

Simulation du procédé de laminage transversal

Catalina GUTIERREZ^{1,a} Laurent LANGLOIS^{1,b} Cyrille BAUDOIN^{1,c} Régis BIGOT^{1,d} Eric FREMEAUX^{2,e}

¹Arts et Métiers ParisTech Laboratoire LCFC, 4 rue Augustin Fresnel, 57070 Metz – France

²Ateliers des Janves, Avenue des Marguerites, 08120, Bogny-sur-Meuse, France

^aCatalina.gutierrez@ensam.eu ^blaurent.langlois@ensam.eu ^ccyrille.baudouin@ensam.eu ^dregis.bigot@ensam.eu ^eeric.fremaux@ateliers-janves.fr

Résumé—Cet article présente la modélisation et la confrontation des résultats expérimentaux en conditions industrielles aux résultats issus de la simulation numérique 3D du procédé de laminage transversal. Dans cette étude le procédé de laminage transversal a une configuration à deux rouleaux. La pièce laminée comporte plusieurs réductions de diamètre. La simulation numérique a été réalisée avec le logiciel Forge®. La simulation numérique a été validée en comparant le couple moteur. En conditions industrielles, le couple moteur de plusieurs cycles de laminage a été extrait à partir du variateur de fréquence du laminoir. Les résultats numériques sont discutés.

Mots-clés—Laminage transversal, simulation numérique, confrontation expérimentale

I. INTRODUCTION

La productivité du laminage transversal est telle qu'il est un procédé de mise en forme de prédilection pour la production de pièces automobiles. Dans le processus de fabrication de bielles, par exemple, il est utilisé pour répartir la matière avant l'estampage. Le laminage transversal permet la fabrication de pièces axisymétriques avec une ou plusieurs réductions de diamètre. Les outils sont constitués de coins qui vont entraîner le lopin en rotation et pénétrer progressivement dans la matière pour former les réductions. Dans le cadre de cette étude, la pièce possède 5 réductions de diamètre (voir Figure 1a). Dans le processus complet, cette préforme est ensuite transformée en deux bielles jumelles dans l'étape d'estampage (voir Figure 1b). Dans des conditions industrielles, deux configurations de laminage transversal sont retenues : (a) à plaques (b) à rouleaux. Cette dernière configuration est utilisée dans le cas industriel de cette étude (voir schéma de la Figure 2). Il est à noter que dans le cas (b), deux réglettes de guidage sont positionnées latéralement pour maintenir le lopin entre les rouleaux.

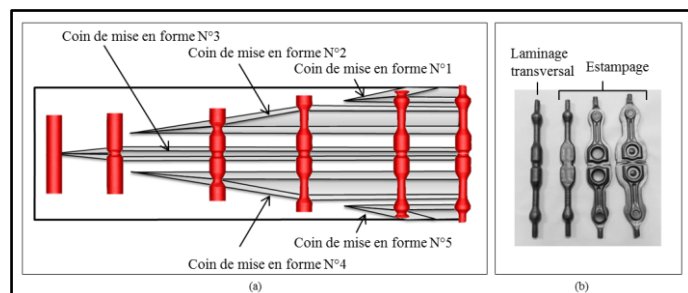


Figure 1. (a) principe du laminage transversal d'une ébauche de bielle (b) Etat de la bielle à différentes étapes de son processus de mise en forme

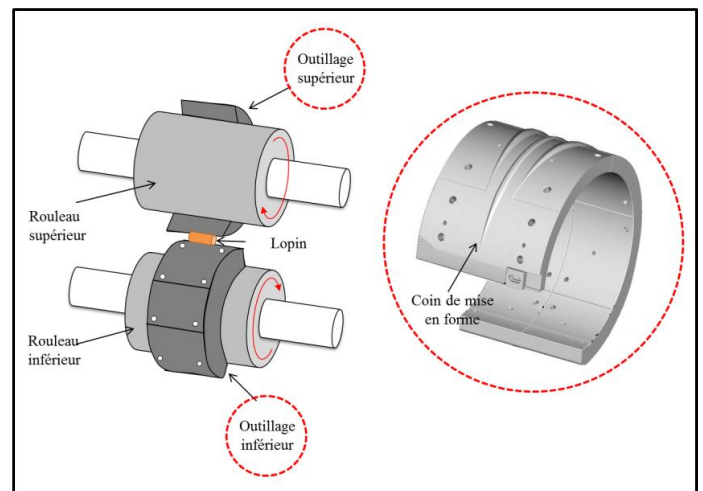


Figure 2. Schéma du laminage transversal à deux rouleaux

Le fait de réaliser la préforme avant estampage par laminage transversal comporte plusieurs avantages par rapport au laminage à retour. D'une part, il permet d'économiser de la matière en réduisant le volume de la bavure après estampage et ainsi de réaliser une meilleure mise au mille [1]. D'autre part, les temps de cycle sont réduits à environ 5 – 10 s [2].

Toutefois, la maîtrise du procédé de laminage transversal est limitée. D'une part, une grande partie des résultats accessibles dans la littérature est théorique [3]. D'autre part, la conception des outillages est sensible et est essentiellement basée sur le savoir-faire des concepteurs et des méthodologies de développement de type essai-erreur. Ceci est long et coûteux, freinant ainsi le développement du procédé dans l'industrie [4].

L'apport de la simulation numérique est également limité. Une grande partie des études disponibles dans la littérature ne concerne le laminage transversal d'une pièce ne présentant qu'une seule réduction de diamètre [3]. D'autre part, le procédé n'est souvent que partiellement simulé, se concentrant sur certaines étapes du procédé comme la zone de déformation [5], [6]. D'autre part, les résultats numériques de la littérature sont rarement validés par une confrontation avec des résultats expérimentaux.

Dans le cadre de ces travaux de recherche, le procédé de laminage transversal a été simulé avec le logiciel Forge® dans le cas d'une pièce avec 5 réductions de diamètre (voir figure 1). La modélisation est ensuite validée en confrontant les couples

de laminage simulés avec ceux mesurés sur la ligne de production industrielle.

II. MODELE NUMERIQUE

La mise en données pour la simulation numérique du laminage transversal est présentée en Figure 3.

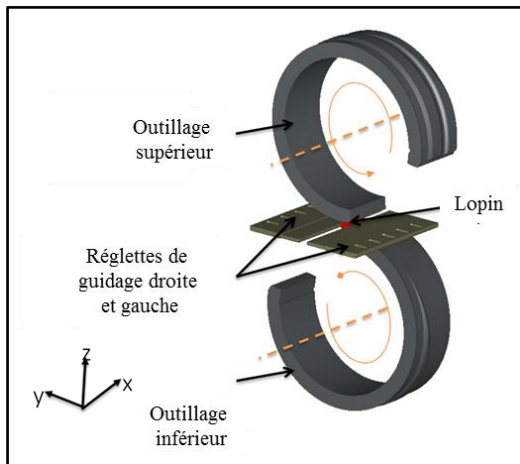


Figure 3. Mise en données pour la simulation numérique de laminage transversal

Les objets faisant partie de la simulation sont : deux outillages (supérieur et inférieur), deux réglettes de guidage (droite et gauche) et le lopin. Compte tenu des symétries de la pièce et du procédé, seule la moitié du lopin est simulé, ceci afin de réduire les temps de calcul.

Le diamètre initial du lopin est de l'ordre de 40mm pour une longueur inférieure à 150mm. La matière de la pièce est un acier au carbone de type C70. Son comportement rhéologique à chaud est modélisé par une loi de type Hansel Spittel. La température initiale du lopin est 1280°C.

Les outillages complets sont identiques pour les deux rouleaux. Ils sont constitués de 5 coins correspondant aux 5 réductions de la pièce à obtenir. Chaque coin est composé d'une zone de pénétration, d'une zone d'étirement et d'une zone de calibration. La zone de pénétration permet d'atteindre le diamètre de la réduction, la zone d'étirement permet d'obtenir la largeur de la réduction et la zone de calibration permet d'assurer le caractère axisymétrique de la pièce. Il est à noter également la présence de zone striée en début d'outil (juste avant le coin 3) dont la fonction est d'assurer l'engagement en rotation du lopin.

Pour la simulation, les outillages sont considérés rigides. Leur température, qui demeurera constante pendant le laminage, est fixée à 200°C. Cette température correspond approximativement à la température en service relevée à la surface des rouleaux. La vitesse de rotation est constante et égale à 10,5 tour/min.

La loi de frottement utilisée est de type Norton-Hoff viscoplastique (voir éq. (1)), où α est le coefficient de friction. $Pf=0,15$ est la sensibilité à la vitesse de glissement. Kf est la consistance du matériau et v_g est la vitesse de glissement. Les valeurs des coefficients ont été déterminées lors d'une étape

préliminaire d'étude de mise en place du modèle 3D du laminage transversal à deux rouleaux.

$$\text{éq. (1)} : \tau = -\alpha_f * K_f * \|\Delta v_g\|^{Pf-1} * \Delta v_g$$

L'échange thermique avec le milieu extérieur se fait principalement par rayonnement. Pour cela la température du milieu extérieur a été fixée à 30°C et l'émissivité du matériau à 0.88. La puissance dissipée par frottement est répartie suivant une loi de partage faisant intervenir les effusivités de l'outil et du lopin.

III. RESULTATS NUMERIQUES

La courbe de couple moteur obtenue en simulation pour la pièce complète (c'est-à-dire 2x demie pièce) est présentée en Figure 4. Globalement, il y a trois lobes du couple moteur correspondant à chaque réduction. Réduction centrale (réduction N°3 selon la Figure 1a), réduction latérale (réduction N°2= réduction N°4) et réduction de l'extrémité (réduction N°1= réduction N°5).

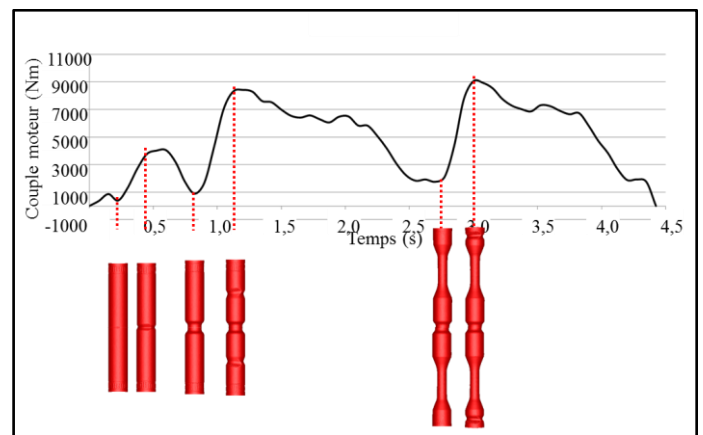


Figure 4. Couple moteur en simulation d'un cycle de laminage de la pièce complète

Le lobe des réductions 1 et 2 sont constitués de trois stades :

- un pic de couple pendant lequel le coin pénètre dans la matière. Au fur et à mesure de sa progression, la quantité de matière à déformer augmente provoquant une montée du couple nécessaire à la conduite du procédé. La montée du couple va cesser lorsque le coin va rencontrer les formes pré déformées par le coin du rouleau opposé.
- une décroissance légère du couple. Ce stade correspond approximativement à la zone d'étirement du coin. La baisse du couple est due à l'effet de recouvrement par le coin des formes pré déformées par le coin du rouleau opposé.
- une chute finale du couple correspondant à la zone de calibration du coin. Lors de ce stade la section du coin reste constante et permet d'obtenir la symétrie cylindrique du lopin.

Entre deux coins successifs, le couple de laminage ne descend pas jusqu'à une valeur nulle. En fait, l'outil est conçu de telle sorte à ce qu'il y ait recouvrement de la phase de

calibration du coin précédent par la phase de pénétration du coin suivant. Cela permet de réduire la longueur totale de l'outil et d'assurer une meilleure stabilité du procédé.

Le lobe de la réduction 3 ne fait pas apparaître de phase b dans la mesure où le coin correspondant ne contient pas de zone d'étirement.

IV. CONFRONTATION EXPERIMENTATION-SIMULATION

Afin de valider les résultats numériques, le couple moteur obtenu en simulation a été confronté au couple moteur mesuré pendant plusieurs cycles de laminage en conditions industrielles.

Le couple moteur a été mesuré au niveau du variateur de fréquence. Les données ont été extraites avec un câble KEB-SIEMENS connecté aux cartes électroniques, puis traitées et exportées avec le logiciel KEB COMBIVIS 5®.

Le couple moteur de trois cycles de laminage successifs a été mesuré afin d'observer les variations d'un cycle à l'autre. Ensuite les trois courbes expérimentales ont été comparées à la courbe obtenue en simulation. Cette confrontation est présentée en Figure 5.

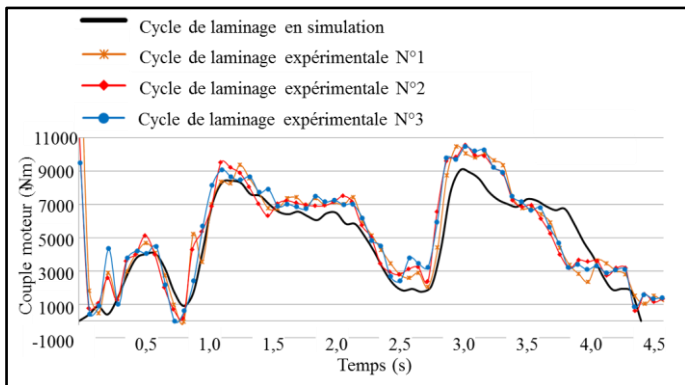


Figure 5. Confrontation du couple moteur issu de la simulation numérique et des mesures expérimentales

On peut remarquer que les mesures expérimentales présentent les mêmes caractéristiques décrites au paragraphe III. On retrouve les trois lobes correspondant aux trois coins, chaque lobe présentant les stades correspondant aux phases de pénétration, d'étirement et de calibration.

Toutefois, on observe expérimentalement un premier pic de couple au tout début de la phase de pénétration du coin n°3. Ce pic correspond à l'entrée du lopin dans la zone striée.

Le niveau des couples est satisfaisant sur les coins 2 et 3. L'erreur maximum en couple est inférieure à 10%, le couple étant légèrement sous-estimé par la simulation.

Pour le coin 1, formant l'extrémité de la pièce, le couple présente un écart de 16% environ. La simulation sous-estime le couple pour le début de l'action du coin et le surestime pour la deuxième partie.

Le laminage a été simulé avec un lopin ayant les dimensions nominales. Or, ces dimensions sont susceptibles de subir des dispersions. Le diamètre des barres dont sont extraits les lopins ainsi que les longueurs de découpe des lopins varient.

La variation de volume correspondant aux variations dimensionnelles du lopin initial va se répercuter principalement en fin de laminage lors de la formation de la dernière réduction. Les trois courbes expérimentales ont été relevées pour trois pièces successives avec probablement de faibles différences dimensionnelles. Ceci explique que les courbes expérimentales présentent peu de dispersions.

La figure 6 illustre la formation de la dernière réduction de la pièce. Lors de la pénétration et au début de l'étirement, l'extrémité du lopin forme une « tulipe ». Cette dernière est ensuite refermée lors de la fin de l'étirement, formant ainsi une cavité centrale. En fonction du volume de matière restant pour former l'extrémité, la tulipe est plus ou moins prononcée ce qui fait que le couple nécessaire pour la former et la replier peut changer de façon significative.

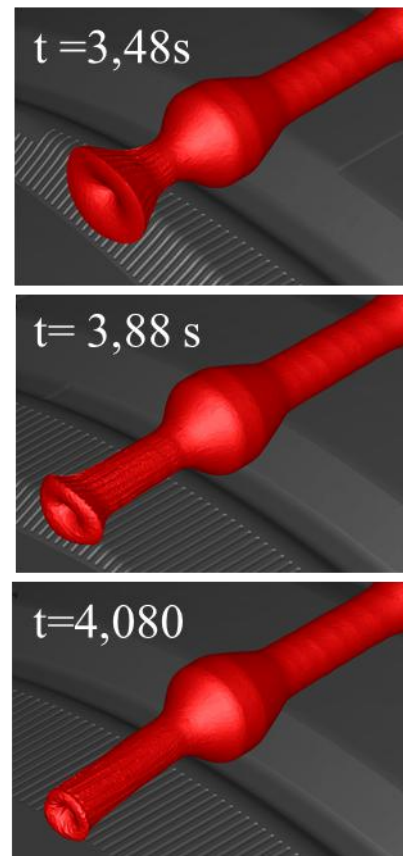


Figure 6. Les différentes étapes de la formation de l'extrémité de la pièce laminée par le coin 1

Pour valider cette hypothèse, une nouvelle simulation a été effectuée dans les mêmes conditions que dans le cas précédent mais avec un lopin initial 1mm plus long. La figure 7 présente l'évolution du couple pour la nouvelle simulation comparée à celui obtenu initialement. On peut noter que le pic de couple en début des réductions N°3 (réduction centrale) et N°2 (réduction latérale) est plus important qu'initialement. Ceci est certainement dû au fait qu'on a une longueur de contact plus importante. Egalement, on peut observer que lors de la formation de la réduction N°1 (réduction de l'extrémité) le couple est plus important lors de la formation et fermeture de la

« tulipe ». Le couple moteur lors de l'étape de pénétration ne semble pas être affecté.

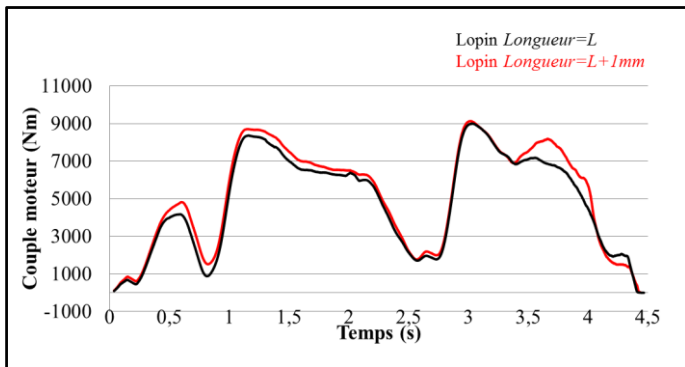


Figure 7. Comparaison des couples de laminage simulés pour deux longueurs initiales de lopin

Il est à noter que dans le laminage industriel, la position initiale du lopin suivant son axe est assurée par une butée. Cette dernière étant fixe, si la longueur du lopin est plus importante, le procédé n'est plus symétrique. La variation de volume de matière pour former la butée n'affecte que le côté opposé à la butée.

Une autre raison pouvant expliquer la différence de couple entre la simulation et les mesures expérimentales peut venir de l'usure de l'outillage. Celle-ci aurait deux effets :

- un effet direct à travers le changement de géométrie de l'outil.
- un effet indirect sur la répartition finale de la matière. L'outil étant usé, les deux premières réductions de la pièce laminée ont un diamètre plus important. Pour un même volume de lopin initial, le volume de matière restant pour former l'extrémité devient donc plus faible.

Le premier effet devrait être visible sur le couple correspondant à toutes les réductions dans la mesure où l'usure affecte la géométrie de tous les coins. Par contre, le deuxième effet serait surtout sensible sur la dernière réduction pour laquelle le volume mis en forme est réduit.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La simulation donne de bons résultats pour les deux premières réductions. On obtient les mêmes allures ainsi que les mêmes niveaux d'effort...

Il reste toutefois des difficultés pour la simulation de la formation des extrémités. Celles-ci sont importantes car elles participent à la réussite de la gamme de mise en forme complète de la bielle forgée.

La difficulté liée à la formation des extrémités vient de :

- leur forme complexe avec formation et fermeture d'une tulipe.
- la sensibilité au volume initial du lopin et à l'usure à travers le volume restant pour les former.

Afin de comprendre l'impact de l'usure des outillages (outillage supérieur et inférieur) sur la stabilité du procédé, des

simulations numériques sont en cours de réalisation avec la géométrie réelle de l'outillage (au lieu de la CAO). Cette dernière a été obtenue par scan 3D des outillages neufs (avant montage) et usés.

Afin de comprendre l'influence du volume du lopin sur les phénomènes physiques du procédé, des essais expérimentaux vont être réalisés avec des lopins de différentes longueurs.

Une fois la simulation calée, il sera possible d'évaluer les sollicitations en surface des outillages pour identifier leurs modes d'endommagement et guider le choix des matériaux à outil et les traitements de surface. Il sera également possible de transposer la mise en données pour concevoir et développer les gammes de laminage de nouveaux produits laminés.

VI. REFERENCES

- [1] LI & LOVELL. "Cross wedge rolling failure mechanisms and industrial application", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. N°37, 2008, pp. 265-278.
- [2] Q. LI, M. LOVELL, W. SLAUGHTER & T. KAVEH. "Investigation of the morphology of internal defects in cross wedge rolling", Journal of Materials Processing Technology, 2008, Vol. N°125, pp.248-257.
- [3] G. FANG, LP. LEI & P. ZENG. "Three-dimensional rigid- plastic finite element simulation for the two-roll cross-wedge rolling process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. N°129, 2002, pp. 245-249.
- [4] Z. JING, S. XUEDAO & H. ZHENGUAN. "Computer aided design for cross wedge rolling tools of automobile semi-axes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. N°1, 2007, pp. 41-45.
- [5] J. ZHOU, C. XIAO, Y. YU & Z. JIA. "Influence of tool parameters on tool wear in two-roll cross-wedge rolling ", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012.
- [6] Y. DONG, K.A. TAGAVI & M.R. LOVELL. "Analysis of interfacial slip in cross wedge rolling: a numerical and phenomenological investigation", Journal of Materials Processing Technology, Vol. N°97, 2000, pp. 44-53.