



HAL
open science

Benchmark d'une gamme de forgeage par marteau pilon. Comparaison entre pièces réelles numérisées en 3D et pièces virtuelles modélisées par MEF.

Carl Labergere, Sébastien Remy, Pascal Lafon, Kang Gao, L. Daniel

► To cite this version:

Carl Labergere, Sébastien Remy, Pascal Lafon, Kang Gao, L. Daniel. Benchmark d'une gamme de forgeage par marteau pilon. Comparaison entre pièces réelles numérisées en 3D et pièces virtuelles modélisées par MEF.. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422867

HAL Id: hal-03422867

<https://hal.science/hal-03422867v1>

Submitted on 9 Nov 2021

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.

Benchmark d'une gamme de forgeage par marteau pilon. Comparaison entre pièces réelles numérisées en 3D et pièces virtuelles modélisées par MEF

C. LABERGERE^a, S. REMY^a, P. LAFON^a, K. GAO^a, L. DANIEL^a

a. Université de Technologie de Troyes, ICD/LASMIS UMR/STMR CNRS 6279, 10010 Troyes

Résumé :

La numérisation par scanner 3D et la simulation numérique des procédés sont actuellement des outils robustes en perpétuels progrès. Nous proposons dans ce papier un benchmark de forgeage d'une pièce cylindrique par marteau pilon avec une gamme complète (écrasement+estampage). Pour chaque frappe, nous avons numérisé le lopin déformé avec un bras Romer équipé d'une tête laser. Parallèlement, les opérations de la gamme ont été simulées avec un modèle de comportement thermoviscoplastique endommageable intégré dans le logiciel Abaqus avec remaillage adaptatif. Les nuages de points 3D obtenus ont été ensuite comparés aux formes des différents lopins obtenus par la simulation numérique

Abstract :

As 3D scan and numerical simulation are now mature, we will try to benchmark simulation against real forging. To do, we will consider forging of a cylindrical part using hammer rammer along a complete procedure going from the billet to the final part. Before and after each stage we scanned the forged part and compared with the result that calculus predicted using a thermoviscoelastoplastic law including damage implemented by UMAT mechanism provided by Abaqus software.

Mots clefs : Simulation numérique, MEF, thermo-visco-plasticité, endommagement, numérisation 3D, forgeage, ...

1 Introduction

La mise au point et la maîtrise d'un procédé de mise en forme complexe nécessite un savoir-faire encore trop empirique, souvent présent dans les entreprises. Les outils numériques tels que la CAO, la simulation numérique MEF,, ... sont maintenant présents dans les Bureau d'étude en charge de la conception des outillages de mise en forme. La prédiction réaliste d'une solution mécanique générée par un outil de simulation numérique de procédé de mise en forme dépend de nombreux facteurs (modélisation fine du comportement matériaux, modélisation du contact frottement, taille et type de maillage, conditions limites, paramètres matériaux et procédé,...) [1-7]. Pour vérifier la pertinence des outils numériques, la comparaison avec des résultats expérimentaux reste indispensable. Malheureusement dans certains cas cette comparaison est très délicate car nombre de grandeurs physiques indispensables restent inaccessible à la mesure. C'est particulièrement le cas de la mise en forme par forgeage à chaud. Dans ce cas seule certains grandeurs sont accessibles (température, déformation des outils) mais en surface seulement.

Les techniques de numérisation 3D associées aux techniques de reconstruction de surfaces sont aujourd'hui très accessibles et offrent un très bon compromis rapidité d'exécution/précision de mesure. Nous proposons dans ce papier d'explorer les possibilités offertes par ces techniques comme un moyen permettant d'ajuster certains paramètres dans la simulation numérique du procédé. Ce papier présente un benchmark de forgeage d'une pièce cylindrique par marteau pilon. La gamme est ici constituée d'une opération d'écrasement sous tas plats suivie d'un estampage avec des outils de forme. Ensuite nous détaillons le modèle numérique utilisé pour la simulation de chaque opération de la gamme et la comparaison avec les formes issues de la numérisation des pièces réelles.

La pièce étudiée est un brut de forge d'une future roue engrenage obtenue à partir d'un lopin cylindrique en acier 42CrMo4 de hauteur $h_0=210$ mm et de diamètre $d_0=130$ mm. Les dimensions de la roue forgée sont

données en figure 1. Un marteau pilon de 100 KJ et une presse mécanique (vitesse de descente max 40mm/s) sont employés pour la gamme de forgeage.

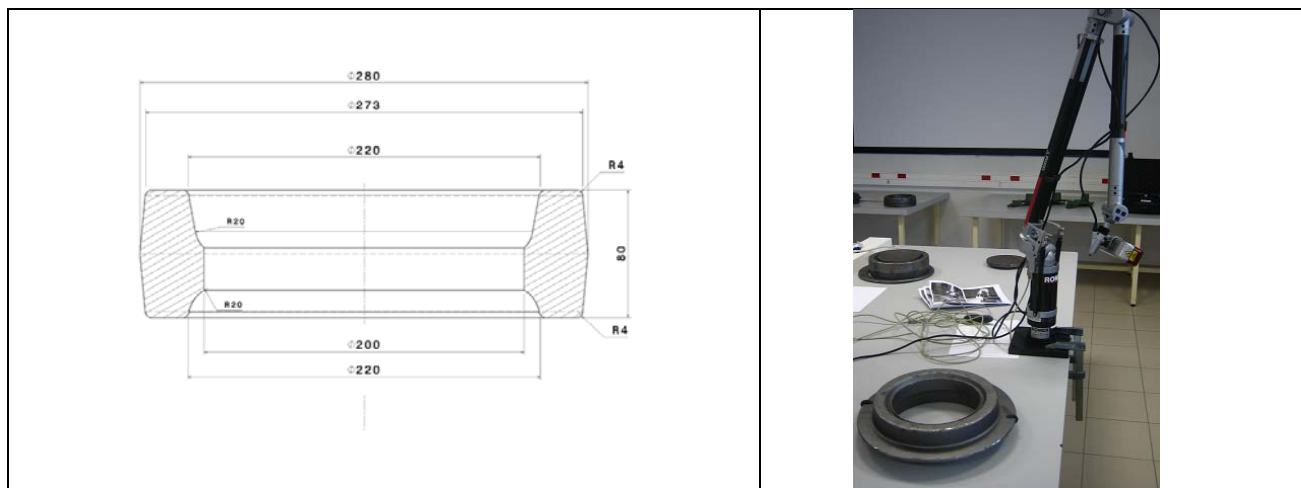


FIG. 1 – Géométrie finale de la roue forgée et bras de mesure Romer avec scanner G-scan

La gamme de forgeage est constituée des différentes opérations suivantes (voir figure 2) :

- Le lopin est porté à une température de 1300°C.
- Une opération d'écrasement avec des outils tas plats (marteau pilon). Trois frappes sont nécessaires pour obtenir une forme de galette adaptée pour l'opération suivante d'estampage.
- Une opération d'estampage avec des matrices de forme (marteau pilon). Cinq frappes sont nécessaires pour assurer un remplissage correct des empreintes des matrices.
- Une opération de découpage de la toile (presse mécanique).
- Une opération d'ébavurage (presse mécanique).



FIG. 2 – Evolution de la forme du brut de forge après les différentes opérations et les différentes frappes

2 Numérisation topologique 3D

L'ensemble des évolutions de la forme du brut de forge après chaque opération et frappes ont été numérisées avec un scanner laser plan de type G-Scan intégré sur un bras de mesure Romer (voir figure 1). Les mesures

se sont déroulées dans une salle de température ambiante constante pour éviter au maximum les variations de géométrie. Le scanner fonctionne sur le principe de la triangulation sur ligne laser. Un plan laser est généré via un prisme ou un miroir oscillant. L'intersection entre ce plan et la pièce forme une ligne. C'est sur cette ligne que sont calculées les coordonnées de 300 points (figure 3a). Le but est de « balayer » la surface afin de créer un nuage de points représentatif de l'ensemble de la surface de la pièce. La précision de ce dispositif est de 0,3 mm. Cette précision est suffisante pour permettre un recalage de notre modèle. En effet, les dispersions d'un procédé tel que le forgeage par marteau pilon sont beaucoup plus grandes. Afin de numériser ces pièces, nous avons dû utiliser deux posages, un pour la face supérieure et un pour la face inférieure. Afin de pouvoir, par la suite, recalibrer les nuages de points, nous positionnons des repères sur la pièce. Pour chaque posage, nous obtenons un nuage de points que nous pouvons mailler (figure 3b).

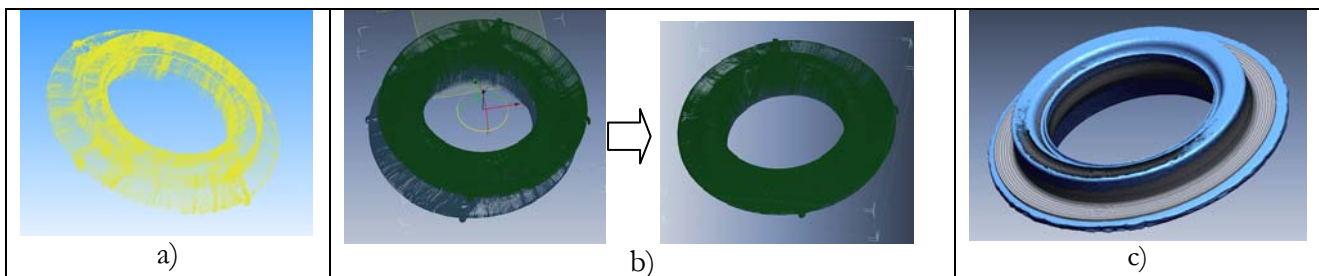


FIG. 3 – a) Nuage de points d'une face du lopin, b) Mise en correspondance des deux maillages face supérieure face inférieure, c) alignement de la topologie expérimentale et numérique

Ensuite, grâce au logiciel Rapidform XOR et au repère que nous avons positionnés, il est possible de mettre en correspondance les 2 nuages de points. L'approche utilisée par ce logiciel dans ce cadre est un algorithme des moindres carrés (figure 3b). Les deux nuages de points ainsi recalés sont fusionnés et maillés afin d'obtenir ce que nous appellerons par la suite, le maillage réel (figure 3b). Enfin, pour comparer ce maillage réel et le fichier IGS, résultat de la simulation numérique, nous utilisons aussi Rapidform XOR et son algorithme des moindres carrés afin de les aligner (figure 3c).

3 Simulation numérique

Une méthodologie numérique particulière, développée depuis quelques années au LASMIS, a été employée pour réaliser l'ensemble des simulations numériques des différentes opérations de forgeage. Cette méthodologie utilise plusieurs outils numériques intégrés dans le logiciel EF ABAQUS® comprenant un modèle de comportement thermo-elasto-viscoplastique avec prise en compte de l'endommagement ductile. On utilise une Méthode Eléments finis adaptative en 2D et la résolution se base sur une approche dynamique explicite.

3.1 Modèle de comportement

La méthode à variables d'état est utilisée pour décrire l'écoulement élastoplastique avec écrouissage mixte (isotrope et cinématique) non linéaire [4]. Une attention particulière est accordée aux couplages forts entre les différents phénomènes : déformations élastiques, déformations plastiques, écrouissages, endommagement thermique, et ce dans le cadre des transformations finies. Nous ne présenterons qu'un développement succinct du modèle de comportement dans ce papier. Quatre couples de variables internes sont utilisés dans un cadre isotherme : $(\underline{\epsilon}^e, \underline{\sigma})$ pour l'écoulement plastique, $(\underline{\alpha}, \underline{X})$ pour l'écrouissage cinématique, (r, R) pour l'écrouissage isotrope et (D, Y) pour l'endommagement ductile. Lorsque la configuration courante présente un endommagement ductile, le concept de variables d'état effectives basé sur l'hypothèse de l'équivalence de l'énergie totale est employé. Cette modélisation est basée sur un choix 'judicieux' des potentiels d'état et des dissipations qui sont des fonctions convexes et qui assurent les différents couplages entre les différents phénomènes thermomécaniques [1-4]. Pour intégrer l'effet adoucissant de la recristallisation dynamique un couple de variable (r_c, R_c) a été rajouté. Q_c est le module associé à l'effet de la recristallisation dynamique, r_0 est un seuil en déformation et b_c la non linéarité d'évolution :

C et Q sont respectivement les modules d'écrouissage isotrope et cinématique, a et b caractérisent respectivement les écrouissages non linéaires cinématique et isotrope :

Relation d'état	Equation d'évolution
$\underline{\sigma} = (1-D)\underline{\Lambda}(T) : \underline{\varepsilon}^e$ $\underline{X} = \frac{2}{3}(1-D)C(T)\underline{\alpha}$ $R = (1-D^o)Q(T)r$ $R_c = -(1-D^o)Q_c(T)\langle r_c - r_0 \rangle$ $Y = \frac{(1+\nu)\left[\langle \sigma_I \rangle_+^2 + \langle \sigma_{II} \rangle_+^2 + \langle \sigma_{III} \rangle_+^2\right]}{2(1-D)E(T)}$ $- \frac{9\nu\left[\langle \sigma_H \rangle_+^2\right]}{2(1-D)E(T)} + \frac{1}{3}C(T)\underline{\alpha} : \underline{\alpha}$ $+ \frac{1}{2}\omega D^{o-1}Q(T)r^2$	$f = \frac{J_2(\underline{\sigma} - \underline{X})}{\sqrt{1-D}} - \frac{R + R_c}{\sqrt{1-D^o}} - \sigma_y(T) = 0$ (Critère de plasticité de von Mises) $\underline{D}_p = \dot{\delta} \underline{n}$ avec $\underline{n} = \frac{3}{2\sqrt{1-D}} \frac{\underline{\sigma}^{dev}}{J_2(\underline{\sigma} - \underline{X})}$ (Taux de déformation plastique) $\underline{\dot{\alpha}} = \dot{\delta}(\underline{n} - a\underline{\alpha})$ $\dot{r} = \dot{\delta} \left(\frac{1}{\sqrt{1-D^o}} - br \right)$ et $\dot{r}_c = \dot{\delta} \left(\frac{1}{\sqrt{1-D^o}} - b_c r_c \right)$ $\dot{D} = \left(\frac{\langle Y - Y_0 \rangle}{S} \right)^s \frac{\dot{\delta}}{(1-D)^\beta}$ avec $\dot{\delta} = \left\langle \frac{f}{K_v(T)} \right\rangle^{n_v}$ potentiel viscoplastique de Norton-Hoff

Y_0 (seuil), S , s , sont les paramètres qui contrôlent l'évolution de l'endommagement. Le tenseur déviateurique du second ordre \underline{n} est la normale à la surface de charge f . σ_y correspond à la limite élastique, le scalaire $\dot{\delta}$ est le multiplicateur visco-plastique.. L'ensemble des modules $P \in [E, Q, Q_c, C, S, K_v, \sigma_y]$ dépendent de la température suivant l'expression :

$$P(T) = P_0 e^{-\alpha T} \quad (1)$$

Concernant l'intégration numérique locale (en chaque point de Gauss) de l'ensemble des équations de comportement couplées, l'implémentation dans le code de calcul par EF se fait via des routines utilisateurs Vumat pour ABAQUS/Explicit. La méthode classique de prédiction élastique – correction plastique est utilisée en connexion avec une discrétisation temporelle des équations de comportement par le schéma de la thêta-méthode couplée à un schéma asymptotique appliqué aux seules équations d'écroutissage.

3.2 Méthode numérique adaptative

Une méthodologie de remaillage adaptative en 2D a été développée pour modéliser le suivi d'une singularité par éléments finis sur une géométrie évolutive [2]. En effet, au cours des simulations numériques de procédés de mise en forme, de fréquents remaillages sont nécessaires au cours du calcul afin d'éviter les fortes distorsions du maillage causées par les non linéarités et surtout pour adapter la taille du maillage à la nature de la solution du problème. Ces remaillages sont indispensables pour pouvoir effectuer les calculs jusqu'à la fin du procédé de mise en forme et obtenir une solution correcte tenant compte de la suppression des éléments totalement endommagés. En outre, en plus des aspects liés à la physique du problème, la gestion du contact entre la pièce et les outils exige une densité de maillage permettant d'appréhender ce type de problème. Cela nécessite des indicateurs d'erreur basés non seulement sur le gradient des champs physiques (plasticité, température, endommagement, ...) mais aussi sur des considérations géométriques liées par exemple aux rayons de courbure de la pièce et des outils. Cet outil optimise le nombre élément en raffinant les zones actives (fort écoulement plastique, endommagement, ..) et déraffine les zones inactives ou inertes de façon à garder à peu près constant le nombre de degrés de liberté..

3.3 Simulation de l'opération d'écrasement

Le lopin est discrétisé avec un élément axisymétrique cax4RT. La taille des éléments évolue au cours du calcul, la taille maximum est $h_{\max} = 6$ mm, à l'intérieur de zone fortement plastifiée $h_{\min}^p = 1$ mm, et dans les zones d'éventuelle élaboration de fissure $h_{\min}^{\text{dam}} = 0.1$ mm. Le coefficient de frottement outils/lopin est de 0.2.

A partir d'un maillage initial grossier, celui-ci est raffiné dans les zones fortement sollicitée en plasticité. La figure montre l'évolution du maillage, celle des isovaleurs en déformation plastique cumulée ainsi que l'endommagement à la fin de chaque frappe. Nous retrouvons bien l'allure de la croix du forgeron dans le

cas d'une opération écrasement. Les niveaux d'endommagement maxi se localisent au centre du lopin ainsi que sur la surface bombée extérieure mais avec des valeurs assez basses 0.04. A la fin de l'opération, nous obtenons une galette bombée dont la face supérieure à un diamètre plus important que la phase inférieure. Cette dissymétrie est occasionnée par des effets de frottement différents entre les tas bas et haut ainsi qu'un gradient de vitesse de déformation différent au niveau des faces inférieure et supérieure..

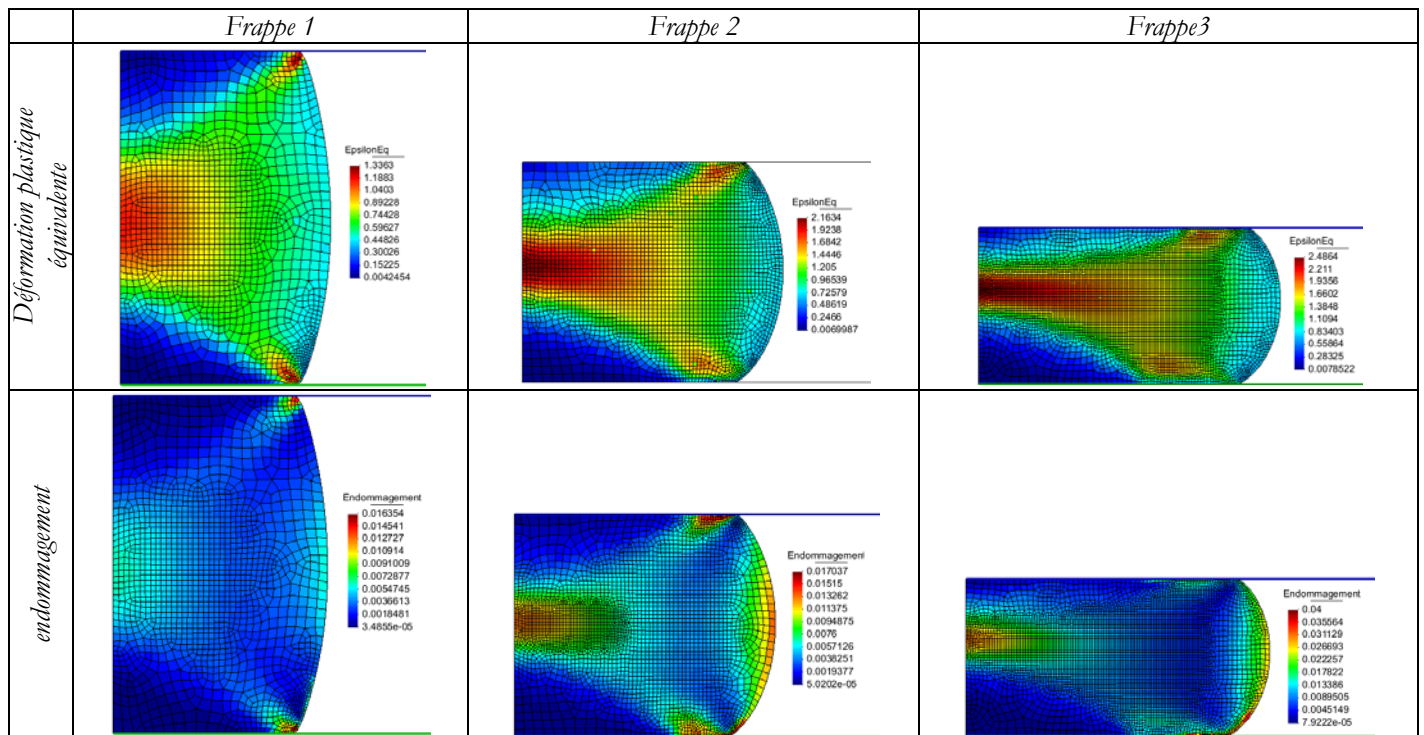


FIG. 4 – Evolution de la répartition de la déformation plastique cumulée et l'endommagement dans le lopin à la fin de chaque frappe

A la fin de chaque frappe, le contour extérieur du maillage du lopin est utilisé par une macro pour générer une pièce CAO en 3D à partir du logiciel Catia V5r19.

4 Comparaison expérimental/numérique

Les topologies expérimentales (générées à partir des nuages de nœuds) et numériques (générées à partir du maillage numérique) sont recalées par une méthode de moindre carré et comparées. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant, avec h_0 : hauteur du lopin initiale (mm), h : hauteur du lopin après la frappe (mm), d_h : diamètre en haut après la frappe (mm), d_b : diamètre en bas après la frappe (mm).

	Frappe 1				Frappe 2			Frappe 3		
	h_0	h	d_h	d_b	h	d_h	d_b	h	d_h	d_b
Simulation 1	210	134.8	145.6	143.2	88.1	173.8	178.4	61.97	221	213.2
Réalité	210	132.7	145.1	134.5	83.8	175.4	181.7	61.7	219.7	209.0
Erreur %	0%	1.6%	0.3%	6.5%	3.8%	0.9%	1.8%	0.4%	0.6%	2.0%

TAB. 1 – Confrontations des mesures expérimentales et numériques

Pour la frappe 1, la forme « bombée évasée » observée sur la topologie expérimentale et à peu près respecter par la topologie numérique avec un écart maximum de 2mm. Cette forme est occasionnée par les conditions aux limites en frottement et à la cinématique du marteau pilon. Pour la frappe 2, les écarts entre les topologies expérimentale et numérique n'excède pas 1.5 mm. Pour la frappe 3, une grande partie du recalage montre une erreur en dessous de 1mm.

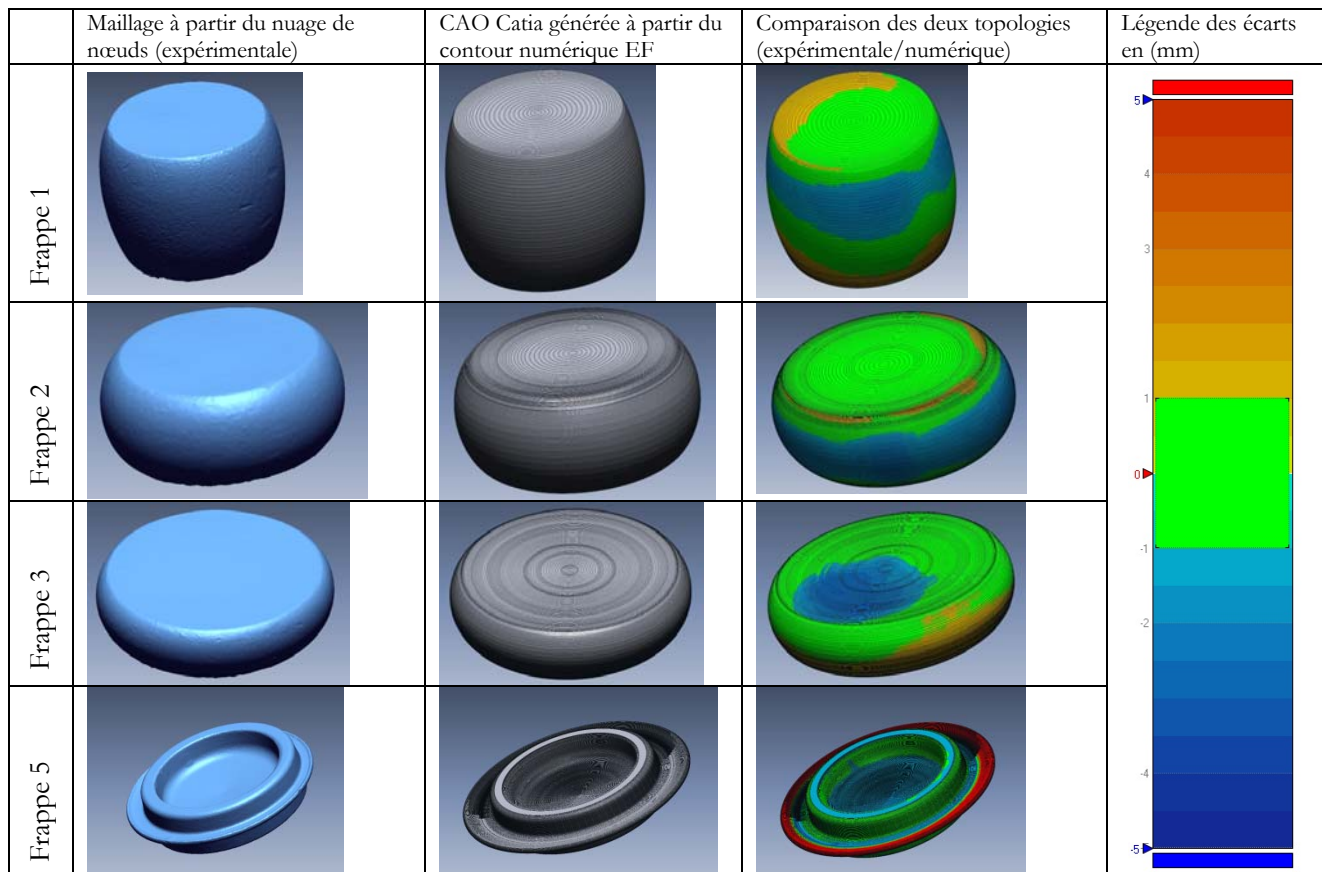


FIG. 5 – Recalage des topologies expérimentales et numérique et présentation de la carte des déviations

5 Conclusion

Un benchmark d'une gamme de forgeage a été partiellement présenté dans ce papier. Les premières comparaisons des topologies expérimentales et numériques valident la prédiction de la méthodologie numérique au moins sur la déformation. Des informations complémentaires (CAO des outils, nuages de nœuds, ...) sur ce benchmarks seront disponibles sur notre site <http://lasemis.utt.fr/fr/index.html>

Ces travaux expérimentaux ont été menés dans le cadre du projet Manunet Pro-Eng co-financé par oseo-anvar. Nous remercions la société Estamfor pour la conception et la réalisation de la gamme de forgeage.

References

- [1] Issa M., Saanouni K., Labergère C., Rassineux A., Prediction of serrated chip formation in orthogonal metal cutting by advanced adaptive 2D numerical methodology., *Int. J. Machining and Machinability of Material*, Vol 9., Nos ¾, 2011
- [2] Labergere C., Rassineux A., Saanouni K., 2D adaptive mesh methodology for the simulation of metal forming processes with damage, DOI 10.1007/s12289-010-1001-z, article in Press, 2011
- [3] Labergere C., Lestriez P., Saanouni K. Numerical design of extrusion process using finite thermoelastoviscoplasticity with damage. Prediction of chevron shaped cracks, *Key Engineering Materials*, Vol 424, pages 265-272, 2010
- [4] Saanouni K., Chaboche J.L., Application to Metal Forming, *Computational Damage Mechanics, Numerical and Computational methods. in Comprehensive Structural Integrity*, Edited by I. Milne, R.O. Ritchie and B. Karihaloo, Vol 3, n 7, 2003
- [5] Kobayashi, S.-I. Oh, T. Altan. *Metal Forming and the Finite Elements Methods*, pages 1–6, Oxford University Press, New York, 1981.
- [6] P.Hartley, I.Pillinger. Numerical simulation of the forging process. *Comput. Methods Appl.Mech.Engrg.* 195:6676-6690,2006
- [7] Wagoner R. H., Chenot J.- L., *Metal forming analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001