulation mixte en vitesse – pression. Le choix de la méthode de discrétisation spatiale s'est porté sur des éléments finis mixtes tétraédriques P1+/P1. La pression est exprimée linéairement aux sommets des tétraèdres alors que la vitesse voit un terme bulle supplémentaire apparaître au centre de gravité de chaque élément.

2.4. Résolution métallurgique

Le problème métallurgique est résolu sur les éléments tétraédriques à l'aide d'une interpolation discontinue P0. Le taux de chaque phase est calculé au centre de gravité de chaque élément.

Notre choix s'est porté sur les lois de Johnson-Mehl-Avrami (Johnson *et al.*, 1939) avec principe d'additivité et temps fictif (Aliaga, 2000) et Koistinen-Marburger (Koistinen *et al.*, 1959). Le schéma temporel choisi est un schéma purement implicite.

3. Couplages

3.1. Effets électromagnétiques, métallurgiques et mécaniques sur la température

La solution de la résolution électromagnétique est une puissance électrique créée par effet Joule P_{elec} . Cette source de densité de chaleur induite est insérée dans le second membre de l'équation de la chaleur tout comme la densité de puissance dissipée par travail mécanique et la chaleur latente de transformation [2]. De plus, une loi des mélanges locale est appliquée aux propriétés thermo physiques (Fernandes *et al.*, 1986).

$$\left[\sum_{i=1}^{nb\ phases} y_i (\rho C)_i \right] \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^{nb\ phases} y_i k_i \right) \vec{\nabla} T \right] = P_{elec} + \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{vp} + \sum_{i=1}^{nb\ phases} \dot{y}_i \Delta H_i \quad [2]$$

3.2. Effets de la température sur les paramètres électromagnétiques et mécaniques

Les paramètres électromagnétiques σ (conductivité électrique) et μ (perméabilité magnétique) sont thermo dépendants. Afin de réduire le temps de calcul, l'estimation d'une nouvelle densité de puissance électromagnétique induite ne sera réitérée uniquement si l'un des paramètres évolue de façon significative (Bay *et al.*, 2000).

3.4. Effets mécaniques sur les changements de phase

Les temps de début de transformation t_0 , le paramètre d'Avrami b et la température de début de transformation martensitique M_S sont dépendant de l'état de contrainte du matériau. Soient D_σ , A et B les paramètres de cette dépendance (Denis, 1987) :

$$D_\sigma = \frac{t_\sigma - t_0}{t_0} \quad [3]$$

$$b_\sigma = \frac{b}{(1 + D_\sigma)^n} \quad [4]$$

$$M_S^\sigma = M_S + A\sigma_{eq} + Bp \quad [5]$$

3.5. Effet des transformations métallurgiques sur le comportement mécanique

Tout d'abord, il faut prendre en compte le comportement mécanique de chaque phase présente. Une loi des mélanges sera alors utilisé pour chaque paramètre thermo-elasto-visco-plastique.

De plus, par additivité des vitesses de déformation, nous prenons en compte les effets de la dilatation ou contraction aux changements de phase (changement de densité d'une phase à une autre) et de plasticité de transformation.

4. Application à un cas industriel

La figure 2 présente le système industriel composé de deux inducteurs monospires autour de la partie utile d'un vilebrequin. Les inducteurs sont alimentés en courant par un générateur, ce qui implique une ouverture de la boucle formée par chacun d'eux.



Figure 2. Chauffage par induction d'un vilebrequin muni de deux inducteurs.

La figure 3 présente les distorsions induites dans la pièce suite au procédé de traitement thermique. Nous pouvons remarquer que la déformation est relativement faible (maximum à environ 2,7%). Ainsi, elle n'aura que peu d'influence sur la géométrie finale de la pièce garantissant une bonne qualité de la coaxialité du vilebrequin.

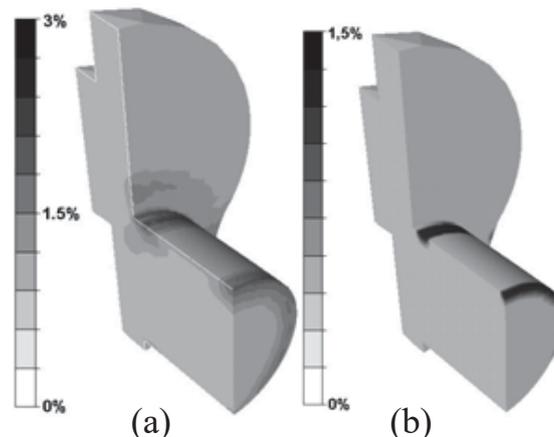


Figure 3. Champ de déformation équivalente (a) et plasticité de transformation (b).

5. Conclusions et perspectives

Nous avons développé un modèle numérique permettant de simuler des procédés de traitement thermique couplant des phénomènes électromagnétiques, thermiques, mécaniques et métallurgiques.

Une voie d'amélioration concerne la caractérisation de comportement du matériau. Certaines données peuvent demander de lourdes campagnes comme établir le comportement thermo-élasto-viscoplastique de chaque phase métallurgique. D'autres, selon le type d'acier étudié, peuvent être techniquement difficiles à obtenir comme par exemple, le diagramme TTT d'un acier dit peu trempant ou la plasticité de transformation dans le cas de trempes très rapides (trempes à l'eau).

6. Bibliographie

- Barrere E., Contribution à la modélisation des contraintes résiduelles lors de la trempe superficielle au défilé après un chauffage par induction, Thèse de doctorat, ENSAM de Bordeaux, 1992.
- Nédélec J.C., *A new family of mixed finite elements in R^3* , Numer. Math., vol.50, p.57-81, 1986.
- Chenot J.L., Bay F., « Modeling of metal forming processes and multi-physics coupling », *COMPLAS VIII, International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona, 2005
- Zlamal M., « Finite element for non linear parabolic equations », *Rairo Num. Analysis*, vol. 11, p.93-107, 1971
- Johnson W.A., Mehl R.F., « Reaction kinetics in processes of nucleation and growth », *trans AIME*, vol.135, p.416, 1939.
- Aliaga C., Simulation numérique par éléments finis en 3D du comportement thermomécanique au cours du traitement thermique d'aciers : application à la trempe de pièces forgées ou coulées, Thèse de doctorat, ENSMP, 2000.
- Koistinen, Marburger, « A general equation prescribing extent of the austenite-martensite transformation in pure fe-c alloys and plain carbon steels », *Acta metallurgica*, vol.7, p.59-60, 1959.
- Fernandes F., Denis S., Simon A., « Prévission de l'évolution thermique et structurale des aciers au cours de leur refroidissement continu », *Mémoire et étude scientifiques Revue de Métallurgie*, p. 335-365, 1986.
- Bay F., Labbé V., Favennec Y., Chenot J.L., « A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics », *International Journal for Numerical Methods in Engeneering*, vol. 58, P.839-867, 2000.
- Denis S., Modélisation des interactions contrainte-transformation de phase et calcul par élément finis de la genèse des contraintes internes au cours de la trempe des aciers, Thèse de doctorat, INPL, 1987.