

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

D. CARDINAUX^a, F. BAY^a, Y. CHASTEL^a, J. FERAILLE^b

a. Mines ParisTech, CEMEF - Centre de Mise en Forme des Matériaux, CNRS UMR 7635, BP 207, 1 rue Claude Daunesse, 06904 Sophia Antipolis Cedex

b. PSA Peugeot Citroën, Centre technique de Vélizy, Route de Gisy, 78943 Velizy Villacoublay cedex

Résumé :

L'étude s'applique à la trempe après chauffage par induction localisé d'une tôle emboutie. Le procédé génère des distorsions dans la structure qui sont à maîtriser. Un outil de calcul numérique tenant compte des couplages multi-physiques entre électromagnétisme, thermique, mécanique et métallurgie est alors nécessaire. La création d'un tel outil utilisant la méthode des éléments finis est le but de ce travail.

Abstract :

This study deals with quenching a steel stamped sheet after being heated by a localised induction process. This process involves distortions in the structure which have to be mastered. To this end, a numerical computation tool involving multiphysics coupling – electromagnetism, heat transfer, mechanics, and steel solid-solid phase changes – is necessary. The purpose of this work is to develop such a numerical computation tool using the finite element approach.

Mots clefs : Couplages multi-physiques, modélisation numérique, éléments finis, traitement thermique, chauffage par induction, contraintes résiduelles, mise en forme.

1 Objectifs

Les propriétés de tenue mécanique d'une structure en service dépendent fortement de son histoire thermique, mécanique et métallurgique lors de sa fabrication. L'industrie en tire partie pour contrôler les propriétés de la structure. Par exemple, le traitement thermique permet de durcir certaines zones d'une pièce et de créer des gradients de propriétés mécaniques dans le matériau.

Un traitement thermique composé d'un chauffage par induction suivi d'une trempe à l'eau, permet de durcir des zones définies de la pièce, en surface, dans une profondeur contrôlée [1]. Par ce procédé, les caractéristiques mécaniques, comme la résistance à l'usure et à la fatigue sont considérablement améliorées dans la zone utile de la pièce.

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 phase du traitement thermique est une trempe à l'eau. La zone affectée thermiquement (ZAT) 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.

2 Le modèle physique

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. Certaines interactions, selon les cas, peuvent être négligées. La figure 1 présente les couplages que nous estimons nécessaires et ceux que nous négligerons, dans le but d'obtenir un juste équilibre entre temps de calculs et pertinence des résultats, principalement en terme de distorsions mécaniques. Les couplages 7, 8 et 9 sont négligés. Le 7 correspond à l'effet de l'électromagnétisme sur les cinétiques de transformations de phases, couplage inconnu dans l'état de l'art actuel. Le 8 correspond à l'effet des cinétiques de transformations de phases sur les paramètres électromagnétiques. Dans un premier temps, avec une estimation a priori des vitesses de chauffage et des

points de transformation austénitique, nous pouvons tenir compte de ce couplage à travers le couplage 2. Le couplage 9 correspond à la modification du cycle hystérésis d'aimantation par écrouissage du matériau. Dans l'hypothèse d'une énergie dissipée par aimantation très faible devant l'énergie dissipée par effet Joule, ce couplage est négligeable.

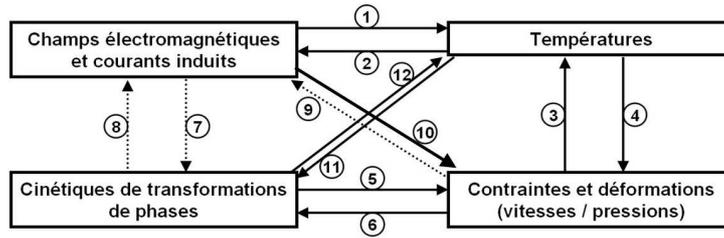


FIG. 1 – Ensemble de couplages lors d'une trempe par induction. Les traits discontinus représentent les effets négligés.

3 Modèle mathématique

3.1 Equations de Maxwell

L'électromagnétisme est régi par un système composé des équations de Maxwell décrivant les répartitions et l'évolution des champs électromagnétiques dans le cas de l'approximation des régimes quasi-permanents (ARQP) [2] et des lois constitutives des conducteurs électromagnétiques. Le système peut se condenser par la formulation A-V largement utilisée en modélisation 3D [3] :

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \right] = -\sigma \vec{\nabla} V \quad (1)$$

3.2 Transfert thermique

L'évolution de température dans la pièce est calculée à partir de l'équation de la chaleur :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \vec{\nabla} T) = 0 \quad (2)$$

où ρ est la masse volumique du matériau, C est sa chaleur massique et k sa conductivité thermique. Les conditions aux limites peuvent être des 3 types classiquement utilisés : température imposée, flux imposé ou convection-radiation.

3.3 Equilibre mécanique

L'équation de l'équilibre pour un solide sous chargement mécanique peut s'écrire dans sa forme locale :

$$\text{div}(\underline{\underline{\sigma}}) + \rho \vec{f} = \vec{0} \quad (6)$$

où $\underline{\underline{\sigma}}$ représente le tenseur des contraintes dans le solide, ρ la masse volumique et \vec{f} l'effort par unité de masse. L'équation (6) est accompagnée de la loi constitutive du matériau. Nous considérons le cas général d'un matériau thermo-élasto-visco-plastique :

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{el}} + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{vp}} + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{th}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{el}} = \frac{1+\nu}{E} \underline{\underline{\dot{\sigma}}} - \frac{\nu}{E} \text{Tr}(\underline{\underline{\dot{\sigma}}}) \underline{\underline{I}} \\ \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{vp}} = \frac{3}{2\sigma_0} \left[\frac{\langle \sigma_0 - R \rangle}{K} \right]^{1/m} \underline{\underline{s}} \\ \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{th}} = \alpha \dot{T} \underline{\underline{I}} \end{cases} \quad (7)$$

où $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{el}}$, $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{th}}$, $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{vp}}$ sont respectivement les tenseurs vitesse de déformation élastique, thermique et viscoplastique telle que définie par [4]. ν est le coefficient de Poisson, E le module de Young, α le

coefficient de dilatation linéique, T la température, K la consistance, m le module visqueux, R la fonction d'écroutissage, et σ_0 est défini par la loi d'écroutissage choisie. Cette loi doit permettre de modéliser la rhéologie d'un matériau chaud (visqueux) et de dégénérer vers le comportement d'un matériau froid (elasto-plastic) [5] :

$$\sigma_0 = \sigma_{00} + H\bar{\epsilon}^n + K\dot{\epsilon}^m \quad (8)$$

Où σ_{00} est la limite d'élasticité, H le module d'écroutissage et n le paramètre d'écroutissage.

3.4 Transformations métallurgiques

Nous retiendrons des modèles mathématiques couramment utilisés dans la littérature : Johnson-Mehl-Avrami pour les transformation diffusives (austénitiques, ferritiques, perlitiques et bainitiques) exprimant la croissance par la loi (9) et Koistinen-Marburger pour les transformations martensitiques exprimé par la loi (10).

$$y = y_{\max} [1 - \exp(-bt^n)] \quad (9)$$

$$y = y_{\max} (1 - \exp[-A_M (M_s - T)]) \quad (10)$$

où y est le taux de phase naissante, y_{\max} est le taux maximum que peut atteindre y dans les conditions actuelles, t est le temps, b et n sont les paramètres thermo dépendants d'Avrami, A_M un paramètre matériau constant, et M_s la température de début de transformation martensitique (martensite start).

4 Modélisation numérique

4.1 Discrétisation spatiale

La discrétisation spatiale utilise la méthode des éléments finis. Notre choix pour le problème électromagnétique s'est porté sur des éléments de Nédélec (ou éléments d'arête), particulièrement intéressants pour la résolution de systèmes électromagnétiques ou magnétohydrodynamiques [6]. Ce type d'éléments permet entre autres de restreindre la continuité des champs à leur composante tangentielle. Cette propriété représente physiquement les conditions de frontière entre deux domaines de nature différente, comme par exemple l'inducteur et l'air.

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.

Nous utilisons des tétraèdres linéaires P1 pour le problème thermique et des éléments discontinus P0 pour le problème métallurgique.

4.2 Discrétisation temporelle

La discrétisation temporelle du problème électromagnétique n'est pas nécessaire car des approches harmoniques sont tout à fait adaptées [7]. Nous préférons néanmoins nous orienter vers une intégration temporelle par un schéma d'Euler implicite comme le propose [8]. Cette méthode permet naturellement de prendre en compte la dépendance de la perméabilité magnétique au champ magnétique. Elle permet également d'utiliser des bibliothèques de solveurs linéaires réels performants.

Concernant la résolution mécanique, nous utilisons un schéma incrémentale purement implicite qui présente un bon compromis entre convergence des itérations de Newton-Raphson et coût du calcul [9].

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 [10].

Concernant la résolution métallurgique, nous utilisons le principe d'additivité et du temps fictif pour généraliser le formalisme d'Avrami aux transformations anisothermes. Le schéma temporel est un schéma purement implicite.

5 Couplages

5.1 Effets électromagnétiques, métallurgiques et mécaniques sur la température

Tenant compte des effets électromagnétiques, mécaniques et métallurgiques sur la thermique, l'équation de la chaleur donnée en (2) devient [5] :

$$\left[\sum_{i=1}^{nb\ phases} y_i (\rho C)_i \right] \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^{nb\ phases} y_i k_i \right) \vec{\nabla} T \right] = P_{elec} + P_{meca} + P_{tran} \quad (11)$$

Avec :

$$\begin{cases} P_{elec} = \frac{\sigma \omega^2 \|\vec{A}\|^2 + \sigma \|\vec{\nabla} V\|^2}{2} - \omega \vec{A} \cdot \vec{\nabla} V \sin(\varphi) \\ P_{tran} = \sum_{i=1}^{nb\ phases} \dot{y}_i \Delta H_i \\ P_{meca} = \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{vp} \end{cases} \quad (12)$$

Où ω et φ sont respectivement la pulsation et le déphasage du signal électromagnétique, \dot{y}_i est la vitesse de croissance de la phase i , et ΔH_i la chaleur latente de transformation entre la phase mère et la phase i .

5.2 Paramètre thermodépendants

Les paramètres électromagnétiques (conductivité électrique σ et perméabilité magnétique μ) sont thermodépendants. Afin de réduire le temps de calcul, la résolution électromagnétique et le calcul d'une nouvelle densité de puissance électromagnétique induite ne seront réitérés uniquement si l'un des paramètres évolue de façon significative [8].

De la même manière, les paramètres rhéologiques sont fortement thermodépendants. Ces paramètres sont alors localement recalculés à chaque incrément en fonction du champ de température.

Enfin, d'un point de vue métallurgique, le principe d'additivité et du temps fictif impose de connaître les paramètres d'Avrami b , n et y_{max} en fonction de la température (diagramme TTT).

5.3 Effets mécaniques sur les changements de phase

Dans le cas de gradients thermiques importants comme pour le chauffage local par induction, les calculs de cinétiques de transformations doivent également prendre en compte les effets des contraintes internes et des déformations de la pièce. Ceux-ci se traduisent en général par un décalage des courbes TTT et TRC vers des temps plus courts et par une augmentation des vitesses de transformations. Nous utilisons un modèle de décalage des courbes TTT et un modèle de calcul de la température M_s en fonction de l'état de contrainte proposé par S. Denis [11].

5.4 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 linéaire sera alors utilisée sur les contraintes d'écoulements calculées en (8).

De plus, nous devons tenir compte des effets de la dilatation ou contraction aux changements de phase et de plasticité de transformation. La plasticité de transformation est une déformation plastique qui apparaît lors des trempes sous contraintes, même très inférieures à la limite d'élasticité. Pour tenir compte de ces phénomènes métallurgiques, nous ajoutons deux termes de couplage à l'équation (7) :

$$\underline{\dot{\underline{\epsilon}}} = \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{el} + \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{vp} + \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{th} + \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{tr} + \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{pl} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{tr} = \sum_{i=1}^{nb \text{ phases}} \frac{1}{3} \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0} \dot{y}_i \underline{I} \\ \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{pl} = \sum_{i=1}^{nb \text{ phases}} \left(\frac{3}{2} k_i(T) f_i'(y) \dot{y}_i \underline{s} \right) \end{cases} \quad (15)$$

où $\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{tr}$ est le tenseur sphérique des vitesses de déformation dues aux changements de densités lors des transformations métallurgiques, $\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{pl}$ est le tenseur des plasticités de transformation, $k_i(T)$ est un paramètre thermo dépendant pour chaque phase et $f_i'(y)$ est une fonction du taux de phase i défini dans [12] et \underline{s} le déviateur des contraintes.

6 Application à un cas semi-industriel

Nous nous intéressons ici au traitement thermique de tôles embouties après mise en forme, dans le but de renforcer mécaniquement une structure. Le procédé se décompose en 3 étapes : un chauffage par induction, un temps de retard douche, une trempe par douche à l'eau de la tôle emboutie. Ces trois étapes sont réalisées sous un état de contrainte mécanique imposé par un système de bridage de la tôle. La figure 2a présente le système pièce/inducteur d'un coté du plan de symétrie du modèle. La diffusion des champs électromagnétiques dans l'air est modélisée par un maillage de l'air. La figure 2b présente le système de bridage de la pièce.

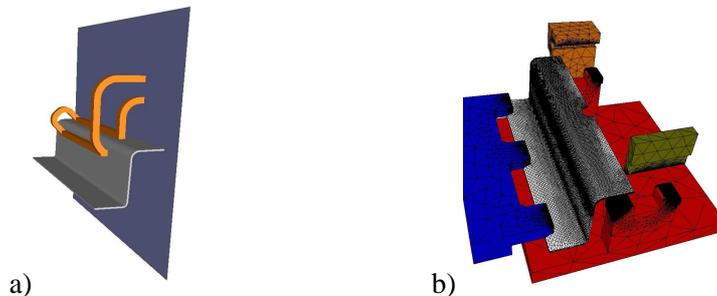


FIG. 2 – Modèle numérique pour la simulation du chauffage par induction comprenant 3 domaines maillés : air, inducteur et tôle.

Le chauffage par induction permet d'obtenir un champ de température maîtrisé à la fin du temps de retard douche et ainsi d'obtenir la zone trempée désirée à une dureté voulue. Dans notre cas, nous cherchons à durcir la zone du rayon poinçon de la tôle emboutie. Les tôles utilisées étant galvanisées, une marque reste visible en fin de trempe là où la température a atteint la température de fusion du revêtement (env. 420°C pour le Zinc). Nous pouvons donc comparer les résultats thermiques de notre modèle avec l'expérience. La figure 3 compare l'isotherme à 420°C calculée en fin de retard douche avec la marque laissée sur le revêtement dans pour une tôle emboutie percée en son centre ou non.

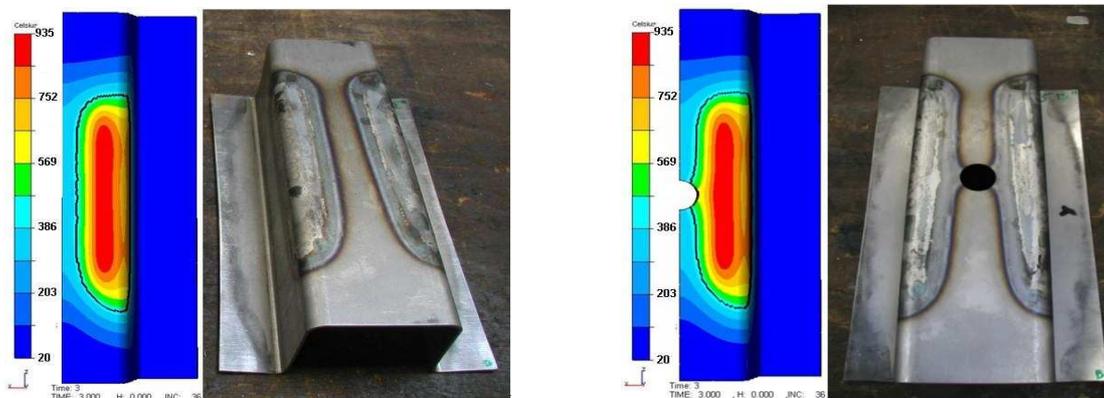


FIG. 3 – Photos des pièces après traitement thermique et isovaleur de température à 420°C après la simulation du retard douche.

Ce procédé génère des distorsions dans la tôle difficiles à maîtriser. La modélisation numérique nous a permis de cibler les phénomènes et couplages prépondérants dans le mécanisme de distorsion. La figure 4

présente l'état de déformation plastique et les déformations ayant pour origine les phénomènes de plasticité de transformation en fin de traitement thermique, après avoir relâché le système de bridage et donc après retour élastique.

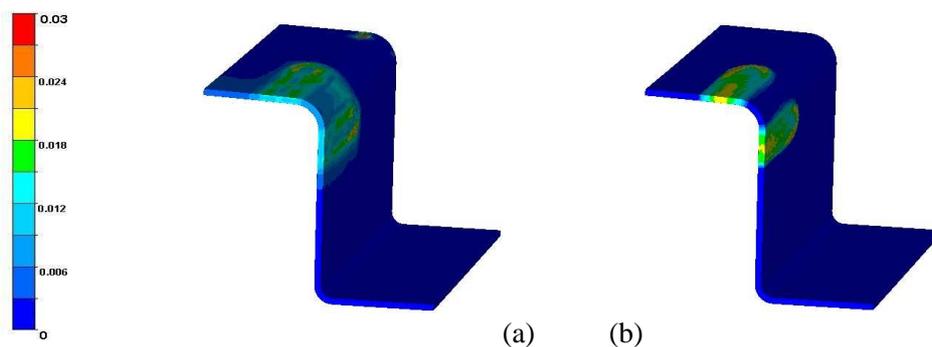


FIG. 4 – Champ de déformation plastique équivalente (en m/m) (a) et de déformation par plasticité de transformation (b) dans une pièce de l'essai LP1, après retour élastique

7 Conclusions

Nous avons développé un modèle numérique permettant de simuler des procédés de traitement thermiques couplant des phénomènes électromagnétiques, thermiques, mécaniques et métallurgiques. Ce modèle pourrait encore être enrichie mais cela augmenterait la principale difficulté que pose ce type d'approche macroscopique couplée. En effet, afin d'avoir des résultats de qualité, il est nécessaire d'avoir une très bonne connaissance des matériaux présents et un modèle numérique comme celui-ci demande de nombreux paramètres. Certains paramètres critiques peuvent même parfois être techniquement très difficiles voire impossible à déterminer. Par exemple, dans le cadre d'un matériau peut trempant, l'établissement d'un diagramme TTT (nécessaire à la détermination des paramètres de la loi d'Avrami) peut poser problème [5] alors que nous avons vu que la plasticité de transformation est prépondérante dans la génération des distorsions. Il est donc très important de faire les bonnes hypothèses simplificatrices adaptées au cas à simuler.

References

- [1] Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M., *Handbook of induction heating*, Marcel Dekker, 2003.
- [2] Gie H., Sarmant J. P., *Electromagnétisme*, Volume 1 et 2, Collection des sciences physiques, Technique et documentation, Lavoisier, 1985.
- [3] Bìrò O., Preis K., « Finite element analysis of 3-D eddy currents », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26, n° 2, p.418-423, 1990.
- [4] Chaboche J.L., « Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity », *Int. J. of Plast.*, vol. 5, p. 247-302, 1989.
- [5] Cardinaux D., Etude et modélisation numérique 3D par éléments finis d'un procédé de traitement thermique de tôles embouties après chauffage par induction, Thèse de doctorat, Mines ParisTech, 2008.
- [6] Bossavit A., *Electromagnétisme en vue de la modélisation*, vol.14 (coll. Mathématiques et Applications), Springer-Verlag, Paris, France, 1993.
- [7] Chaboudez C., Clain S., Glardon R., Mari D., Rappaz J., Swierkosz M., « Numerical modeling in induction heating for axisymmetric geometries », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, n° 1, p.739-745, 1997.
- [8] Bay F., Labbe V., Favennec Y., Chenot J-L., *A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol 58, pp 839-867, 2003.
- [9] Gay C., Contribution à la simulation numérique tridimensionnelle du forgeage à froid, Thèse de doctorat, ENSMP, 1995.
- [10] Zlamal M., « Finite element for non linear parabolic equations », *Rairo Num. Analysis*, vol. 11, p.93-107, 1971.
- [11] 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.
- [12] Leblond J.B., Devaux J., Devaux J.C., « Mathematical model of transformation plasticity in steels I: case of ideal-plastic phases », *Int. J. of Plast.*, vol. 5, p. 551-572, 1989.