

Modélisation 3D du chauffage en flux pseudo-transverse de brame au défilé

J.M. Dedulle, V. Poulbot, P. Sztulzaft, J. Morandini

DT2i

8 Chemin des Prêles - Zirst

38240 Meylan - France

Résumé - La mise au point des procédés industriels nécessite de plus en plus l'apport de la simulation numérique. Les procédés réels, tel que le chauffage par induction, font intervenir plusieurs phénomènes physiques [1-2], qui doivent être pris en compte de façon couplée dans la modélisation. L'objet de cet article est de présenter un modèle magnéto-thermique tridimensionnel, écrit dans le repère Lagrangien et implémenté dans le logiciel FLUX-EXPERT® [3-4]. Le modèle développé est appliqué à un dispositif de chauffage en flux pseudo-transverse.

Abstract - The technological advance of industrial processes require more and more numerical simulation and computer assisted design. The electromagnetic field and thermal coupled problems have been taken into account. This paper presents, a 3D magneto-thermal numerical model, expresses the transient phenomenon in Lagrangien referential. The 3D numerical model are solved by F.E.M. using FLUX-EXPERT software. The modelling is applied to a pseudo-transverse flux induction process.

I. INTRODUCTION

Grâce aux recherches des vingt dernières années, de nombreux procédés industriels nécessitant des opérations de chauffage font appel à des dispositifs de chauffage par induction. Les applications sont très nombreuses, qu'il s'agisse de traitement thermique de surface, de forgeage, de collage par polymérisation ou encore d'applications domotiques. Cependant la mise au point d'installations de chauffage par induction n'est pas chose aisée. Les inducteurs sont encore bien souvent dimensionnés de façon empirique, sur la base de l'expérience acquise par le constructeur, et le profil de puissance à injecter dans la pièce, obtenu par essais successifs. Aussi la conception assistée par ordinateur, basée sur la simulation numérique, des phénomènes magnétiques et thermiques, présente des avantages certains en termes de coût, de délai et d'optimisation, pour la mise au point des procédés de chauffage par induction.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à un procédé de réchauffage de brame d'acier par un dispositif de chauffage en flux pseudo-transverse. En effet entre deux étapes de laminage, les brames sont stockées sur une table d'attente. Du fait de la longueur des brames, il se produit un refroidissement de celles-ci. Il apparaît un gradient thermique important entre les deux extrémités, qui implique en final une inhomogénéité métallurgique du produit. Pour cette raison, il est souhaitable de réchauffer la pièce entre les deux trains de

laminage. Le chauffage par induction apparaît comme une technique appropriée pour réaliser cette homogénéisation en température, sans brûler les rives de brame. C'est également une technique très souple d'utilisation.

Le dispositif étudié est du type chauffage en flux pseudo-transverse. En effet l'inducteur vue en coupe (Figure 1) est composé de 4 groupes de trois conducteurs multicouches, alimentés de façon croisée en opposition de phase. La brame conductrice défile dans l'entrefer à une vitesse constante de 1m/s.

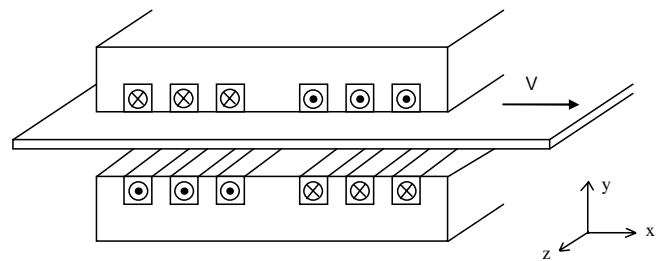


Fig.1: Géométrie du problème.

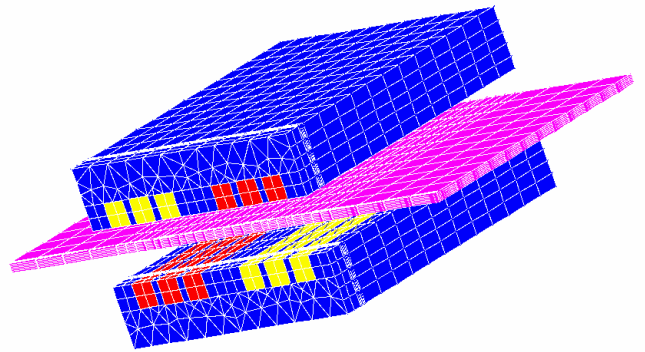


Fig.2: Géométrie et maillage symétrisé du dispositif

II. ANALYSE PHYSIQUE

Dans le problème à modéliser, la brame entre dans l'entrefer de l'inducteur à une température supérieure au point de Curie. On peut donc considérer qu'elle est amagnétique, et que ses propriétés magnétiques et thermiques, compte tenu de l'élévation de température désirée, sont indépendantes de la température. Le système à résoudre n'est donc couplé que par le terme de puissance injectée dans la brame.

A. Formulation magnétodynamique 3D

Le choix de la formulation dépend fortement de la méthode numérique utilisée. Les formulations en potentiels en particulier [4], sont bien adaptées aux éléments finis nodaux, principalement utilisés dans FLUX-EXPERT. Cette méthode nécessite la continuité de toutes les composantes de la variable d'état. Nous utiliserons donc une formulation en potentiel continu à dérivée discontinue. La formulation en quadrivecteur A-V (1) est la plus générale et la plus robuste. De plus les courants induits sont proportionnels à la variable d'état, ce qui implique une bonne précision sur le calcul de la puissance Joule injectée (Figure 3).

$$\begin{cases} \text{rot}(\mathbf{v}_r \text{ rot } \vec{A}) - \text{grad}(\mathbf{v}_p \text{ div } \vec{A}) + \mathbf{j} \mu_0 \sigma \omega \vec{A} + \mu_0 \sigma \text{grad } V = \vec{J} \\ \text{div } \sigma (\mathbf{j} \omega \vec{A} + \text{grad } V) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

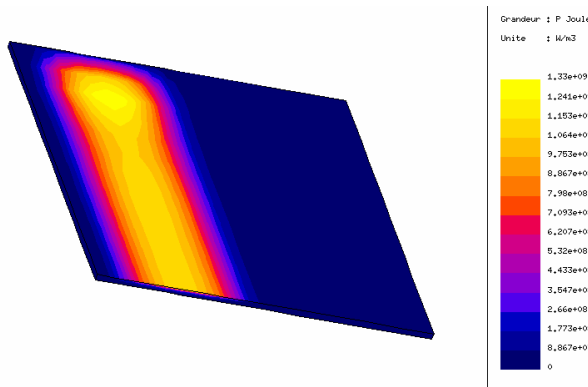


Fig.3: Répartition des pertes Joule dans la brame.

A. Formulation thermique 3D

Plutôt que de résoudre l'équation de diffusion de la chaleur dans le repère fixe (repère Eulérien), celle-ci sera écrite dans le repère mobile (2) lié à la brame (repère Lagrangien), ce qui permet d'éviter les problèmes d'instabilités numériques liés au nombre de Péclet important.

La source constituée par les pertes Joule doit alors être déplacée à chaque pas de temps dans ce repère. La solution adoptée, plus simple, consiste à déplacer le maillage de la brame par rapport à la source maintenue fixe. La source interne est ainsi réinterpolée à chaque pas sur les mêmes coordonnées, mais celles-ci correspondent à une localisation différente des points.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \left(-k \text{grad } T \right) = Q_{th} \quad (2)$$

Les phénomènes de surface sont pris en compte en explicitant aux interfaces les conditions aux limites (3) qui

permettent de tenir compte des échanges convectifs et radiatifs :

$$-k \text{grad } T \cdot \vec{n} = h(T - T_{amb}) + \sigma_s \varepsilon (T^4 - T_{amb}^4) \quad (3)$$

Dans la méthodologie développée le système résolu en couplage « faible », c'est-à-dire de façon séquentielle : magnétodynamique, puis thermique (Figure 4), permet de réduire de façon conséquente la taille du système à résoudre.

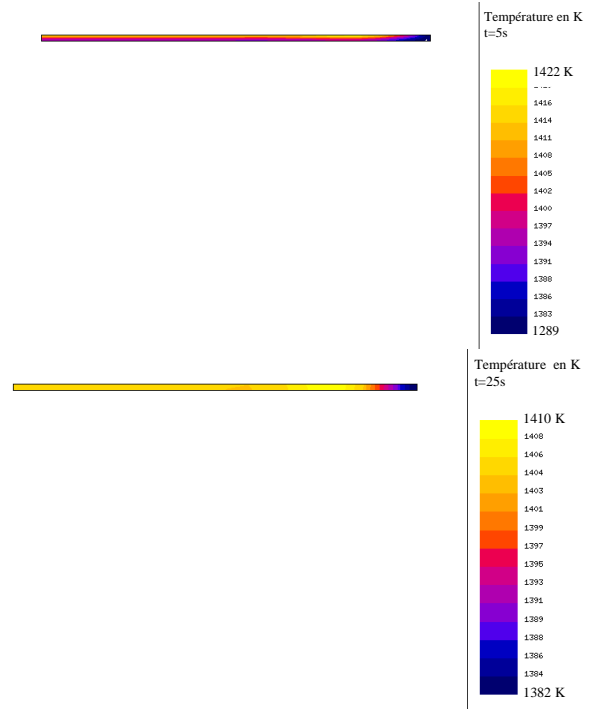


Fig. 4 : Isothermes en section de brame pour t=5s et 25s après la sortie de l'inducteur (phase d'homogénéisation)

Références

- [1] S. Wanser and al., "Computation of 3D induction hardening problems by combined finite and boundary element methods", *COMPUMAG*, November 1993
- [2] C. Guarneri and al., "Experimental thermal validation of two vector potential formulations in industrial transverse flux induction heating process", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 31, N°3, May 1995
- [3] P. Masse, "FLUX-EXPERT : un système d'aide à la construction de logiciels", *Thèse de Doctorat d'Etat*, Grenoble, 1983
- [4] FLUX-EXPERT est une marque déposée par DT2i, Meylan, France
- [5] O. Biro and K. Preis, "On the use of the magnetic vector potential in finite element analysis of three-dimensional eddy currents", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 25, N°4, July 1989