

Influence de la taille de grain initiale sur le procédé de formage incrémental des tôles en faibles épaisseurs

R. BEN HMIDA ^a, S. THIBAUD ^{a,b}, F. RICHARD ^{a,b}, P. MALÉCOT ^{a,c}

^aInstitut FEMTO-ST, Département de Mécanique Appliquée, UMR CNRS 6174, 24 rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France.

^bUniversité de Franche-Comté, 25000 Besançon Cedex, France

^cEcole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM), 26 rue de l'Épitaphe, 25030 Besançon Cedex, France

Résumé :

Le formage incrémental « mono-point » (SPIF) est un procédé innovant qui permet de produire des pièces de géométrie complexe en contrôlant le mouvement d'un outil de formage généralement à bout hémisphérique. La géométrie désirée est assurée par la trajectoire de l'outil qui impose une déformation incrémentale sur un flan serré sur son contour. L'avantage de ce procédé est son faible coût de l'outillage par rapport aux procédés de formage classiques.

Le développement de procédés de formage des tôles en faibles épaisseurs est limité par l'influence de la miniaturisation due aux effets d'échelle. A de petites échelles, la taille de grain initiale joue un rôle important sur le comportement du matériau. Ce document traite de l'influence de la taille initiale de grains sur le procédé de micro formage incrémental des tôles en cuivre à travers une investigation expérimentale. Des essais de traction par différentes tailles de grains ont été réalisés. Une série de tests expérimentaux de micro-SPIF a été effectuée sur des flans par ces mêmes tailles de grains initiales. Les effets sur la distribution des épaisseurs ainsi que les évolutions des efforts de formage sont démontrés et discutés. Un modèle analytique est également proposé afin de représenter ces efforts lors du procédé.

Abstract :

Single Point Incremental Forming (SPIF) is an innovative process that allows the production of complex geometry parts by controlling the movement of the forming tool basically with hemispherical end. The desired geometry is provided by the tool path which imposes an incremental deformation on the clamped blank. The advantage of this process is its low tooling costs compared to classical forming processes e.g. deep drawing.

The development of thin sheet metal forming processes is limited by the influence of miniaturization due to size effects. At micro-scale, the initial grain size plays a major role on the material behavior. This paper deals with the influence of the initial grain size in the micro incremental forming for thin copper sheet through an experimental investigation. Tensile tests with different grain sizes have been performed. A set of experimental tests of micro-SPIF was carried out on blanks with the same initial grain sizes. The effects on the thickness distribution as well as the forming force evolutions are demonstrated and discussed. An analytical model is also proposed to represent these forces during the process.

Mots clefs : Formage incrémental mono point, Effet d'échelle, Tôle de faible épaisseur, Essai de traction, Alliages de cuivre

1 Introduction

La technologie de miniaturisation a reçu beaucoup d'attention dans la conception et le développement de produits. Elle se présente comme une nouvelle tendance mondiale dans de nombreux pôles industriels aussi variés comme: la mécanique, l'optique, le biomédicale, la télécommunication et l'électronique. Pour répondre aux exigences en matière de fabrication, différents procédés ont été développés tels que le micro-

usinage, le micro-injection, le micro-formage ... par ailleurs, le procédé de mise en forme est l'une des approches encourageantes pour fabriquer des pièces miniatures grâce à ses nombreux avantages tels que sa haute productivité, son faible coût de production, sa minimisation des pertes de matériaux, ses bonnes caractéristiques dimensionnelles de la pièce finie et ses excellentes propriétés mécaniques [1].

L'étude de ces procédés a été bien développée à des grandes échelles. Lorsque la taille de la pièce est réduite à de petites échelles, le comportement du matériau et la physique régissant le micro-formage changent. C'est ce qu'on désigne par « l'effet d'échelle » [2] et [3] qui a une relation étroite avec les propriétés anisotropes du grain et de la topographie de surface de la pièce finie.

Grâce à un besoin d'outillage nettement réduit, le micro-formage incrémental des tôles (microISF) permet de fabriquer des prototypes ou une petite série de pièces en un minimum de temps et à un coût d'outillage très raisonnable [4]. Ce procédé a connu un développement important ces dernières années grâce à l'évolution de CAO-FAO ainsi que le transfert des connaissances du procédé de fluotournage (shear spinning). Ce procédé contient plusieurs techniques, parmi lesquelles le micro-formage incrémental « mono-point » des tôles (microSPIF) qui fait l'objet de cette étude. La géométrie désirée est produite par le contrôle du mouvement d'un outil de formage à tête hémisphérique par une machine à commande numérique. L'outil de formage suit une trajectoire prédéterminée et déforme progressivement une tôle en une série de pas incrémentaux jusqu'à ce que la profondeur finale est atteinte.

Des recherches récentes ont été effectuées afin d'améliorer le développement de procédé de formage incrémental de tôles en faibles épaisseurs et pour produire des pièces de petites dimensions. Ben Hmida et al. [5], Dejardin et al. [6], Obikawa et al. [7], Sekine et Toshiyuki [8] et Otsu et al. [9] ont démontré les possibilités de produire des pièces métalliques de petites dimensions par micro-ISF respectivement pour les tôles en alliages de cuivre, des aciers inoxydables et des tôles de Ti et Au.

Afin d'analyser la qualité de ces composants, il est important d'étudier davantage les efforts de formage, la distribution de déformation et les limites de formage à des micro-échelles [10]. C'est pourquoi cet article est consacré à l'étude de microSPIF à travers une investigation expérimentale.

Des essais de traction et de micro-formage incrémental ont été effectués pour étudier l'influence de la taille de grains initiale sur le comportement du matériau des tôles minces. Ceci a pour but de démontrer cet effet afin de le prendre en compte lors de la modélisation et de la simulation de microSPIF.

Plusieurs éprouvettes avec différentes tailles de grains ont été testées. La distribution des épaisseurs et des efforts de formage a été également étudiée expérimentalement ainsi qu'un modèle analytique est proposé pour représenter ces efforts lors du procédé.

2 Matériau et microstructures

Le matériau utilisé dans cette étude est une tôle en cuivre monophasé FPG (Cu-0.1Fe-0.03P) avec une épaisseur initiale t de 0,21 mm et une dureté initiale de 124 HV. La présence d'une seule phase α rend le matériau malléable, ce qui permet des déformations importantes par tout procédé de mise en forme. Afin d'éliminer les effets de texture de laminage et étudier l'influence de la taille de grains, neuf lots ont été recuits pendant une heure à des températures allant de 350 à 750°C. Les microstructures des échantillons recuits le long du plan de la tôle sont représentées sur la Fig. 1. La taille moyenne de grains a été obtenue en utilisant la méthode du segment linéaire intercepté [11]. La taille des grains est contrôlée dans la plage de 11 à 32 μm . Les évolutions des tailles moyennes de grains d avec les températures de recuit sont présentées également sur la Fig. 1. Classiquement, on constate que la taille de grains augmente avec la température de recuit. Les effets de l'épaisseur de l'échantillon t et la taille moyenne de grains d sont quantifiés par le ratio $\Phi = t/d$. La signification physique de ce paramètre est associée au nombre de grains à travers l'épaisseur du matériau. Généralement lorsqu'on diminue ce ratio, l'effet d'échelle se produit [2].

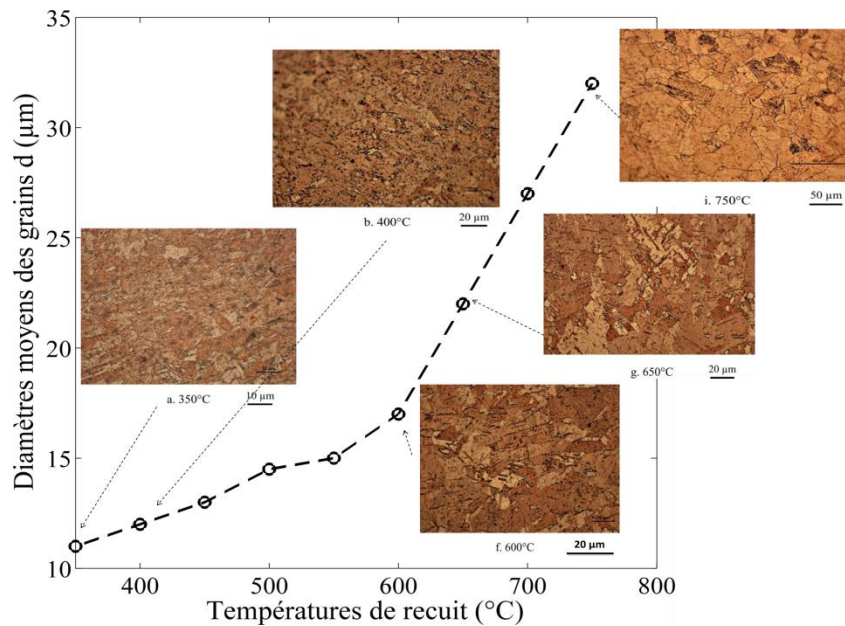


FIG 1- Evolution de la taille moyenne de grains avec les températures de recuit.

3 Essai de traction

Une campagne d'essais de traction uniaxiale a été effectuée sur des éprouvettes traitées thermiquement grâce à une machine de type INSTRON 6025. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes plates de section rectangulaire (0.21mm x 5mm) et de longueur utile initiale égale à 25 mm. La mesure de l'allongement des éprouvettes ΔL a été menée par un extensomètre laser. La vitesse de la traverse de la machine d'essai était de 0,03 mm/s pour tous les essais et la force de réaction F est mesurée par une cellule de force de 25 kN. Tous les essais ont été effectués à la température ambiante. Les éprouvettes ont été allongées jusqu'à la rupture et les courbes de contrainte-déformation ont été obtenues. Trois tests pour chaque ratio Φ sont considérés de manière à minimiser l'écart expérimental. Les courbes contrainte-déformation des éprouvettes en cuivre FPG avec différentes tailles de grains sont données dans la Fig. 2.

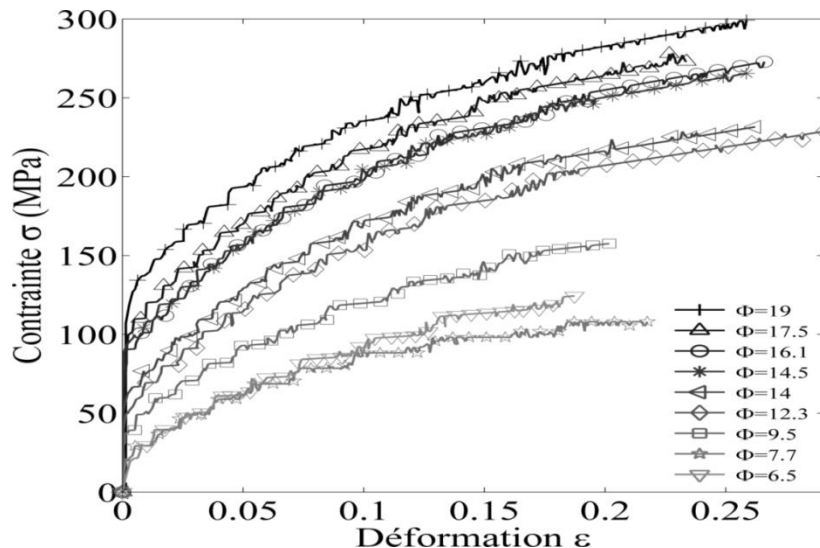


FIG 2- Courbes contrainte-déformation des éprouvettes en cuivre FPG sollicitées en traction : Effet du ratio Φ [5].

Ces essais peuvent mettre en évidence l'effet de taille des grains sur la contrainte d'écoulement, on constate que la contrainte d'écoulement diminue avec l'augmentation de la taille moyenne des grains. Ce phénomène est dû à ce qu'on appelle l'effet de Hall-Petch [12,13], ce qui indique simplement que le matériau à grande taille des grains présente une résistance inférieure à celle des grains de plus petite taille. Les résultats montrent que le ratio Φ (t/d) est particulièrement intéressant car il peut être utilisé comme un critère de transition du comportement. Ce ratio a un effet significatif sur les propriétés mécaniques de la feuille en

cuivre FPG, en particulier dans la plage comprise entre $\Phi = 12,3$ et $\Phi = 19$, où des améliorations importantes à la fois de la résistance et de la ductilité ont été observées. Ce changement de comportement en fonction du ratio Φ peut s'expliquer par un passage d'une topographie de rupture de type ductile présentant des cavités et des cupules (Fig. 3a) à une topographie mixte avec un faciès en lame de couteau avec présence de cupules (Fig. 3b). Ce type de comportement a déjà été rapporté dans la littérature pour le cuivre et l'aluminium par Miyazaki et Shibata [14]. Ils ont montré que les valeurs critiques de ratio Φ est de 10 pour le cuivre et 5 pour l'aluminium.

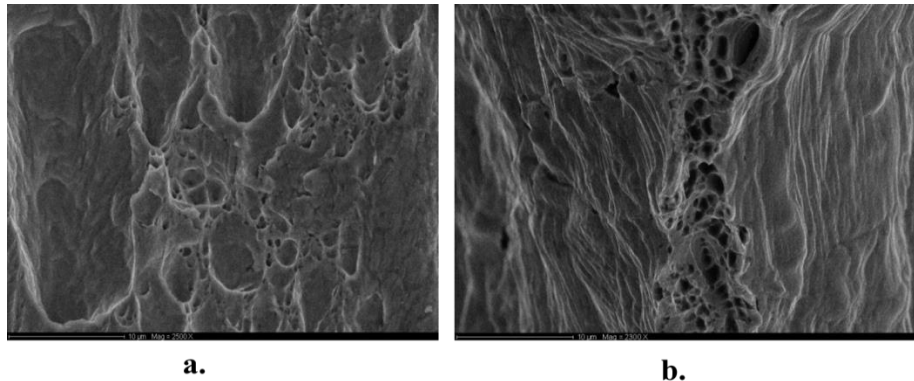


FIG 3- Faciès de rupture des éprouvettes testées [5]: a) $\Phi = 19$, b) $\Phi = 6,5$.

4 Formage incrémental de tôles

4.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental du formage incrémental « mono-point » est monté sur une fraiseuse verticale CNC 3 axes comme illustré sur la Fig. 4. Il est composé de plusieurs éléments: une matrice support, une matrice modulaire et un serre-flan. La matrice support est serrée avec la matrice modulaire par des vis et l'outil de formage à bout hémisphérique de rayon 1 mm déforme progressivement une tôle serrée sur son contour. Le dispositif est fixé sur un dynamomètre 4 axes pour la mesure des efforts de formage comme le montre la Fig. 4b. Dans cette étude, l'outil suit une trajectoire hélicoïdale (Fig. 4d) et déforme localement une tôle en cuivre FPG (épaisseur 0.21 mm) de manière incrémentale jusqu'à ce que la forme finale de la pièce soit atteinte (Fig. 4c). La lubrification (huile et eau) de l'interface tôle/outil a été utilisée au cours des expériences pour réduire le frottement et améliorer la formabilité des flans.

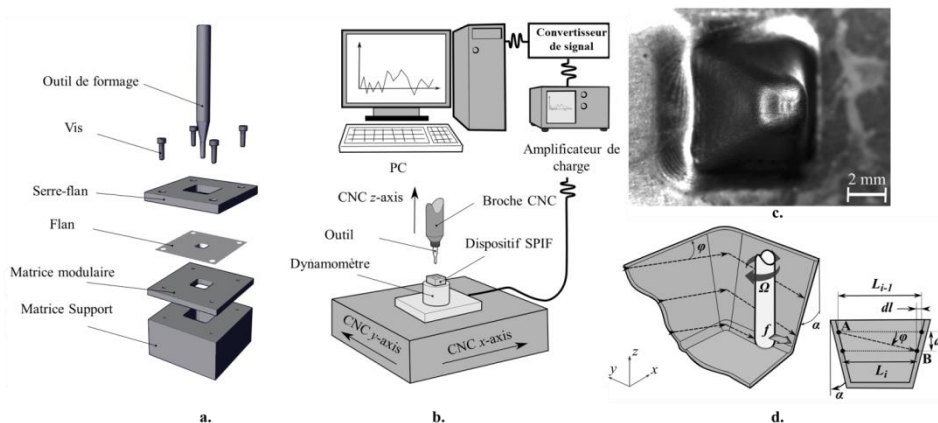


FIG 4- Dispositif expérimental: (a) dispositif de SPIF, (b) principe d'acquisition des efforts de formage, (c) Pièce en forme de pyramide, (d) Stratégie de formage hélicoïdale.

4.2 Distribution des épaisseurs

L'inconvénient le plus important de ce procédé est l'amincissement de la tôle. Dans cette section, les données expérimentales des épaisseurs sont obtenues par la métrologie optique (Werth VideoCheck IP). Ensuite, elles sont calculées en mesurant la distance normale entre les surfaces interne et externe de la pièce formée. La répartition des épaisseurs relative aux tailles de grains est présentée sur Fig. 5. Cette distribution révèle des

évolutions identiques. Elle présente une diminution considérable, notamment dans les zones de formage, tandis que l'épaisseur de la base reste pratiquement inchangée. La valeur moyenne minimale des épaisseurs est de 0,07 mm, ce qui correspond à un amincissement de 66% conformément avec la prédiction de la loi des sinus [4].

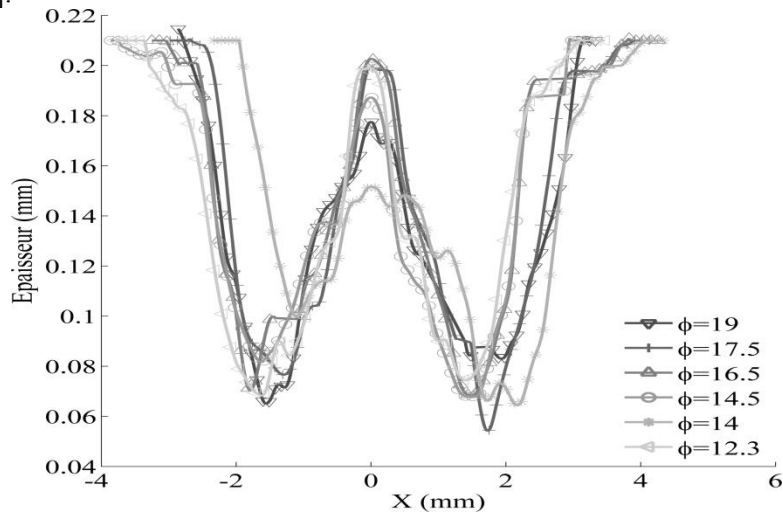


FIG 5-Evolution des épaisseurs pour chaque taille de grains.

4.3 Efforts de formage

Dans cette section, une attention particulière est accordée à l'étude de l'influence de la taille des grains sur l'évolution des efforts de formage suivant l'axe Z.

Une campagne de tests de formage incrémental a été effectuée sur des flans avec différentes tailles initiales de grains afin d'étudier l'influence de la microstructure sur les efforts de formage lors de ce procédé. Pour une meilleure compréhension de l'évolution de ces efforts, un modèle analytique est proposé:

$$F_z = \left(F_\infty^1 (1 - \exp(-k_1 X^{n_1})) - F_\infty^2 (1 - \exp(-k_2 \langle X - X_1 \rangle^{n_2})) \right) \frac{\langle X_f - X \rangle}{|X_f - X|} \tag{1}$$

Avec
$$\langle X \rangle = \begin{cases} 0 & \text{si } X \leq 0 \\ X & \text{si } X > 0 \end{cases} \tag{2}$$

Où les paramètres ($k1, n1$) et ($k2, n2$) décrivent l'évolution des efforts de formage respectivement lors des phases de flexion et d'écroutissage (Fig. 6a). F_∞^1 et F_∞^2 sont les valeurs respectivement des efforts maximal et minimale lors de l'écroutissage. $X1$ est la valeur à partir de laquelle l'écroutissage et l'amincissement commencent. La valeur Xf correspond à la position où la rupture peut éventuellement être observée. Les évolutions des efforts suivant l'axe Z durant le cycle de formage sont illustrées sur la Fig. 6b. La tendance des efforts de formage est déterminée par deux mécanismes et illustrés, pour le cas représentatif $\Phi=9,5$, sur la Fig . 6a.

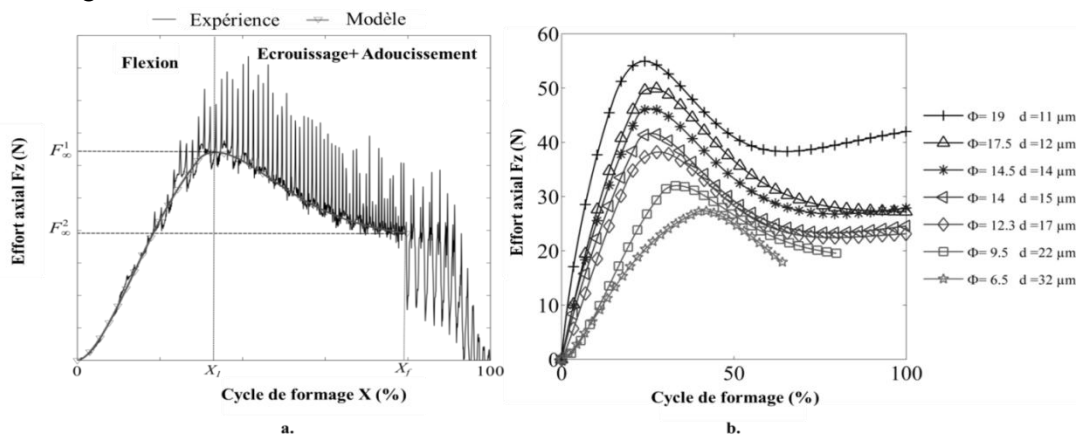


FIG 6- Évolutions typiques des efforts de formage expérimental et analytique, (b) évolutions des efforts analytiques [5].

Chaque courbe est caractérisée par un pic (phase de flexion) et ensuite une diminution et une stabilisation (écrouissage et adoucissement) lorsque l'outil se déplace le long du contour. Le premier mécanisme commence à partir d'un point de départ jusqu'à l'effort maximal F_{∞}^1 et caractérisé par un comportement de flexion pur. Le second est observé après la position XI et représente une réduction du niveau d'effort due à l'étirage. Dans ce cas, l'amincissement et l'écrouissage de la tôle se produisent. Les résultats expérimentaux montrent que la tendance de l'effort de formage dépend fortement de l'effet d'échelle. En effet, la diminution du nombre de grains par l'épaisseur résulte en une diminution de l'effort de formage. En outre, la position maximale XI augmente avec la taille de grains tandis que la valeur de la position de rupture Xf diminue.

5 Conclusion

La compréhension et la connaissance de comportement mécanique des matériaux dans les échelles conventionnelles ne sont plus valables pour le micro-formage dues à l'effet d'échelle. Il est donc nécessaire d'étudier davantage cet effet et avoir une compréhension approfondie du comportement des matériaux régissant le micro-formage. Dans cet article, des essais de traction des éprouvettes en cuivre FPG pour différentes tailles de grains initiales ont été effectués. Les résultats montrent une diminution de la limite d'élasticité, la résistance à la traction et la ductilité avec la diminution du nombre des grains par épaisseur. De plus, une campagne d'essais expérimentaux de formage incrémental « mono-point » a été réalisée sur des flans avec les mêmes tailles de grains initiales afin d'étudier l'effet de la microstructure sur l'évolution des efforts de formage. Une excellente corrélation avec les résultats des essais de traction a été constatée. En effet, une évolution décroissante du niveau des efforts de formage en fonction de la taille de grains a été remarquée. Ceci est cohérent avec l'effet de Hall-Petch.

References

- [1] Altan T., G. Ngaile et G. Shen. Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications, ASM International, Materials Park, Ohio (2004)
- [2] Vollertsen, F., H. Schulze Niehoff, et Z. Hu. State of the art in micro forming. International Journal of Machine Tools and Manufacture 46, no 11 (septembre 2006): 1172-1179.
- [3] Vollertsen F., D. Biermann, H.N. Hansen, I.S. Jawahir, et K. Kuzman. Size effects in manufacturing of metallic components. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, no 2 (2009): 566-587.
- [4] Jeswiet J., F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, et J. Allwood. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. CIRP Annals - Manufacturing Technology 54, no 2 (2005): 88-114.
- [5] Ben Hmida R., S. Thibaud, A. Gilbin, et F. Richard. Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and microparts: Experimental investigations. Materials & Design 45 (mars 2013): 155-165.
- [6] Dejardin S., S. Thibaud et JC. Gelin. Etude numérique et expérimentale du formage incrémentale pour les pièces de petites dimensions. CFM 2007. Grenoble, France.
- [7] Obikawa T., S. Shunsuke, et H. Tomomi. Dieless incremental micro-forming of miniature shell objects of aluminum foils. International Journal of Machine Tools and Manufacture 49, no 12-13 (octobre 2009): 906-915.
- [8] Sekine T., et T. Obikawa. Micro Incremental Forming Characteristics of Stainless Foil ». Key Engineering Materials 447-448 (septembre 2010): 346-350.
- [9] Otsu M., H Taniguchi, et K. Takashima. Micro-Incremental Forming of Ti and Au Foils by Indentation Method. Key Engineering Materials 345-346 (2007): 1101-1104.
- [10] Engel U., et R. Eckstein. Microforming—from basic research to its realization. Journal of Materials Processing Technology 125-126 (9 septembre 2002): 35-44.
- [11] ASTM E 112-96 (reapproved 2004), 2004. Standard test methods for determining average grain size. p. 1-25.
- [12] Hall E O. The deformation and ageing of mild steel : iii. discussion of results. Proc Phys Soc 1951; B64, 747-753.
- [13] Petch N J. The cleavage strength of polycrystals. J Iron Steel institute 1953; 174, 25-28.
- [14] Miyazaki S., Shibata K, Fujita H. Effect of specimen thickness on mechanical properties of polycrystalline aggregates with various grain size. Acta Meta 1979; 27, 855 – 862.