HAL open science

Identification du comportement mécanique dynamique de tubes d'aluminium par un essai d'expansion électromagnétique

Anne-Claire Jeanson, Gilles Avrillaud, Gilles Mazars, François Bay, Elisabeth Massoni, Nicolas Jacques, M. Arrigoni

To cite this version:

Anne-Claire Jeanson, Gilles Avrillaud, Gilles Mazars, François Bay, Elisabeth Massoni, et al.. Identification du comportement mécanique dynamique de tubes d'aluminium par un essai d'expansion électromagnétique. CSMA 2013 - 11ème colloque national en calcul des structures, May 2013, Giens, France. hal-00861335

HAL Id: hal-00861335

https://minesparis-psl.hal.science/hal-00861335v1

Submitted on 12 Sep 2013

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.

CSMA 2013
11e Colloque National en Calcul des Structures
13-17 Mai 2013

Identification du comportement mécanique dynamique de tubes d'aluminium par un essai d'expansion électromagnétique

Anne-Claire JEANSON [1] , Gilles AVRILLAUD [2], Gilles MAZARS [2], François BAY [1], Elisabeth MASSONI [1], Nicolas JACQUES [3], Michel ARRIGONI [3]

1 Cemef, MINES ParisTech, 1 rue Claude Daunesse, CS10207-06904 Sophia Antipolis Cedex ;
{anne-claire.jeanson ; francois.bay ; elisabeth.massoni}@mines-paristech.fr

2 B-MAX, 30 Bd de Thibaud, CS10433-31104 Toulouse Cedex ;
{gilles.avrillaud ; gilles.mazars}@icube-research.com

3 LBMS, ENSTA Bretagne, 2 Rue François Verny, 29806 Brest Cedex9 ;
{nicolas.jacques ; michel.arrigoni}@ensta-bretagne.fr

* Auteur correspondant

Résumé — Les vitesses de déformation mises en jeu au cours du magnétoformage sont de l'ordre de 10^2 à 10^4 s^{-1}. La maîtrise du procédé exige donc la caractérisation des métaux dans ces conditions de déformation. Cet article présente la mise en place d'une démarche d'identification du comportement dynamique basée sur un essai d'expansion de tube instrumenté à l'aide d'un système de mesure de vitesse par interférométrie doppler-laser. Les simulations numériques sont réalisées à l'aide du code LS-Dyna®, et l'analyse inverse est menée grâce à l'interface d'optimisation LS-Opt®. Après une analyse numérique, des résultats d'identification sur tubes d'aluminium 1050-O sont présentés.

Mots clés — magnétoformage, comportement dynamique, identification, expansion de tube

1. Introduction

Le procédé de magnétoformage [14] est utilisé pour le formage de tôles ou de tubes métalliques électriquement conducteurs. Il repose sur la décharge rapide de forts courants dans un inducteur (bobine) placé à proximité de la pièce à former (cf. Figure 1). Le couplage entre le champ magnétique créé par l'inducteur, et les courants induits dans la pièce par les variations de ce même champ magnétique, génère des forces de Lorentz qui, si elles sont suffisamment importantes, permettent la mise en forme de la tôle. Ce procédé de formage prend généralement place dans un moule.

La mise au point des procédés de magnétoformage est souvent complexe à réaliser, en particulier du fait des nombreux couplages multiphysiques impliqués dans le procédé. Cela nécessite de s'appuyer sur une démarche de modélisation numérique requérant une description précise du comportement des matériaux mis en jeu. Un des principaux enjeux est alors de déterminer au mieux le comportement des matériaux lors de sollicitations dynamiques. En effet, la durée d'une opération de magnétoformage est de l'ordre d'une centaine de microsecondes, les vitesses de déformation associées pouvant aller de 100 à 10 000 s^{-1}. Le comportement mécanique peut alors être modifié et s'éloigner du comportement observé sous sollicitations quasi-statiques [14] [4].

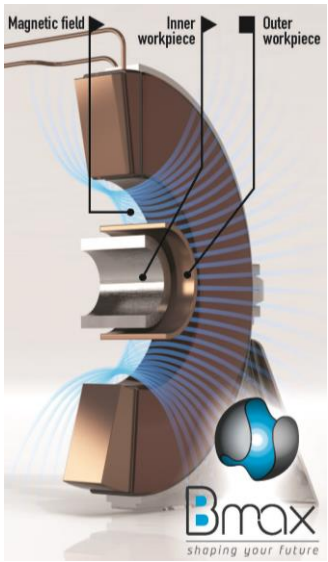

Fig. 1. Le champ magnétique généré par la bobine (pièce massive à l'extérieur) provoque le rétreint d'un tube autour d'un autre tube placé à l'intérieur

L'objectif est d'établir une démarche d'identification du comportement, afin d'assurer un véritable caractère prédictif à la simulation numérique du magnétoformage. Cet article présente la mise au point numérique et expérimentale d'une méthodologie d'identification du comportement des métaux par un essai d'expansion électromagnétique de tube [5] [15] [7] [8].

2. Démarche

2.1. Modèle d'écrouissage : loi de Johnson-Cook

Le choix d'un modèle d'écrouissage conditionne en grande partie la pertinence et la faisabilité de l'identification du comportement mécanique. La loi d'écrouissage détermine l'allure générale de la relation entre contraintes, déformations, vitesse de déformation et température ; son adéquation à de larges domaines de sollicitation dépend en particulier de sa complexité, qui nécessite un nombre plus ou moins élevé de paramètres. On recense plusieurs familles de lois d'écrouissage dynamiques :

- les modèles dits "phénoménologiques" : par exemple des modèles en loi puissance [9] [19], le modèle de Cowper-Symonds [2], le modèle de Johnson-Cook [10]. Ce sont des lois établies de manière à traduire au mieux le résultat de l'expérience, sans s'appuyer sur une analyse fine des phénomènes sous-jacents. Leur forme simple les rend faciles d'utilisation et leurs paramètres – peu nombreux – sont en principe aisément identifiables. En contrepartie, leur justification physique est moins évidente, ce qui confère à ces modèles une validité restreinte : souvent la loi identifiée ne peut pas être extrapolée bien au-delà du domaine investigué lors des essais.

- les modèles issus de l'analyse de l'activation thermique [16] : parce qu'ils cherchent à s'appuyer sur les mécanismes mis en jeu, ils ont pour ambition d'avoir un domaine de validité plus étendu. L'analyse de l'activation thermique (augmentation de la mobilité des dislocations par l'augmentation de leur capacité à franchir les obstacles) est la source de ces modèles. Ces modèles peuvent schématiquement se partager en deux classes : les modèles à variables internes standard ($\bar{\varepsilon}_{pl}, \dot{\bar{\varepsilon}}_{pl}, T$) [13] [20] [18] ; et les modèles qui introduisent une variable interne supplémentaire, de nature microstructurale [12] [4] [11]. L'intérêt de ce dernier type de modèle est en particulier d'intégrer des effets d'histoire de la vitesse de déformation dans la description du comportement.

- les modèles établis pour les mécanismes liés au choc et au traînage visqueux [17] [13] ou encore les modèles hydrodynamiques. Ils sont adaptés aux sollicitations à très grande vitesse de déformation et à haute pression, qui sortent du cadre de cette étude.

On a choisi, pour la mise au point de la méthode, le modèle de Johnson-Cook [10] : avec un nombre restreint de paramètres (*A*, *B*, *n*, *C*, *m*), il est supposé adéquat dans la gamme de vitesses de déformation visée (100 à 10000 s^{-1}), et des variantes [1] peuvent permettre de modéliser des comportements plus complexes comme, par exemple, une brusque augmentation de la sensibilité à la vitesse de déformation à partir d'un niveau de vitesse de déformation critique (de l'ordre de 10^3 – 10^5 s^{-1}) [4].

La loi de Johnson-Cook dite « modifiée » [1] est un modèle d'écrouissage dynamique de la forme :

$$\bar{\sigma} = (A + B.\bar{\varepsilon}^n).\left(1 + C.\left[\ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right)\right]^p\right).\left(1 - \left[\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right]^m\right) \quad (1)$$

$\bar{\sigma}$ est la contrainte équivalente selon le critère de von Mises ;
$\bar{\varepsilon}$ est la déformation plastique équivalente ;
$\dot{\bar{\varepsilon}}$ est la vitesse de déformation équivalente, et $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ une vitesse de déformation de référence ;
p est un paramètre égal à 1 dans la version initiale de Johnson-Cook [10] ;
T est la température, T_0 est la température initiale (de référence), T_f est la température de fusion.

Pour cette étude, l'effet de la température sur le comportement matériau est négligé, pour plusieurs raisons. D'abord, parce que les échauffements provoqués par le procédé (conséquence de la déformation plastique et de l'effet Joule) sont limités pour les matériaux bons conducteurs et de résistance mécanique raisonnable. Par exemple, on estime par le calcul numérique que pour le cuivre

OFHC, l'aluminium 2024 T351 et le nickel 200, l'élévation de température est de l'ordre d'une centaine de degrés pour atteindre une déformation plastique de 30%. Ensuite, parce que l'on ne dispose pas de moyen de mesure de température suffisamment fiable à ces vitesses d'échauffement (la température maximale est atteinte en une centaine de microsecondes). Par ailleurs, l'effet de l'échauffement adiabatique sur le comportement mécanique se traduit généralement par une réduction de l'écrouissage apparent du matériau. On se propose donc, dans la mesure où les échauffements restent faibles, d'accepter que les éventuels effets thermiques soient intégrés implicitement dans les paramètres identifiés.

On se concentre donc sur le couplage de l'écrouissage et de l'effet de la vitesse de déformation, ce qui revient à la simplification suivante de la loi de Johnson-Cook, à quatre paramètres (pour les premières identifications qui seront présentées ici, on a fixé p=1, afin de vérifier la nécessité de ce paramètre pour le matériau et la gamme de vitesse de déformation mise en jeu) :

$$\bar{\sigma} = (A + B.\bar{\varepsilon}^n).\left(1 + C.\left[\ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right)\right]^p\right) \quad (2)$$

A donne la valeur de la limite d'élasticité pour la vitesse de déformation de référence ($\dot{\bar{\varepsilon}}_0$) ; B et n qualifient l'écrouissage ; C donne la sensibilité à la vitesse de déformation.

Afin de quantifier la sensibilité de la contrainte équivalente aux différents paramètres de la loi, on calcule les quantités suivantes : $\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial A}.\frac{A}{\bar{\sigma}}$; $\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial B}.\frac{B}{\bar{\sigma}}$; $\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial n}.\frac{n}{\bar{\sigma}}$; $\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial C}.\frac{C}{\bar{\sigma}}$ pour différents niveaux de déformation et de vitesse de déformation. On vérifie ainsi que : A et n sont les plus influents quand la déformation plastique est faible ; B est le plus influent lorsque la déformation plastique est grande ; C est le plus influent lorsque la vitesse de déformation est grande. Dans une stratégie d'identification de paramètres, il sera donc intéressant de viser à identifier chacun de ces paramètres dans son domaine de plus grande influence.

2.2. Essai dynamique : expansion électromagnétique de tube

L'essai repose sur le principe suivant : Un générateur impulsionnel génère, en quelques dizaines de microsecondes, un courant issu de la décharge de 1 à 6 condensateurs, et dont l'amplitude est de quelques dizaines de kiloampères pour une tension de quelques kilovolts. Ce courant impulsionnel est acheminé vers une bobine hélicoïdale placée au centre du tube à déformer. La circulation du courant dans la bobine provoque l'expansion du tube dans la direction radiale [7] [8].

Cet essai est dérivé du test d'expansion électromagnétique d'anneau [5], connu pour sa capacité à mettre en évidence le comportement dynamique des métaux [6] [15]. Il peut être réalisé avec une bobine et un générateur industriels, reproduisant ainsi des conditions de formage industrielles : le comportement étudié grâce à cet essai correspond donc aux gammes de vitesse de déformation rencontrées au cours du formage électromagnétique.

L'essai est simulé numériquement à l'aide du code LS-Dyna®, dans une version bêta équipée d'un solveur électromagnétique couplé aux solveurs mécanique et thermique. Le calcul électromagnétique repose sur un couplage entre éléments finis (dans la pièce à former et la bobine) et des éléments frontière dans l'air, ce qui évite de mailler l'air entre la pièce et la bobine. La formulation proposée repose sur une simplification des équations de Maxwell en négligeant le terme de propagation : cette approximation (dite des régimes quasi-permanents) est valable à basse ou moyenne fréquence, ce qui est le cas des courants pour le magnétoformage.

Le tube et la bobine sont maillés avec des éléments solides hexaédriques. Les maillages sont anisotropes de manière à optimiser le nombre d'éléments tout en garantissant la précision de calcul dans les directions les plus contraignantes. Des études de convergence ont permis de déterminer les tailles de maille et le pas de temps électromagnétique optimaux dans la configuration choisie. La bobine hélicoïdale comporte 12 spires à section carrée de 6 mm de côté, pour un diamètre extérieur de 50 mm et un pas de 7 mm ; le tube a pour diamètre extérieur 54 mm, une hauteur de 80 mm et une épaisseur de 0.7 mm.

Différentes conditions d'expansion sont simulées à l'aide de modèles 3D et comparées aux résultats expérimentaux de [3]. Les résultats de simulation donnent une très bonne estimation de l'allure finale

du tube dans chacune des configurations (cf. Figure 2). On vérifie ainsi qu'une déformation uniforme peut être obtenue lorsque le tube et la bobine sont de même longueur. Cette configuration favorise en effet l'uniformité du champ magnétique. Par le calcul, on montre également que l'essai est peu sensible aux éventuels défauts de positionnement initial du tube.

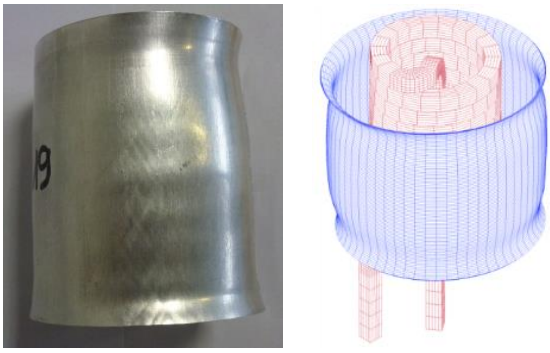

Fig. 2. Tube magnétoformé et Résultat de simulation pour un tube et une bobine de même hauteur

A titre d'exemple, les ordres de grandeur des évolutions temporelles du courant imposé dans la bobine, du courant induit dans le tube, de la vitesse d'expansion radiale, de la vitesse de déformation, des composantes principales du tenseur des contraintes et de la déformation plastique équivalente, sont présentées sur la figure 3.

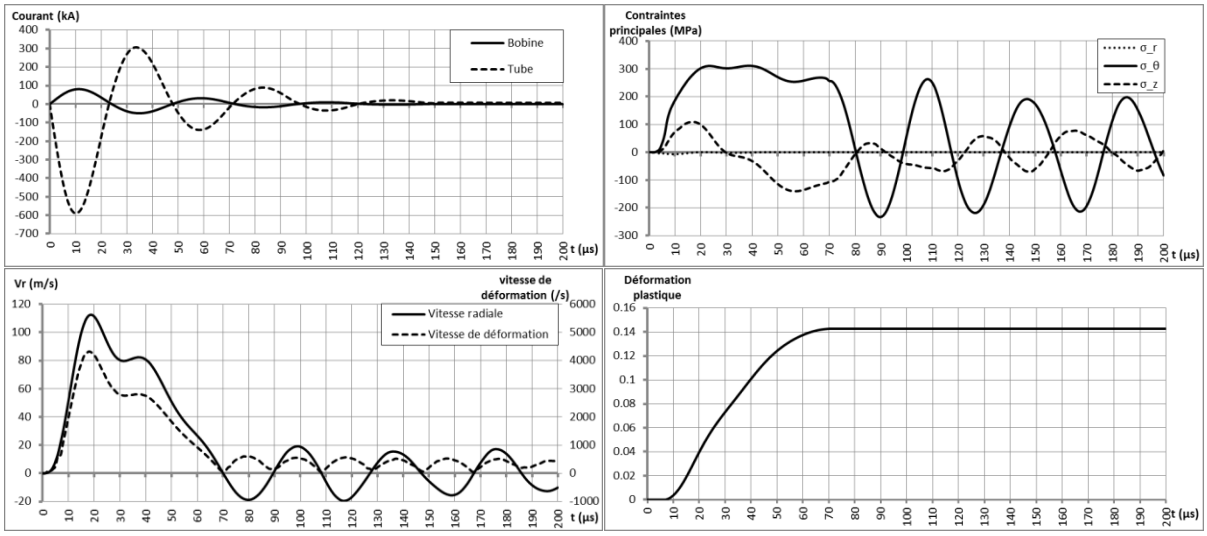

Fig. 3. Simulation avec courant imposé dans la bobine, courant induit dans le tube, vitesse d'expansion radiale, vitesse de déformation, composantes principales du tenseur des contraintes, déformation plastique équivalente au cours d'un essai d'expansion de tube

2.3. Dispositif expérimental et procédure générale d'identification

L'observable choisi pour mener l'identification est la vitesse radiale d'expansion du tube. Le montage expérimental est donc instrumenté à l'aide des éléments suivants (cf. Figure 4) : un enroulement de Rogowski permettant la mesure du courant impulsionnel en sortie de générateur, et un système de mesure de vitesse par interférométrie doppler-laser (PDV : photon doppler velocimeter) visant sur la face externe du tube. Ces deux sondes sont reliées à un oscilloscope dont l'acquisition est déclenchée par l'apparition d'un signal de courant. Après traitement de ces signaux, on dispose donc, pour chaque essai, des mesures de courant et de vitesse d'expansion.

Le modèle numérique d'expansion d'anneau est optimisé de manière à réduire les temps de calcul : puisque les conditions de formage sont uniformes dans la configuration choisie, un modèle 2D axisymétrique peut être utilisé. Les données d'entrée de la simulation sont les géométries initiales, le courant dans la bobine, et les paramètres matériau.

L'identification repose sur une démarche par analyse inverse : une fois le résultat de l'essai connu, de nombreuses simulations sont menées, prenant en entrée la mesure de courant issue de l'expérience et des jeux de paramètres pour la loi d'écrouissage déterminés à l'aide d'un outil d'optimisation. Dans le cas du modèle d'écrouissage de Johnson-Cook, l'objectif est de déterminer les valeurs des paramètres *A*, *B*, *n* et *C*. Une interface d'optimisation, LS-Opt®, calcule la fonction-coût, définie par l'écart au sens des moindres carrés entre les courbes de vitesse radiale issues de l'essai et de chaque simulation. LS-Opt fournit ensuite au calcul suivant un nouveau jeu de paramètres matériau, et ceci jusqu'à ce que les courbes de vitesse soient le plus proches possible (en d'autres termes, jusqu'à ce que la fonction-coût soit minimale). Pour cela, un algorithme d'optimisation hybride est utilisé, combinant un algorithme de recherche globale (de manière à éviter un minimum local) et un algorithme de recherche par gradient (permettant d'affiner la solution).

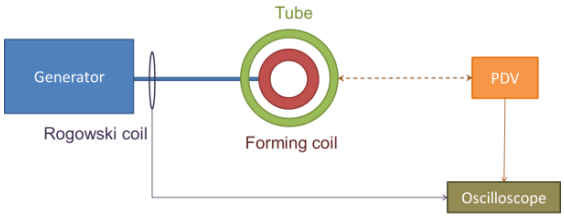

Fig. 4. Schéma du montage expérimental

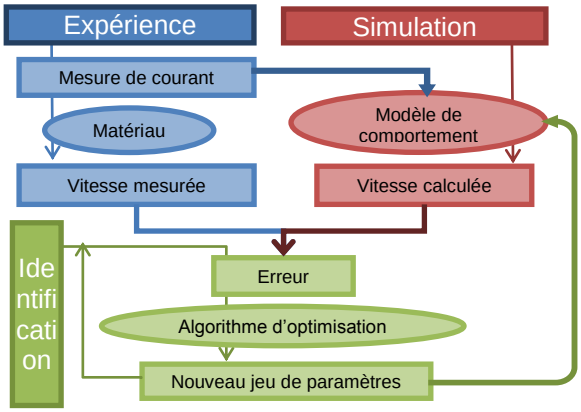

Fig. 5. Procédure générale d'identification

3. Résultats

3.1. Validation numérique de la méthode

On introduit dans un modèle numérique d'expansion de tube les paramètres suivants : A = 83 MPa ; B = 426 MPa ; n = 0.35 ; C = 0.025 ($\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ = 1s^{-1}). Pour un chargement donné en courant, cela fournit une courbe de vitesse radiale, à partir de laquelle on essaie de retrouver les paramètres de la loi de comportement par une analyse inverse « à la main ». Un jeu de paramètres quelconque est choisi pour démarrer l'identification : A = 337MPa ; B = 343MPa ; n = 0.41 ; C = 0.01. Par itérations successives sur les paramètres, l'objectif est de retrouver la courbe de vitesse radiale de la simulation cible. Quatre étapes de la recherche des paramètres sont présentées sur la Figure 6 et dans le tableau 1.

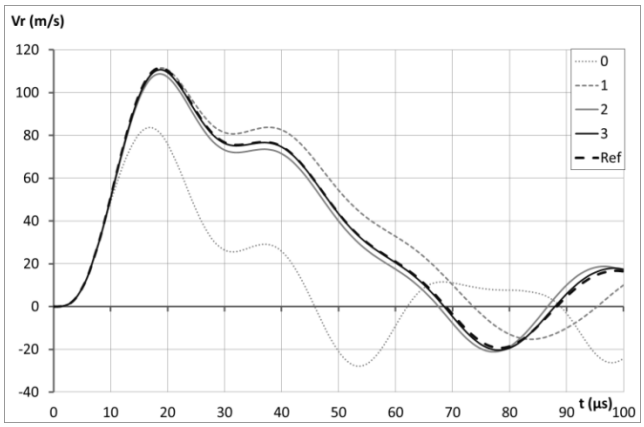

Fig. 6. Evolution de la vitesse radiale au cours de l'identification

Sur la courbe de vitesse radiale, l'identification paraît très satisfaisante (la courbe 3 coïncide presque parfaitement avec la courbe de référence). Toutefois, il faut y associer les réserves suivantes : on est parvenu à ce résultat en ne travaillant que sur *A* et *B*, il n'a pas été nécessaire de modifier *n* et *C*.

Il est donc à craindre que ce seul essai ne soit pas suffisamment discriminant. De plus, le jeu de paramètres identifié est assez éloigné du jeu de paramètres que l'on espérait retrouver (cf. Tableau 1).

	A (MPa)	B (MPa)	n	C
0 (paramètres initiaux)	337	343	0.41	0.010
1	135	343	0.41	0.010
2	135	450	0.41	0.010
3 (paramètres identifiés)	120	470	0.41	0.010
Ref (paramètres cible)	83	426	0.35	0.025

Tab. 1. Comparaison des paramètres identifiés aux paramètres recherchés

Pour s'assurer de la pertinence de l'identification, les paramètres sont introduits dans la loi de Johnson-Cook, et l'on trace les comportements correspondants sur les graphes ci-dessous (contrainte équivalente de Von Mises en fonction de la déformation plastique équivalente), pour quatre vitesses de déformation :

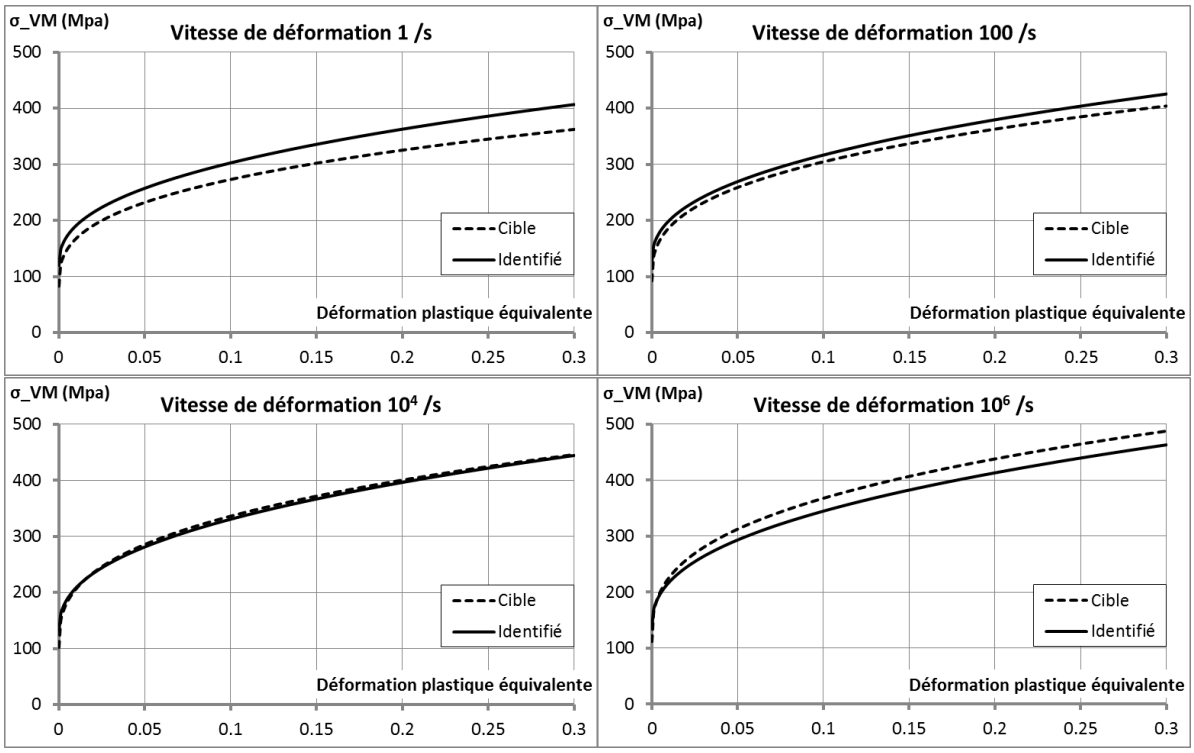

Fig. 7. Comparaison du comportement identifié au comportement recherché

On déduit de tout cela que même si le jeu de paramètres identifié n'est pas le jeu de paramètres attendu, il permet de très bien représenter le comportement pour des vitesses de déformation voisines de 10^4 s^{-1}, ce qui correspond effectivement aux vitesses de déformation de l'essai d'expansion de tube (la vitesse de déformation maximale est d'environ 4500 s^{-1}).

On en conclut que, pour le modèle de Johnson-Cook :

- la solution du problème d'identification n'est pas unique lorsqu'elle est recherchée sur un seul essai d'expansion ;
- la solution ainsi identifiée n'est valable que dans un domaine de vitesse de déformation représentatif de l'essai.

Ces observations incitent donc à mener l'identification sur plusieurs essais à différents niveaux d'énergie, de manière à augmenter l'espace des $\{\bar{\sigma}\ ;\ \bar{\varepsilon}\ ;\ \dot{\bar{\varepsilon}}\}$ sur lequel est exigée la validité des paramètres de la loi de comportement (ces différents niveaux d'énergie peuvent être générés en modulant le nombre de condensateurs et leur tension de charge U_0). L'utilisation de l'interface d'optimisation LS-Opt devient alors nécessaire. Pour chaque paramètre, un point de départ et les bornes du domaine de recherche sont spécifiées dans le tableau 2.

Paramètre	Valeur cible	Point de départ	Borne min	Borne max
A (MPa)	83	400	80	800
B (MPa)	426	460	300	600
n	0.35	0.38	0.3	0.42
C	0.025	0.035	0.01	0.06

Tab. 2. Valeurs recherchées des paramètres et spécifications du domaine de recherche

Trois optimisations sont soumises grâce à LS-Opt, comprenant respectivement un, deux ou trois essais correspondant à différentes tensions de charge d'un condensateur. Lorsque les quatre paramètres sont soumis simultanément à l'optimisation, l'ordre de grandeur du paramètre *A* est obtenu bien plus rapidement et précisément que les trois autres paramètres. Une deuxième série d'optimisations a donc été tentée, en supposant cette fois le paramètre *A* connu (83 MPa) ; les résultats sont présentés dans le tableau 3. L'identification est donc plus précise lorsqu'elle est menée avec deux ou trois essais d'énergies différentes. Ces observations sont conformes à ce qui est rapporté par [8].

Paramètre	Valeur cible	1 essai, U_0 = 12.5 kV	2 essais, U_0= 10 kV, U_0= 15 kV	3 essais, U_0= 10 kV, U_0= 12.5 kV, U_0= 15 kV
B (MPa)	426	410	425	430
n	0.35	0.325	0.35	0.35
C	0.025	0.027	0.025	0.025

Tab. 3. Valeurs recherchées de *B*, *n* et *C* et valeurs identifiées avec 1, 2 ou 3 essais

3.2. Application à des tubes d'aluminium 1050

Des tubes d'aluminium 1050 recuits (à l'état non écroui O) sont soumis au test d'expansion électromagnétique. Différents niveaux d'énergie sont appliqués. Pour les identifications, le paramètre *A* est confiné à des valeurs proches des limites d'élasticité statiques fournies par la littérature (soit, de l'ordre de 40 à 80 MPa à l'état recuit), qui est associé à une vitesse de déformation de référence $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ = 1 s^{-1}. Les identifications menées pour deux niveaux d'énergie sont présentées sur la Figure 8 et montrent un résultat satisfaisant avec la loi de Johnson-Cook initiale (soit, avec p=1). La variante proposée ($p\neq1$) pourrait toutefois affiner l'identification.

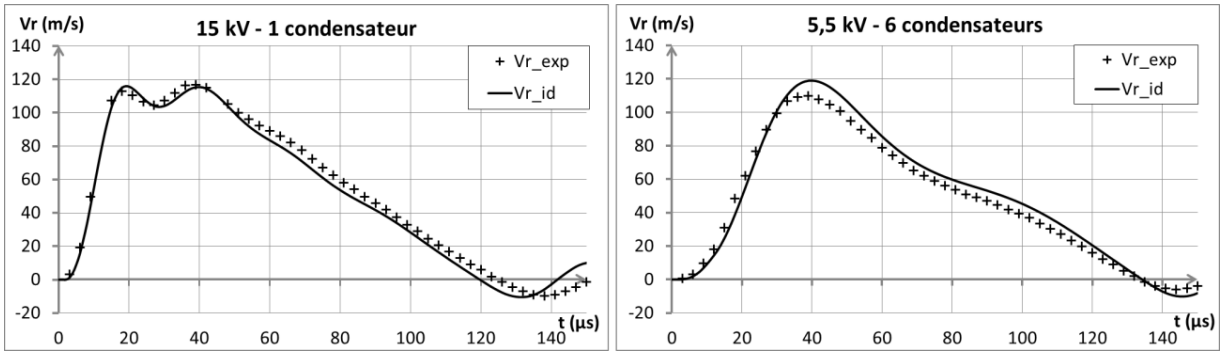

Fig. 8. Vitesses radiales expérimentales à deux niveaux d'énergie, et vitesses radiales simulées pour le jeu de paramètres identifié : A=80 MPa ; B=100 MPa ; n=0.36 ; C=0.035

4. Conclusion

Une démarche de caractérisation du comportement dynamique basée sur un essai d'expansion électromagnétique de tube est a été mise en place expérimentalement et numériquement. Son application à l'identification par analyse inverse des paramètres du modèle de comportement de Johnson-Cook a permis de montrer la nécessité d'identifier sur plusieurs essais pour assurer la validité des paramètres identifiés dans une gamme suffisante de vitesses de déformation. Pour des tubes d'aluminium 1050-O, la version initiale du modèle de Johnson-Cook fournit un résultat satisfaisant.

Références

[1] K. Ahn, H. Huh, L. Park. Comparison of dynamic hardening equations for metallic materials with the variation of crystalline structures, 5th International Conference on High Speed Forming, 2012

[2] G. Cowper, P. Symonds. Strain hardening and strain rate effect in the impact loading of cantilever beams, Technical report, Brown University, Division of Applied Mathematics, 1957.

[3] M. Dehra. High velocity formability and factors affecting it, Phd Thesis, Ohio State University, 2006.

[4] P. Follansbee, U. Kocks. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable, Acta Metallurgica 36, p.81-93, 1988.

[5] W. Gourdin. Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test, Journal of Applied Physics 65(2), p.411-422, 1989.

[6] W. Gourdin, D. Lassila. Flow stress of OFE copper at strain rates from 10^3 to 10^4 s^{-1}: Grain-size effects and comparison to the mechanical threshold stress model, Acta Metallurgica et Materialia 39, p.2337-2348, 1991.

[7] I. Henchi. Validation of the electromagnetism module in LS-DYNA, design of magnetic metal forming experiments and parameter identification of material models, Rapport de stage LSTC - UTT, 2007.

[8] I. Henchi, P. L'eplattenier, G. Daehn, Y. Zhang, A. Vivek, N. Sander. Material constitutive parameter identification using an electromagnetic ring expansion experiment coupled with LS-DYNA and LS-OPT, Proceedings of the 10th International LS-DYNA Users' Conference, 2008.

[9] P. Jeunechamps. Simulation numérique, à l'aide d'algorithmes thermomécaniques implicites, de matériaux endommageables pouvant subir de grandes vitesses de déformation. Application aux structures aéronautiques soumises à impact. Phd Thesis, Université de Liège, 2008.

[10] G. Johnson, W. Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, Proceedings of the 7th international symposium on ballistics, Hague, Netherlands, p.541-547, 1983.

[11] J. Klepaczko. Modélisation des lois de comportement basée sur l'évolution de la microstructure dans un large domaine de vitesses de déformation, Journal de Physique, Colloque C5, supplément au n°8, Tome 46, p.57-66, 1985.

[12] A. Molinari, G. Ravichandran. Constitutive modeling of high-strain-rate deformation in metals based on the evolution of an effective microstructural length, Mechanics of Materials 37, p.737-752, 2005.

[13] D. Preston, D. Tonks, D. Wallace. Model of plastic deformation for extreme loading conditions, Journal of Applied Physics 93, p.211-220, 2003.

[14] V. Psyk, D. Risch, B. Kinsey, A. Tekkaya, M. Kleiner. Electromagnetic forming - A review, Journal of Materials Processing Technology 211, p.787-829, 2011.

[15] M. Sedighi, M. Khandaei, H. Shokrollahi. Identification of optimized constitutive model parameters at a high strain rate using electromagnetic ring expansion test results, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers PartC, Journal of Mechanical Engineering Science, 225, p.781-789, 2011.

[16] A. Seeger. The mechanism of glide and work hardening in face-centered cubic and hexagonal close-packed metals, Dislocations and mechanical properties of crystals, New York John Wiley & Sons, Inc., p.243-328, 1957.

[17] D. Steinberg, S. Cochran, M. Guinan. A constitutive model for metals applicable at high strain rate, Journal of Applied Physics 51(3), p.1498-1504, 1980.

[18] D. Steinberg, C. Lund. A constitutive model for strain rates from 10^{-4} to 10^6 s^{-1}, Journal of Applied Physics 65(4), p.1528-1533, 1989.

[19] J. D. Thomas, N. Triantafyllidis, A. Vivek, G.S. Daehn, J.R. Bradley. Comparison of fully coupled modeling and experiments for electromagnetic forming processes in finitely strained solids, International Journal of Fracture 163, p.67-83, 2010.

[20] F. Zerilli, R. Armstrong. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations, Journal of Applied Physics 61(5), p.1816-1825, 1987.