



HAL
open science

Optimisation des surfaces additionnelles en emboutissage avec la méthode des surfaces de réponse

Karl Debray, Isabelle Titeux, Fabien Bognard, Ying-Qiao Guo

► **To cite this version:**

Karl Debray, Isabelle Titeux, Fabien Bognard, Ying-Qiao Guo. Optimisation des surfaces additionnelles en emboutissage avec la méthode des surfaces de réponse. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01813034

HAL Id: hal-01813034

<https://hal.science/hal-01813034>

Submitted on 12 Jun 2018

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.

Public Domain

Optimisation des surfaces additionnelles en emboutissage avec la méthode des surfaces de réponse

Debray K. - Titeux I. - Bogard F. – Guo Y.Q.

Groupe de Mécanique, Matériaux et Structures, Université de Reims Champagne Ardenne, Moulin de la Housse, BP 1039, 51687, Reims Cedex 2, France
karl.debray@univ-reims.fr, yq.guo@univ-reims.fr

RESUME. Les surfaces additionnelles ont une grande influence sur la qualité des pièces obtenues en emboutissage, mais leur conception requiert de nombreux essais correctifs longs et coûteux. Ce travail propose une méthodologie de conception, de modélisation et d'optimisation des surfaces additionnelles. En partant de la pièce désirée, les surfaces additionnelles de continuité G^1 sont automatiquement générées. Quatre variables géométriques de conception sont utilisées dans la procédure d'optimisation. Deux algorithmes d'optimisation sont combinés avec notre solveur d'emboutissage rapide dénommé « Approche Inverse »: FSQP (Programmation Séquentielle Quadratique) et RSM (Méthode des Surfaces de Réponse) sont testées et comparées. Deux fonctions objectifs sont considérées: une fonction d'épaisseur pour minimiser la variation d'épaisseur et une fonction d'aspect pour éviter l'apparition de défauts surfaciques sur la pièce.

ABSTRACT. The addendum surfaces have a great influence on the quality of the workpieces obtained by deep drawing process, but their design requires tedious trial-error corrections. In this paper, a methodology is proposed for the design, modelling and optimization of addendum surfaces. Starting with the desired workpiece, the addendum surfaces with G^1 continuity are automatically generated. Four geometrical dimensions are taken as the design variables in the optimization procedure. Two optimisation algorithms are combined with our fast forming solver called "Inverse Approach": FSQP (Feasible Sequential Quadratic Programming) and RSM (Response Surface Method) are tested and compared. Two objective functions are considered: the thickness function to minimize the thickness variation on the workpiece, the aspect function aiming to avoid the scratching defects.

MOTS CLES: Mise en forme, Approche Inverse, surfaces additionnelles, optimisation, FSQP, Méthode de Surface de Réponse.

KEYWORDS: Metal forming, Inverse Approach, addendum surface, optimization, FSQP, Response Surface Method.

1. Introduction

Dans un procédé d'emboutissage, les surfaces additionnelles ont une grande influence sur la formabilité de la pièce. Une bonne conception doit permettre (i) de faciliter l'équilibre global de la tôle sous la force du poinçon, (ii) de minimiser la consommation de matière, (iii) d'assurer un bon état de surface (iv) et d'éviter les problèmes de rupture et de plis. Luet *et al.* (1998) ont présenté une approche de fonction qualité pour minimiser le risque de rupture, de plissement et de zones non étendues. Naceur *et al.* (2001) ont optimisé la forme du flan initial, les forces de retenues et les propriétés des matériaux en utilisant un solveur rapide appelé « Approche Inverse » (A.I.). Notre objectif est de développer une procédure automatique pour la conception et l'optimisation des surfaces additionnelles en utilisant l'A.I. et un algorithme d'optimisation. En partant de la DAO de la pièce désirée, les surfaces additionnelles sont automatiquement créées et le maillage élément fini est généré à l'aide d'un fichier de commande GID. Dans la boucle d'optimisation, l'A.I. permet de calculer rapidement la fonction objectif et les gradients, les paramètres des surfaces additionnelles peuvent ainsi être optimisés (Guo *et al.*, 2000). Cette démarche a été appliquée à une boîte carrée et à une coupelle d'amortisseur. Les résultats ont montré l'efficacité et l'intérêt industriel.

2. Conception des surfaces additionnelles

La pièce désirée est représentée par des surfaces Nurbs issus de la DAO. Pour créer les surfaces additionnelles, nous devons d'abord détecter le contour inférieur de la pièce désirée ainsi que les points, les courbes et les surfaces correspondants (Fig. 1). Si le contour de la pièce est irrégulier, des surfaces complémentaires doivent être rajoutées. Les surfaces additionnelles comprennent les murs de protection, les surfaces du rayon d'entrée matrice et celles sous serre flan. La continuité G^1 doit être assurée entre deux surfaces adjacentes.

Pour générer les surfaces additionnelles, nous créons d'abord des courbes de profil telles que PCDE (Fig. 1). Cette opération est menée dans un plan de travail normal au vecteur tangent \vec{t}_p . Un système local est établi comme suit: le vecteur tangent \vec{t}_p est pris comme axe y, les axes x et z sont situés dans le plan de travail et l'axe x est horizontal.

Dans notre procédure d'optimisation, la position et le rayon de l'arrondi d'entrée matrice ainsi que la largeur de la tôle sous serre flan sont pris comme variables de conception et donc connus à chaque itération. La détermination d'une courbe de profil PCDE est un problème 2D dans le plan de travail (Fig. 1) dont le but est de déterminer une courbe lisse entre le point P et le cercle de centre G. Pour y parvenir nous utilisons des fonctions paramétriques cubiques de type Hermite:

$$x = a_1 t^3 + b_1 t^2 + c_1 t + d_1 \quad ; \quad y = a_2 t^3 + b_2 t^2 + c_2 t + d_2 \quad \text{avec} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad [1]$$

Les coefficients a_i , b_i , c_i et d_i peuvent être déterminés à partir de (1) la position des points P et C, (2) la pente des vecteurs tangents en P et C, (3) la courbure de la courbe en P et C. En fait, la position du point C n'étant pas connue, nous la déterminons en minimisant la longueur de la courbe PCD. Par ailleurs, la continuité G^1 entre les surfaces jointives nécessite la création de courbes de profil en de nombreux points du contour inférieur. Les commandes du logiciel GID sont écrites dans un fichier batch afin d'automatiser la création des surfaces.

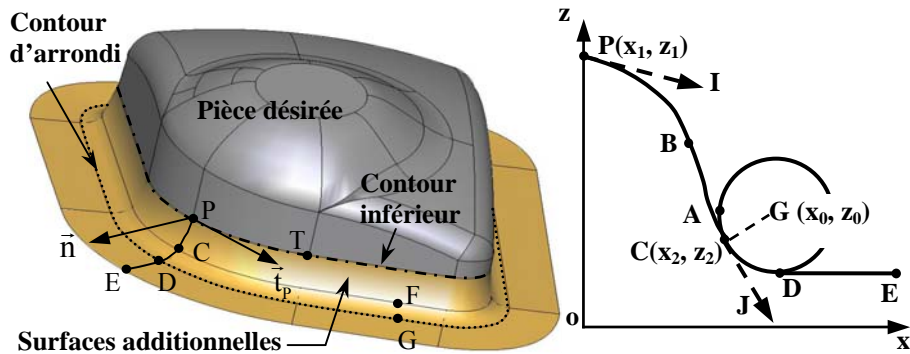


Figure 1. Définition des contours et des courbes de profil

Pendant l'optimisation, l'évolution des surfaces additionnelles est suivie par la projection du maillage EF sur les nouvelles surfaces afin d'éviter le remaillage. Pour une surface définie par 4 courbes et 8 points de contrôle, un système de référence est introduit pour obtenir une interpolation quadratique (Batoz *et al.*, 1990). Les coordonnées de référence d'un nœud $M(\xi, \eta)$ peuvent être déterminées dans le maillage initial et restent inchangées. Au cours de l'optimisation, les coordonnées réelles évoluent en fonction des nouvelles positions des 8 points de contrôle.

4. Optimisation des surfaces additionnelles

Dans le domaine de l'emboutissage, il est admis que les défauts usuels tels que la striction et le plissement sont associés à la variation d'épaisseur (Naceur *et al.*, 2001). Toutefois, minimiser la variation d'épaisseur conduit à une trop forte uniformisation d'épaisseur non nécessaire. En pratique, il suffit d'imposer juste des limitations sur l'amincissement et l'épaississement d'épaisseur [2]. La fonction objectif choisie est une fonction d'aspect pour éviter le passage des surfaces apparentes de la pièce sur le rayon d'entrée matrice et donc éviter les rayures. Ainsi les positions initiales des nœuds au dessus du contour inférieur \widehat{PT} (Fig. 1) doivent être à l'intérieur du contour d'arrondi \widehat{DG} . Nous définissons:

$$-20\% \leq (h^e - h^0) / h^0 \leq 15\% \quad \text{et} \quad J^{asp} = \max(\|u_i^-\| - d_i) \quad [2]$$

où h^0 est l'épaisseur initiale de la tôle, h^e l'épaisseur actuelle d'un élément, \bar{u}_i le déplacement horizontal d'un nœud sur le contour \widehat{PT} et d_i la distance horizontale entre les points P et D (Fig. 1). Pour une boîte carrée, quatre variables de conception (H , R , B et α) sont choisies (Fig. 2).

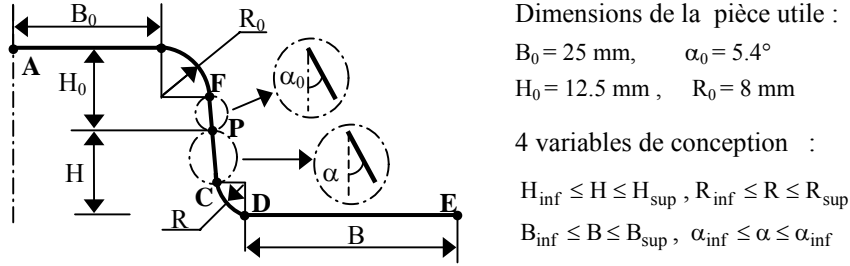


Figure 2. Définition des variables géométriques de conception

Un algorithme d'optimisation est combiné avec l'Approche Inverse très rapide (Guo *et al.*, 1990, 2000). Elle exploite au maximum la connaissance de la forme de la pièce finale désirée pour trouver itérativement les positions des nœuds dans le plan initial satisfaisant l'équilibre dans la pièce finale.

L'algorithme d'optimisation FSQP s'appuie sur la méthode SQP classique (Lawrence *et al.*, 1996) qui nécessite le calcul des gradients. Lorsque ces gradients sont calculés par perturbations, des problèmes numériques peuvent causer la divergence. Pour palier cet inconvénient, nous avons implanté aussi la méthode des surfaces de réponse (Jansson *et al.*, 2005). Notre démarche consiste à rechercher, à l'aide de FSQP, le point optimum en utilisant une fonction approximée de la fonction objectif. L'approximation de $J(x)$ est réalisée avec la méthode MLS (Moving Least Squares) qui permet d'obtenir une fonction lissée à partir d'un vecteur $\{J_i\}$ comportant les valeurs réelles de la fonction objectif en certains points $\{x_i\}$ judicieusement choisis sur le domaine d'étude:

$$\tilde{J}(x) = \langle p(x) \rangle \{a(x)\} \quad \text{avec} \quad \langle p(x) \rangle = \left\langle 1, x_1, \dots, x_n, x_1 x_2, \dots, x_{n-1} x_n, \frac{x_1^2}{2}, \dots, \frac{x_n^2}{2} \right\rangle \quad [3]$$

où le vecteur $\langle p(x) \rangle$ est constitué de monômes classiques pour des fonctions de bases polynomiales linéaire et quadratique, le vecteur $\{a(x)\}$ est constitué des coefficients d'ajustement pour le point d'approximation x . Les coefficients a_i sont déduits de la minimisation des écarts entre les valeurs approximées et les valeurs réelles $\{J_i\}$ calculées aux points $\{x_i\}$ et pondérées par un poids $w_i(x, x_i)$ qui permet d'assurer le caractère local de l'approximation et la continuité des approximations successives. Dans ces conditions, on obtient (Breitkopf *et al.*, 2003):

$$\{a(x)\} = [A]^{-1} [B] \{f_i\} \quad \text{avec} \quad [B] = [P][W] \quad ; \quad [A] = [B][P]^T \quad [4]$$

$$[P] = [\dots p(x_i) \dots] \quad ; \quad W_{ii} = w_i(x_i, x) \quad ; \quad W_{ij} = 0 \quad \text{dans} \quad [W] \quad [5]$$

$$w_i(x, x_i) = \left[1 - (x - x_i)^2 / r_i^2 \right]^2 \quad \text{si } x - x_i \leq r_i ; \quad \text{sinon } w_i(x, x_i) = 0 \quad [6]$$

où r_i est une valeur limite déduite du pas caractérisant la grille caractérisant la positions des points où les fonctions objectives réelles sont calculées. Dans cette étude, nous avons utilisé une grille initiale comportant 3 points pour chaque variable et couvrant la totalité du domaine d'étude. La grille de base comporte donc 3^N points où N est le nombre de variables à optimiser. La méthode MLS est utilisée pour approcher la fonction objectif d'aspect et aussi les deux limitations définies dans [2]. A la première itération les fonctions approximées dans la grille de base sont exploitées par FSQP. Le point optimum trouvé est alors utilisé pour créer une nouvelle grille centrée sur le point de la grille de base le plus proche. L'adjonction d'une grille supplémentaire de taille plus petite permet d'affiner l'approximation dans le voisinage du premier point optimum trouvé. En procédant itérativement de la sorte, l'approximation du problème d'optimisation s'affine et converge vers un point optimum approximé. Des polynômes d'approximation linéaires sont retenus car ils donnaient de meilleurs résultats sur l'ensemble des tests réalisés.

5. Résultats numériques

Une boîte carrée est étudiée pour l'optimisation des surfaces additionnelles. Les dimensions des parties utiles sont précisées à la figure 2. Un quart de la boîte est discrétisé en 1678 éléments triangulaires. Les calculs sont effectués en 36 mn sur un PC avec FSQP et 52 mn avec RSM. L'optimisation donne les valeurs optimales suivantes (FSQP/RSM): $H = 12.3/13.9$ mm, $\alpha = 10.7/10.4^\circ$, $R = 7.5/7.1$ mm, $B = 29/30$ mm, $|J^{\text{asp}}| = 0.005/0.046$, $h = -12.3/-12.3\%$ à $13.3/14.9\%$. Dans les deux cas la variation d'épaisseur reste dans les limites imposées, FSQP donne des résultats légèrement plus avantageux en un temps plus court (Fig. 3).

Le 2^{ème} exemple est une coupelle d'amortisseur discrétisée en 4382 éléments. L'optimisation avec FSQP (90 mn) et RSM (67 mn) donne les variables suivantes (FSQP/RSM): $H = 15.9/16.7$ mm, $\alpha = 13.1/30.0^\circ$, $R = 15/15$ mm, $B = 80/80$ mm, $|J^{\text{asp}}| = 26.6/25.8$, $h = -3.6/-3.6\%$ à $14.9/15.0\%$. Nous remarquons que la fonction d'aspect diminue, mais ne peut pas être annulée à cause d'un avalement trop important. Pour la coupelle RSM donne des résultats légèrement meilleurs.

6. Conclusion

Un outil numérique a été développé pour concevoir et optimiser, de manière automatique, les surfaces additionnelles dans l'emboutissage de tôles minces. Deux algorithmes d'optimisation FSQP et RSM ont été combinés avec notre code de génération de surfaces et notre solveur d'emboutissage rapide. L'ensemble conduit à une procédure d'optimisation efficace. Une fonction d'aspect est prise comme

fonction objectif. Quatre paramètres géométriques sont pris comme variables de conception à optimiser. La présente démarche a été appliquée avec succès à une boîte carrée et à une coupelle d'amortisseur. Les résultats et les temps de calcul obtenus ont montré l'efficacité et l'intérêt industriel de la méthodologie proposée. La méthode RSM sans calcul des gradients semble plus intéressante mais son intérêt risque de diminuer si le nombre des variables d'optimisation devient trop important.

Les auteurs remercient le « Pôle Mécanique et Matériaux de Champagne Ardenne (PMMC) » pour son soutien financier dans le cadre d'un projet CPER.

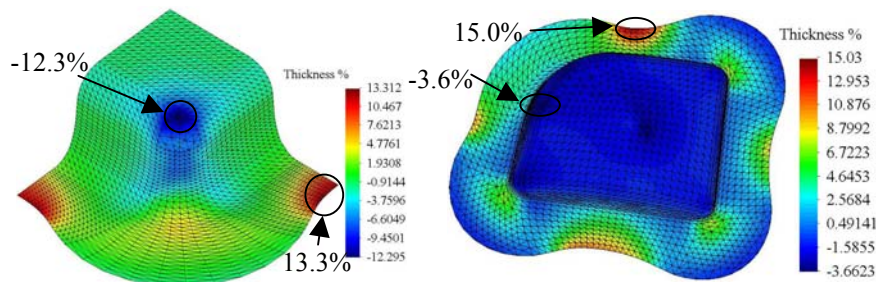


Figure 3. Variation d'épaisseur dans la boîte carrée (FSQP) et la coupelle (RSM)

7. Bibliographie

- Batoz J., Dhatt, "Modélisation des structures par éléments finis", HERMES, Paris, 1990.
- Breitkopf P., Naceur H., Rassineux A., Villon P., "Moving least squares response surface approximation for metal forming applications", *Computers and Structures*, Nov., 2003.
- Guo Y.Q., Batoz J.L., Detraux J.M., Duroux P., "Finite element procedures for strain estimations of sheet metal forming parts", *I.J. Num. Meth. Eng.* (39) p.1385-1401, 1990.
- Guo Y.Q., Batoz J.L., Bouabdallah S., Naceur H., "Recent developments on the Analysis and Optimum Design of Sheet Metal Forming Parts using a Simplified Inverse Approach", *Computers & Structures*, Vol. 78, p. 133-148, 2000.
- Jansson T., Anderson A., Nilsson L., "Optimization of draw-in for an automotive sheet metal part: An evaluation using surrogate models and response surfaces", *J. Materials Processing Technology*, vol. 159, issue 3, p. 426-434, 2005.
- Lawrence C.T., Tits A.L., "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming", *Optimization Methods and Software* (6), pp. 265-282, March, 1996.
- Luet D., Duval J.L., Di-Pasquale E., Rigaud V., Le Roch Y., "Quality function approach to design and optimization of stamping process", *Int. Cong expo SAG*, Detroit, USA, 1998.
- Naceur H., Guo Y.Q., Batoz J.L., Knopf-Lenoir C., "Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process", *Int. J. of Mechanical Sciences*, Vol. 43, Issue 10, p. 2407-2434, 2001.