

Formage magnétique de raidisseurs pour composants aéronautiques

C. SOW^a, G. BAZIN^b, T. HEUZE^c, G. RACINEUX^c

a. IRT Jules Verne, Chemin du Chaffault, 44340 Bouguenais, France

b. STELIA Aerospace, 13 Boulevard des Apprentis, 44600 Saint-Nazaire, France

c. Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes cedex3, France (thomas.heuze@ec-nantes.fr, guillaume.racineux@ec-nantes.fr)

Résumé :

Les industriels de l'aéronautique conçoivent et fabriquent de nombreux composants de petite ($L_{max} < 200$ mm) et de moyenne taille (200 mm $< L_{max} < 1000$ mm) par élastoformage. Pour diversifier les moyens de productions de ces composants, cette étude propose d'évaluer la capacité du procédé de formage magnétique à produire des composants de petite taille. Le matériau utilisé ici est l'aluminium 2024-T4 et les plaques ont une épaisseur de 1, 2 ou 1,6 mm. Bien qu'il existe des centaines de références pour ces composants aéronautiques, ils sont tous conçus à partir d'un nombre limité de géométries élémentaires: bord tombé droit (BT1) ou droit interrompu (BT2), soyage (BT3), bord tombé concave (BT4) ou convexe (BT5), et trou bord tombé (BT6). Chaque géométrie nécessite la conception d'un inducteur et d'une matrice spécifique. La dispersion géométrique des pièces obtenues ainsi que leur intégrité ont été contrôlées et mesurées. La conception des outillages et des inducteurs a été optimisée via des modèles numériques développés avec l'environnement de calcul LS-DYNA. Une première comparaison qualitative montre un accord entre les résultats expérimentaux et numériques.

Mots clefs :

Formage par impulsion magnétique, raidisseurs, composants aéronautiques

1 Introduction

Si l'on place un matériau conducteur de l'électricité dans un champ magnétique variable \vec{H} alors il apparaît des courants induits \vec{j} dans cette pièce conformément à l'équation de Maxwell-Faraday :

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{avec} \quad \vec{j} = \gamma \vec{E} \quad \text{et} \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1)$$

où \vec{B} désigne l'induction magnétique, \vec{E} le champ électrique, γ et μ respectivement la conductivité électrique et la perméabilité magnétique du matériau. Les courants induits dans la pièce, étant eux-mêmes soumis au champ magnétique externe, ils sont le support de forces volumiques de Lorentz :

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

En emboutissage magnétique on utilise ces forces pour déformer des flancs et pour les plaquer sur des matrices [1]. Un inducteur remplace dans ce cas le poinçon. Le procédé de formage magnétique présente plusieurs avantages : la mise en forme ne dure quelques microsecondes ce qui contribue à la réduction du temps de cycle en production même s'il faut considérer le temps de charge des capacités ;

pour certains matériaux on constate un gain significatif de la limite à rupture qui permet, suivant les matériaux, de repousser les limites de formabilité (réalisation d'arêtes vives, limitation des opérations d'emboutissage par suppression des traitements thermiques, etc.) ; il est fait référence dans la littérature à une limitation du retour élastique [1]. Par exemple Uhlmann et al [2] ont observé une augmentation de la formabilité de l'alliage de magnésium AZ31B-O par formage par impulsion magnétique. Concernant la limitation du retour élastique les résultats expérimentaux qui pourraient le démontrer sont plus rares. Il est en effet difficile de séparer les effets de structure dynamique résultants de l'impact du flanc sur la matrice où les effets de rebond du retour élastique [3].

L'objectif de cette étude est d'évaluer la possibilité de produire de petites pièces aéronautiques par emboutissage par impulsions magnétiques. Ces pièces sont actuellement fabriquées par élastoformage. L'objectif est de réduire les temps de cycle tout en assurant la reproductibilité ainsi qu'une qualité géométrique et métallurgique satisfaisante des pièces.

Les entreprises aéronautiques fabriquent plusieurs centaines de petites pièces embouties, mais il existe un nombre limité de géométries élémentaires caractéristiques de ces familles de pièces. Le but de cette étude est de présenter le travail effectué pour développer des outils de formage pour l'une de ces géométries élémentaires, le bord tombé droit. Une attention particulière est portée à la qualité géométrique et métallurgique des pièces. Afin d'évaluer la reproductibilité dimensionnelle du processus, de petites séries de pièces ont été produites. Enfin, les premiers résultats obtenus sur une pièce, appelée échelle 1, sont présentés. Cette pièce intègre plusieurs géométries élémentaires ainsi que des simulations réalisées dans l'environnement informatique LS DYNA.

2 Matériaux et méthodes

La figure 1 présente les géométries élémentaires auxquelles nous nous sommes intéressés. Il s'agit de bords tombés droits continus (BT1) et interrompus (BT2), de soyages (BT3) de bords concaves (BT4) et convexes (BT5) et de trous bords tombés (BT6).

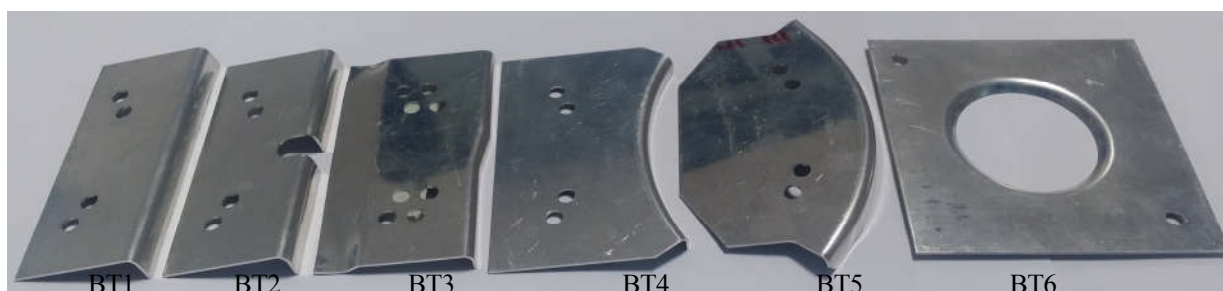


Figure 1 : géométries élémentaires

Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium laminé de type 2024 T4 (Tableaux 1 et 2) en tôles d'épaisseur 1 mm et 2 mm fabriqué par AMAG rolling GmbH. La largeur L des tôles est d'environ 100 mm.

Alloy	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ga
2024-T4	98,44	0,03	0,05	4,45	0,43	1,49	0,03	0,05	0,02	0,01

Tableau 1 : composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024-T4 utilisé (% en masse)

Direction	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A50 (%)
L	445	325	18
LT	435	300	18

Tableau 2 : propriétés mécaniques du 2024-T4 utilisé

Pour ces travaux nous avons utilisé un générateur de courant pulsé 46 kJ développé à l'Ecole Centrale de Nantes. Ses caractéristiques techniques sont indiquées dans le tableau 3.

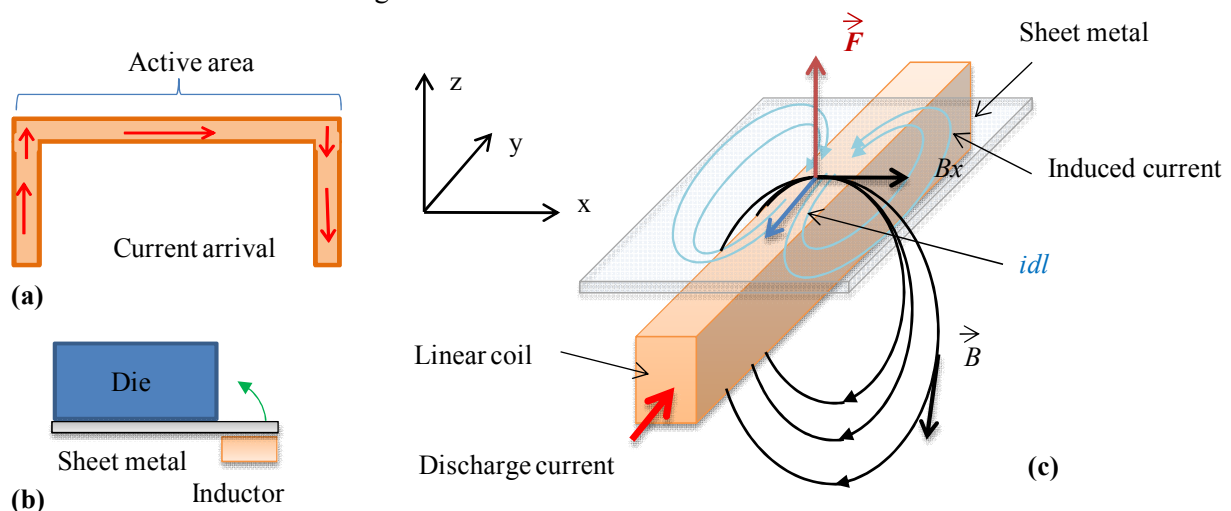
Tension de charge (kV)	Capacité (μF)	Inductance (μH)	Résistance (mΩ)	I _{max} (kA)
15	408	0,1	14	500

Tableau 3 : caractéristiques du générateur de 46 kJ de l'ECN.

Pour les essais nous avons utilisé des inducteurs en U dont la zone active est linéaire et de section rectangulaire (Figure 2 (a) et (b)). La figure 2 (c) présente schématiquement l'allure des lignes d'induction magnétique et de courants induits dans la tôle. Conformément à l'équation (2), l'inducteur exerce un effort dans la direction \vec{e}_z qui s'écrit :

$$F = j_x B_y - j_y B_x \quad (3)$$

Afin d'optimiser la tenue mécanique des inducteurs, nous avons choisi de les fabriquer en acier. Les matrices utilisées étaient en alliage d'aluminium AA 7075-T6.

**Figure 2** : (a) géométrie des inducteurs, (b) action de l'inducteur, (c) allure des courants induits et des lignes d'induction magnétique [2]

3 Résultats et discussion

3.1 Formage des bords tombés droits (BT1 et BT2)

La Figure 3 présente une séquence d'images capturées avec une caméra rapide Photron SA1 à 52 000 i/s en vue de dessus pour le formage de bords tombés droits (BT1) avec des tôles d'épaisseur $e=1$ mm. La hauteur du bord est de $H=10$ mm et le rayon intérieur de pliage $R_i=2,5$ mm. Plusieurs observations peuvent être faites :

- (i) on constate que les extrémités sont en retard par rapport au centre des bords à tomber. Cela signifie qu'il n'y a pas suffisamment d'efforts appliqués aux extrémités de la tôle. Cela se comprend qualitativement à partir de la figure 2 (c). L'inducteur droit ne permet pas d'induire des courants dans les coins de la tôle d'où un manque d'effort ;
- (ii) la partie centrale du bord impacte en premier la matrice (image 5) puis se décolle de la matrice (image 6) avant que les extrémités n'impactent la matrice (image 10) et ne se décollent à leur tour.

Le décollement de la tôle est dû au retour d'ondes dans la tôle (rebond) qui se fait continument au fur et à mesure que la tôle impacte la matrice ;

(iii) finalement on obtient une pièce avec des défauts de planéité, de rectitude et de perpendicularité important.

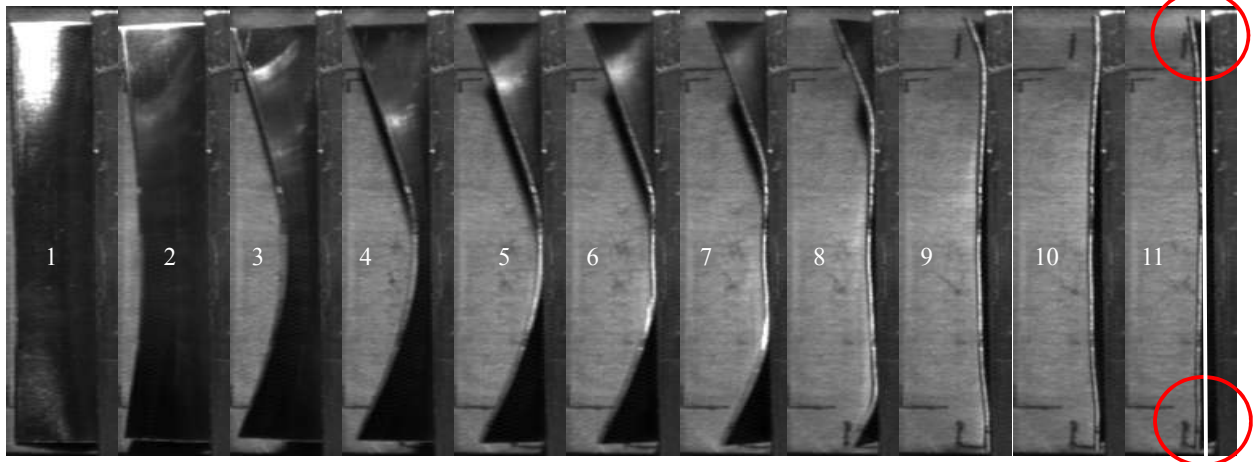


Figure 3 : évolution du formage de BT1 en vue de dessus

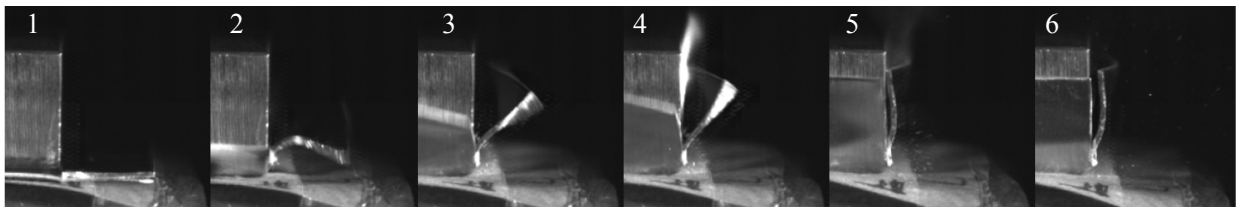


Figure 4 : évolution du formage de BT1 en vue de côté

Par ailleurs l'analyse des images du film réalisé en vue de côté (Figure 4) nous a permis de mesurer la vitesse d'impact du haut du bord tombé. Elle est d'environ 180 m/s. Connaissant le temps de placage $\Delta T = 130 \mu s$ il est possible d'évaluer un ordre de grandeur de la vitesse de déformation sur la surface externe du rayon de pliage (en $R_i + e$ sur la figure 5), en faisant l'hypothèse de l'existence d'une fibre neutre à la moitié de l'épaisseur de la tôle (en $R_i + e/2$ sur la figure 5) :

$$\dot{\epsilon} = \frac{\pi(R_i + e)/4 - \pi(R_i + e/2)/4}{\pi(R_i + e/2)/4} \times \frac{1}{\Delta T} = \frac{e/2}{(R_i + e/2)} \times \frac{1}{\Delta T} \approx 10^3 \text{ s}^{-1}$$

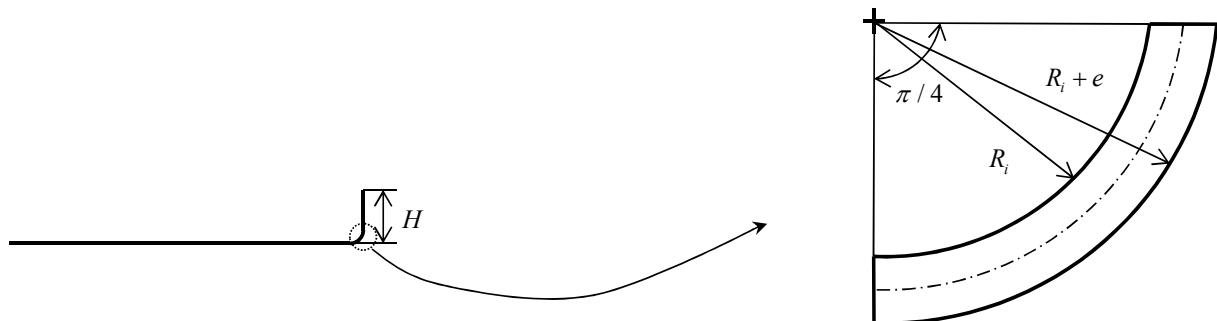


Figure 5 : congés de raccordement

Pour fabriquer des bords tombés droits continus (BT1) et interrompus (BT2) il est donc nécessaire que l'inducteur soit modifié à ses extrémités afin d'induire des courants dans les coins et donc permettre une répartition d'effort uniforme sur la longueur du bord. Le phénomène de rebond résulte du ratio d'impédance des matériaux impactant et impacté, ainsi que de la géométrie de la configuration de

plaquage qui génère à la fois des ondes de pression et des ondes de cisaillement à l'interface. Pour le moment, l'angle des matrices a été corrigé pour que la géométrie finale satisfasse les exigences de l'industriel. Par ailleurs, moyennant une re-conception des inducteurs (confidentielle pour le moment car un dépôt de brevet en cours) et des matrices il a été possible de fabriquer des bords BT1 et BT2 dans des tôles d'épaisseur 1 mm et 2 mm correctes (Figure 5).

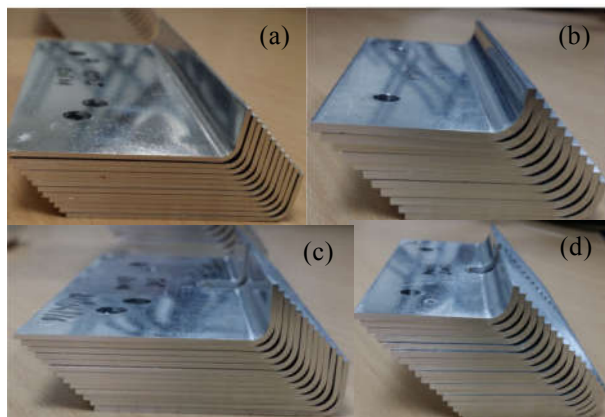


Figure 6 : (a) BT1-1 épaisseur 1 mm, (b) BT1-2 épaisseur 2 mm, (c) BT2-1 épaisseur 1 mm, (d) BT2-2 épaisseur 2 mm

3.2 Analyse des résultats

De petites séries de dix pièces ont été réalisées pour BT1 et BT2 afin d'évaluer la reproductibilité du procédé. Chaque pièce a été contrôlée géométriquement avec une machine à mesurer tridimensionnelle. Le Tableau 4 présente les résultats de mesure pour la rectitude, la planéité, le rayon de courbure et l'angle de courbure du bord tombé droit BT1. Les résultats obtenus sont satisfaisants au regard des tolérances imposées par l'industriel.

	Rectitude (mm)		Planéité (mm)		Rayon (mm)		Angle (°)	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
BT1-1	0,253	0,009	0,157	0,009	2,911	0,097	89,884	0,408
BT1-2	0,118	0,018	-	-	6,341	0,016	89,986	0,376
BT2-1	0,146	0,02	0,118	0,014	2,782	0,011	90,608	0,577
BT2-2	0,132	0,004	-	-	6,42	0,006	91,558	0,303

Tableau 4 : résultat du contrôle métrologique sur des échantillons de 10 pièces (rectitude et planéité des bords, rayon de pliage et angle de pliage)

Une étude métallurgique des matériaux dans la zone de pliage, après déformation dynamique, nous a permis de vérifier que les pièces fabriquées ne présentaient d'endommagement (Figure 7).

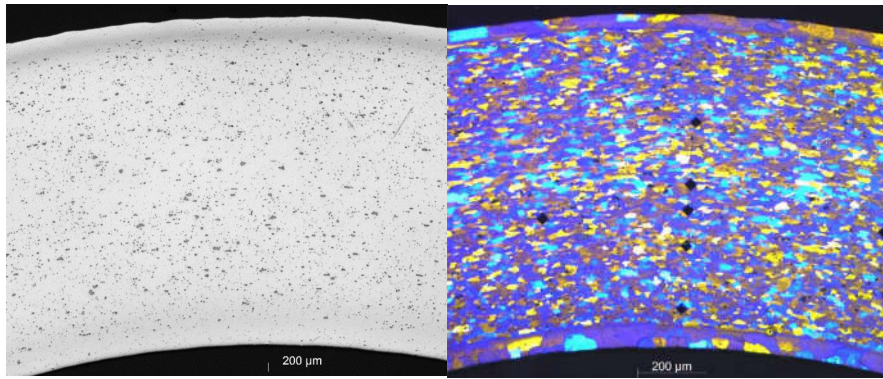


Figure 7 : caractérisation métallurgique après déformation rapide (brute de polissage à gauche, après oxydation anodique à droite)

3.3 Formage d'une pièce complexe

La Figure 8 présente une pièce échelle 1 qui comprend deux bords tombés droits, un soyaage et un trou bord tombé. En s'appuyant sur la conception des inducteurs pour réaliser les géométries élémentaires il est possible de concevoir l'allure générale de l'inducteur. Sur la pièce réalisée avec cet inducteur on peut toutefois constater que le bord tombé droit long n'est pas satisfaisant d'un point de vue rectitude et planéité. De même le soyaage n'est pas correctement formé (plis de flambement). Ces défauts sont dus aux interactions électromagnétiques des différentes parties élémentaires de l'inducteur.

Pour réaliser une pièce conforme il est donc nécessaire de réaliser une optimisation de la géométrie de l'inducteur. Cette optimisation peut être réalisée par simulation numérique.

La figure 8 présente une comparaison du résultat d'une simulation effectuée dans l'environnement LS DYNA (en bleu) avec la géométrie de la pièce réalisée numérisée (en rouge). Le problème numérique résolu est un problème couplé en thermique, mécanique et électromagnétisme [4]. La loi de comportement de Johnson-Cook a été identifiée au moyen d'essais de compression dynamique sur barre de Hopkinson. La pièce et l'inducteur ont été modélisés comme des solides et maillés avec des éléments HEXA8 et la matrice a été modélisée comme une coque et maillée avec des éléments QUAD4. Cinq éléments ont été utilisés dans l'épaisseur de la pièce. Le modèle complet comprend 48 000 éléments. La matrice et l'inducteur sont supposés rigides. La modélisation de la décharge électrique est effectuée classiquement via un circuit électrique RLC.

Afin d'optimiser la géométrie de l'inducteur échelle 1 nous réalisons actuellement un plan d'expérience numérique au moyen du logiciel LSDyna.



Figure 8 : formage magnétique d'une pièce échelle 1 / comparaison simulation avec le logiciel LS DYNA (en bleu) et pièce réelle (en rouge)

4 Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer la capacité du procédé d'emboutissage magnétique à produire des petites pièces aéronautiques en aluminium 2024-T4. Si la bobine induit des forces homogènes sur toute la longueur des bords à tomber, il est possible de produire des pièces de manière reproductible et géométriquement correctes. L'analyse métallurgique n'a révélé aucun endommagement dans l'aluminium 2024-T4 utilisé. Pour réaliser des pièces qui comprennent plusieurs bords tombés, il est nécessaire d'optimiser la géométrie des différentes parties de l'inducteur par rapport à la géométrie de l'inducteur définie pour réaliser un seul bord tombé. Cela est dû aux interactions électromagnétiques entre différentes parties de l'inducteur et de la tôle.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet HPP piloté par l'IRT Jules Verne. Les auteurs souhaitent remercier les partenaires industriels et universitaires de ce projet; respectivement AIRBUS, AIRBUS INNOVATIONS GROUP, CONSTELLIUM, EUROPE TECHNOLOGIES, STELIA AEROSPACE et l'Ecole Centrale de Nantes.

Références

- [1] V. Psyk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner, "Electromagnetic forming-A review", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 211, no. 5, pp. 787-829, (2011)
- [2] E. Uhlmann, L. Prasol, R. Kawalla, et al. "Extension of formability of the magnesium wrought alloy AZ31B-O at room temperature by pulse magnetic forming", 6th International Conference on High Speed Forming, (2014).
- [3] W. Xiong, W. Wang, M. Wan, L. Pan "Effect of the duration of electromagnetic pulse force on the rebound suppression in V-bending experiment", 6th International Conference on High Speed Forming, (2014)
- [4] P. L'Eplattenier, G. Cook, C. Ashcraft et al. "Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic Simulations", *Steel Research International*, vol. 80, no 5, p. 351-358, (2009)