

Plan d'expériences numérique pour l'analyse des conditions de contact en microformage

Cyrille Barbier, Sébastien Thibaud, Philippe Picart & Jérôme Chambert

Institut FEMTO-ST
Université de Franche Comté
Laboratoire de Mécanique Appliquée R. Chaléat
24 rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon
cyrille.barbier@univ-fcomte.fr

Résumé :

Les effets d'échelle en microformage peuvent être observés aussi bien sur l'écroutissage du matériau que dans les conditions de frottement à l'interface outil/matière. Ici nous proposons un plan d'expériences numérique basé sur des essais de compression de cylindre afin de mettre en évidence l'influence des propriétés géométriques de surface sur l'effort de compression. Les surfaces de l'outil et du cylindre ont été modélisées par un profil sinusoïdal. Ainsi, les cinq paramètres d'entrée pour le plan d'expériences numérique sont l'amplitude et la période du profil sinusoïdal pour l'outil et le cylindre ainsi que le déphasage entre les deux profils en contact. L'évolution de l'effort de compression est utilisée comme paramètre de sortie du plan d'expériences numérique. L'analyse des résultats du plan permet de mettre en évidence la sensibilité des paramètres tribologiques des surfaces vis-à-vis de l'effort de compression. Sur la base de ce plan d'expériences numérique, une modélisation plus réaliste des conditions de contact et frottement en microformage tenant compte des critères de rugosité peut être envisagée.

Abstract :

In microforming, the so-called size effects can be observed in the material flow behaviour as well as in the frictional behaviour. A numerical design of experiments (DOE) is based on cylinder upsetting tests to define the influence of surface geometric properties on the resultant force. The tool and workpiece surfaces have been modelled using a sinusoidal profile. Then, the five input parameters of the DOE are the amplitude and the period of the sinusoidal profile for the workpiece and the tool, and the phase displacement between the two sinusoidal profiles. The evolution of the resultant force is considered as the output parameter of the DOE. The analysis of the results permits to show the sensitivity of the tribological parameters with respect to the resultant force. Based on this DOE, a more realistic modeling of the conditions of contact and friction in microforming, taking account of the roughness, can be considered.

Mots-clefs :

microformage ; essais de compression ; plan d'expériences

1 Introduction

Les technologies de mise en forme doivent s'adapter au microformage du fait d'une demande de plus en plus forte de miniaturisation des composants en électronique et micromécanique. Comme l'expose Engel (2005), le problème en réduisant la taille des pièces est l'apparition de ce qu'on appelle les effets d'échelle. Les deux principaux effets d'échelle qui ont fait l'objet de recherche dans le domaine du microformage concernent la contrainte d'écoulement du matériau d'une part et le frottement d'autre part. Le premier a été longuement étudié tandis que le second nécessite encore des recherches. L'effet d'échelle sur le frottement a été mis en évidence par Sofuoglu *et al.* (1999) et Zhang *et al.* (2003) lors d'essais de compression d'anneau montrant une augmentation du frottement lorsque la taille de l'échantillon diminue. Ils ont

montré que les défauts des surfaces en contact sont liés à l'évolution du frottement qui dépend des conditions de contact.

A l'échelle macroscopique les surfaces peuvent être représentées par des surfaces planes, ce n'est pas le cas en microformage, la taille des aspérités du profil ne peut plus être négligée. Zhang *et al.* (2003) ont réalisé des simulations pour mettre en évidence l'évolution du frottement entre un corps rigide avec de multiples aspérités et une surface rugueuse déformable. Jeon *et al.* (2005) ont introduit une relation $f(m) = f(a, t)$, où l'amplitude a et la période t décrivent un profil elliptique pouvant être relié au paramètre standard de rugosité R_a , afin de modéliser l'influence du coefficient de frottement m en microformage. Notre étude montre l'influence de deux profils sinusoïdaux en contact durant des essais de compression sur l'effort normal résultant. Les profils sinusoïdaux représentent la rugosité des surfaces réelles. L'objectif de cette étude est de proposer un modèle tenant compte des critères de rugosité afin de pouvoir ensuite étudier le frottement en microformage. Le modèle a été établi grâce à un plan d'expériences numérique.

2 Définition du modèle géométrique

Dans cette étude, les simulations ont été réalisées grâce au logiciel de calcul par éléments finis LS-Dyna. Du fait de la symétrie du problème, la modélisation de l'essai est axisymétrique. Les cylindres utilisés pour les essais de compression sont en alliage de cuivre (CuZn10), couramment utilisé en microforgeage, et les plateaux de compression sont considérés comme étant des solides rigides. La loi de comportement du matériau utilisée pour la simulation est de type élasto-plastique. Des éléments quadrangles axisymétriques ont été utilisés pour modéliser le cylindre déformable et le maillage a été réalisé grâce au logiciel I-Deas. Le cylindre a été maillé avec environ 7800 éléments. Le cylindre a un diamètre initial de 10 mm et une hauteur initiale de 10 mm. La hauteur des cylindres après compression est réduite de 20% par rapport à leur hauteur initiale. Comme l'ont fait Hu *et al.* (1999), l'écart moyen arithmétique du profil R_a et le pas moyen de rugosité S_m ont été choisis comme paramètres significatifs pour décrire les caractéristiques géométriques des surfaces. Les surfaces du cylindre et des plateaux de compression sont modélisées par des profils sinusoïdaux comme le montre la Figure 1. Ainsi le profil sinusoïdal est caractérisé par son amplitude a et sa période t représentant le pas moyen de rugosité de la surface, pouvant être reliés au R_a de la surface grâce à l'Equation 1 proposée par Becker *et al.* (2003). D'après les valeurs de la littérature, l'amplitude des deux profils est choisie dans la plage 0.05 – 0.3mm et la période dans la plage 0.7 – 3mm.

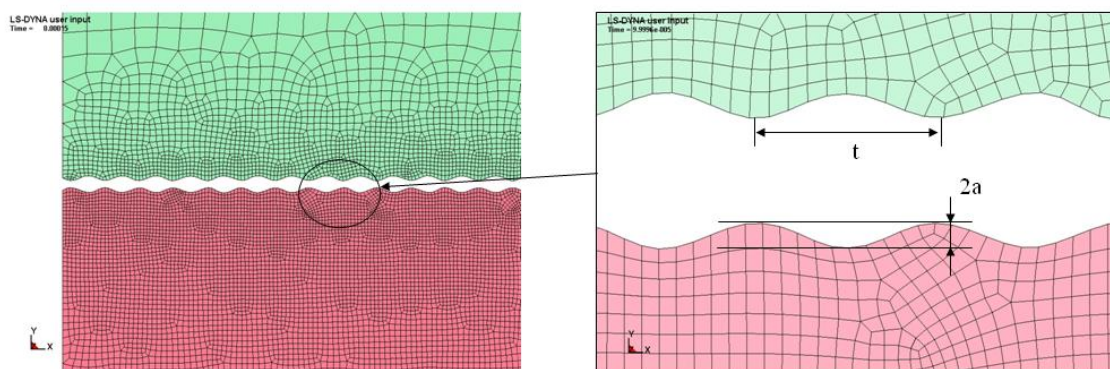


FIG. 1 – Maillage éléments finis du cylindre et des outils

Propriétés du matériau	Valeurs
Module d'Young (GPa)	100
Coefficient de Poisson	0.343
Coefficient de frottement statique	0.12

TAB. 1 – Paramètres utilisés pour les simulations numériques de compression

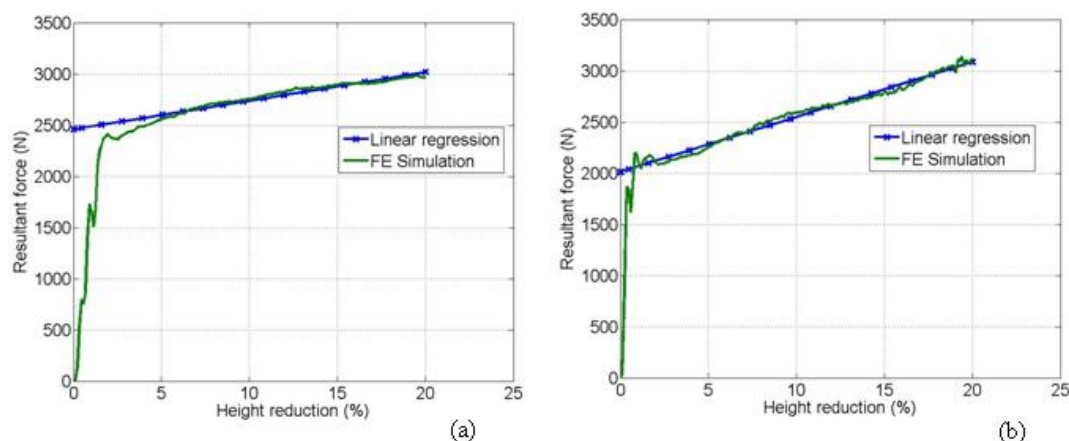


FIG. 2 – Evolution de l'effort résultant en fonction de la réduction de hauteur avec (a) $R_a^{piece} = 2.9\mu m$, $S_m^{piece} = 70\mu m$, $R_a^{outil} = 0.01\mu m$ and $S_m^{outil} = 300\mu m$ et (b) $R_a^{piece} = 0.01\mu m$, $S_m^{piece} = 300\mu m$, $R_a^{outil} = 2.9\mu m$ et $S_m^{outil} = 300\mu m$

$$R_a = \frac{\pi a}{t^2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{t} \right) \quad (1)$$

Afin d'étudier l'influence du contact entre deux profils sinusoïdaux sur l'effort de compression résultant indépendamment du frottement, le coefficient de frottement est fixé pour toutes les simulations. Les paramètres matériaux utilisés pour les simulations sont résumés dans le Tableau 1.

3 Plan d'expériences numérique

Le plan d'expériences numérique a pour objectif, à partir des valeurs de R_a et S_m des deux surfaces en contact, de modéliser l'évolution de l'effort résultant lors d'un essai de compression. Ce modèle servira ensuite à étudier l'effet d'échelle sur le frottement indépendamment des états de surface.

Dans cette étude, les surfaces de l'outil et de la pièce sont représentées par un profil sinusoïdal. Il y a deux facteurs pour chacune des surfaces en contact ainsi qu'un déphasage possible entre les deux signaux ; par conséquent cinq facteurs sont retenus comme paramètres d'entrée du plan d'expériences numérique. En faisant l'hypothèse de linéarité du phénomène dans le domaine de variation considéré, deux niveaux pour chaque facteur sont considérés. Le Tableau 2 donne les cinq facteurs avec leurs niveaux haut et bas. Dans cette étude, les interactions entre les facteurs étant inconnues, toutes les interactions à deux facteurs sont prises en compte. Par conséquent, un plan factoriel complet à deux niveaux est construit et 2^5 simulations sont réalisées. Le logiciel Statgraphics Plus développé par Goupy (2006) est utilisé pour la construction

Paramètres des profils	niveau bas	niveau haut
Facteur A : amplitude cylindre (<i>mm</i>)	0.05	0.3
Facteur B : période cylindre (<i>mm</i>)	0.7	3
Facteur C : amplitude outil (<i>mm</i>)	0.05	0.3
Facteur D : période outil (<i>mm</i>)	0.7	3
Facteur E : déphasage outil (<i>rad</i>)	0	π

TAB. 2 – Paramètres d'entrée du plan d'expériences numérique

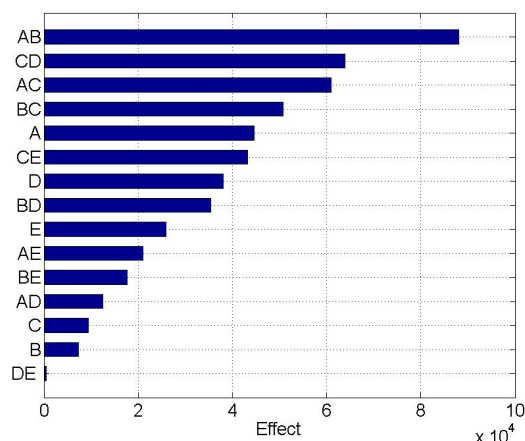


FIG. 3 – Diagramme de Pareto pour la réponse du plan d'expériences

du plan, dont la liste des expériences est donnée dans le Tableau 3. Pour chaque simulation, la courbe effort de compression résultant-réduction de hauteur du cylindre est tracée. Sur la Figure 2(a) l'effort résultant est tracé avec $R_a^{piece} = 2.9\mu m$, $S_m^{piece} = 70\mu m$, $R_a^{outil} = 0.01\mu m$ et $S_m^{outil} = 300\mu m$ et sur la Figure 2(b) avec $R_a^{piece} = 0.01\mu m$, $S_m^{piece} = 300\mu m$, $R_a^{outil} = 2.9\mu m$ et $S_m^{outil} = 300\mu m$. Comme le montrent ces figures, au-delà de 4.75% de réduction, la courbe peut être interpolée par une régression linéaire et la pente de la droite de régression est choisie comme paramètre de sortie du plan d'expériences numérique. Le Tableau 3 liste les réponses.

4 Résultats et analyse

Le logiciel Statgraphics Plus permet de déterminer les effets de chaque facteur et de tracer le diagramme de Pareto donné Figure 3. La règle : "80% des effets proviennent de X% des paramètres" est appliquée. Ici 80% des effets proviennent de 53% des paramètres. 8 paramètres ont donc été conservés comme étant influents sur la réponse du plan d'expériences. Le modèle analytique est donné par l'Equation 2 :

$$\begin{aligned}
 Y = & 713222 - 88126X_{AB} + 63963X_{CD} - 61017X_{AC} \\
 & - 50809X_{BC} - 44587X_A - 43240X_{CE} + 38100X_D \\
 & - 35365X_{BD}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

L'analyse de la variance a été réalisée afin de connaître les paramètres qui sont réellement significatifs sur la réponse. Cette analyse est basée sur la comparaison entre la variance résiduelle du phénomène étudié et la variance des effets des facteurs et interactions retenus comme

Essai	Facteur A	Facteur B	Facteur C	Facteur D	Facteur E	Réponse
1	1	-1	-1	-1	1	810459
2	1	1	1	-1	-1	463747
3	-1	1	-1	-1	-1	830490
4	-1	1	1	-1	-1	923066
5	1	-1	-1	1	1	646972
6	1	-1	1	-1	1	487597
7	1	1	1	1	-1	402243
8	1	-1	1	1	1	1000000
9	1	1	-1	1	-1	646972
10	1	-1	-1	1	-1	787718
11	1	1	-1	1	1	734387
12	1	-1	1	-1	-1	698848
13	1	-1	-1	-1	-1	681431
14	-1	1	1	-1	1	790037
15	-1	1	1	1	-1	1000000
16	-1	1	-1	1	1	758210
17	1	-1	1	1	-1	1000000
18	1	1	-1	-1	1	897027
19	-1	-1	1	-1	1	542372
20	-1	1	-1	1	-1	738507
21	1	1	-1	-1	-1	707385
22	-1	-1	1	-1	-1	710726
23	-1	-1	-1	-1	1	657693
24	-1	-1	1	1	1	671676
25	-1	-1	-1	1	1	599710
26	-1	-1	1	1	-1	984839
27	-1	-1	-1	-1	-1	587860
28	-1	-1	-1	1	-1	661521
29	-1	1	-1	-1	1	815469
30	1	1	1	1	1	535633
31	-1	1	1	1	1	852772
32	1	1	1	-1	1	197744

TAB. 3 – Liste des expériences et résultats

influent. Le test de Fisher-Snedecor permet cette comparaison pour un seuil de refus à un risque donné. Le Tableau 4 montre l'analyse de la variance où F_{table} est obtenu grâce à la table de Fisher-Snedecor pour un risque de 5%. Un facteur ou une interaction est considéré comme statistiquement significatif si $F_{calc} > F_{table}$. Grâce à cette analyse, seuls six facteurs sont considérés comme significatifs et la réponse du plan d'expériences numérique est donnée par l'Equation 3 :

$$Y = 713222 - 88126X_{AB} + 63963X_{CD} - 61017X_{AC} - 50809X_{BC} - 44587X_A - 43240X_{CE} \quad (3)$$

Un plan d'expériences numérique a été mis en place afin d'obtenir un modèle tenant compte de la rugosité de deux surfaces en contact. Des simulations sur le microformage vont pouvoir être réalisées sans avoir à représenter la rugosité des surfaces dans le modèle géométrique.

Source	Somme	ddl	Variance	F_{calc}	F_{table}	Significatif
Facteur A	63.6E9	1	63.6E9	5.03	4.49	oui
Facteur B	17.36E8	1	17.36E8	0.137	4.49	non
Facteur C	2.82E9	1	2.82E9	0.22	4.49	non
Facteur D	4.46E10	1	4.46E10	3.67	4.49	non
Facteur E	21.4E9	1	21.4E9	1.69	4.49	non
Facteur AB	2.48E11	1	2.48E11	19.65	4.49	oui
Facteur AC	1.19E11	1	1.19E11	9.42	4.49	oui
Facteur AD	5E9	1	5E9	0.39	4.49	non
Facteur AE	14.05E9	1	14.05E9	1.11	4.49	non
Facteur BC	82.6E9	1	82.6E9	6.53	4.49	oui
Facteur BD	4E9	1	4E9	3.16	4.49	non
Facteur BE	9.98E8	1	9.98E8	0.78	4.49	non
Facteur CD	1.3E11	1	1.3E11	10.35	4.49	oui
Facteur CE	5.98E9	1	5.98E9	4.73	4.49	oui
Facteur DE	9.33E6	1	9.33E6	0.0007	4.49	non
Résidus	2.03E11	16	1.26E10			
Total	1.04E12	31				

TAB. 4 – Analyse de la variance

5 Conclusions

Ce papier présente un modèle qui donne l'évolution de l'effort résultant en fonction des paramètres de rugosité lors d'un essai de compression. L'équation établie montre que l'interaction entre l'amplitude et la période pour la pièce est la plus significative. La même campagne d'essais numériques a été menée avec d'autres valeurs de coefficient de frottement et les conclusions sont les mêmes. Le modèle établi grâce au plan d'expériences numérique doit maintenant être validé par des essais expérimentaux.

Références

- Becker, P., Jeon, H., Chang, C., Bramley, A. 2003 A geometric approach to modelling friction in metal forming. *In annals of CIRP* **52** 209
- Engel, U. 2005 Tribology in microforming. *Wear* **260** 265-273
- Goupy, J. 2006 Introduction aux plans d'expériences *Dunod*
- Hu, Z.M., Pornbenjapakkul, V., Dean, T.A. 1999 Tool/Workpiece interface interaction and its influence on metal forming processes *In Proc. of the sixth ICTP Advanced technology of Plasticity, Nuremberg, Germany* **I** 317-322
- Jeon, H.J., Bramley, A.N. 2005 A friction model for microforming. *In Proc of the 1st Multi Material Micro Manufacture, Karlsruhe, Germany*
- Sofuoglu, H., Rasty, J. 1999 On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. *Tribol.Int.* **32** 327-335
- Zhang, S., Hodgson, P.D., Cardew-Hall, M.J., Kalyanasundaram, S. 2003 A finite element simulation of micro-mechanical friction behaviour in metal forming. *J.Mater.Process.Technol* **134** 81-91