



**HAL**  
open science

# Conception automatique et optimisation des surfaces additionnelles pour le procédé d'emboutissage

Ming Dong, Karl Debray, Yigong Guo

► **To cite this version:**

Ming Dong, Karl Debray, Yigong Guo. Conception automatique et optimisation des surfaces additionnelles pour le procédé d'emboutissage. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01413787

**HAL Id: hal-01413787**

**<https://hal.science/hal-01413787>**

Submitted on 11 Dec 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Conception automatique et optimisation des surfaces additionnelles pour le procédé d'emboutissage

M. Dong, K. Debray, Y.Q. Guo

Laboratoire GRESPI/LMNEA n°4301

Université de Reims Champagne-Ardenne

Moulin de la Housse, BP 1039, 51687, Reims Cedex 2, France

Email : [karl.debray.yq.guo@univ-reims.fr](mailto:karl.debray.yq.guo@univ-reims.fr) , [ming.dong@etudiant.univ-reims.fr](mailto:ming.dong@etudiant.univ-reims.fr)

---

**Résumé:** L'emboutissage de pièces en tôles minces nécessite l'ajout de surfaces additionnelles autour de la pièce désirée afin d'améliorer la formabilité et la qualité. Ces surfaces additionnelles sont principalement constituées de murs de protection et de surfaces sous serre-flan. La conception automatique des surfaces additionnelles s'appuie sur la création des courbes de profilé et des surfaces de COONS. Des outils paramétriques de conception-simulation-optimisation permettent d'aboutir rapidement à des surfaces additionnelles optimales.

**Mot clé:** Surfaces additionnelles, CAO, emboutissage, approche inverse, optimisation.

---

## 1 Introduction générale

Le procédé d'emboutissage consiste à fabriquer une pièce de forme complexe en déformant une tôle mince à l'aide d'outils tels que le poinçon, la matrice, le serre-flan. Pendant le procédé, la tôle subit une grande transformation impliquant des phénomènes multi-physiques comme l'élasto-plasticité avec écrouissage et anisotropies, l'endommagement et la rupture, le contact et le frottement ... Dans un tel procédé, de nombreux artifices peuvent être utilisés pour améliorer la formabilité et la qualité de la pièce souhaitée. Ces artifices sont soit des paramètres mécaniques tels que le matériau, les forces de serrage, la forme et la position des jons de retenus, soit des aspects d'ordre géométriques tels que l'ajout de surfaces additionnelles (SA) et l'optimisation de la forme du flan initial [3], [8].

Notre étude se focalise sur la conception automatique et l'optimisation des surfaces additionnelles (SA). Les SA ont une grande influence sur la formabilité de l'embouti désiré. Une bonne conception des SA permet : (i) de faciliter l'équilibre global de la tôle, (ii) de minimiser la quantité de matériau consommé, (iii) d'assurer une surface lisse sans rayure, (iv) et surtout d'éliminer les défauts pouvant apparaître sur la pièce utile (rupture et plissement de la tôle). Pour parvenir à des SA optimales, les outils numériques sont beaucoup plus rapides et économiques que les essais expérimentaux longs, fastidieux et coûteux. Par ailleurs, l'avancée des technologies informatiques et le nombre sans cesse croissant d'outils numériques sont autant d'arguments pour encourager les industriels à tendre vers une démarche numérique de conception et d'optimisation des SA.

## 2 Conception automatique

Généralement, les SA se décomposent en trois parties (figure 1) : (i) les surfaces de mur de protection ( $S_1$ ), (ii) les surfaces de rayon d'entrée matrice ( $S_2$ ) et (iii) les surfaces sous serre-flan ( $S_3$ ).

## 2.1 Construction de la surface sous serre-flan

Dans notre démarche, la surface sous serre-flan est créée avant celles du mur de protection. Cette surface est d'abord construite sur la base d'un plan moyen de grandes dimensions déduit de la position des points caractéristiques du contour inférieur de la pièce utile. Ce plan peut ensuite être modifié afin d'introduire d'éventuelles courbures et de créer un contour polygonal facilitant la découpe du flan initial. Pour modifier la planéité, nous transformons le plan initialement créé en une surface NURBS [9] de degré deux comportant neuf points de contrôle (Fig. 2). Pour bomber le plan, nous déplaçons le point de contrôle central suivant la direction de la normale du plan initial. Cette approche permet d'adapter les courbures de la surface sous serre-flan jusqu'à atteindre la forme souhaitée.

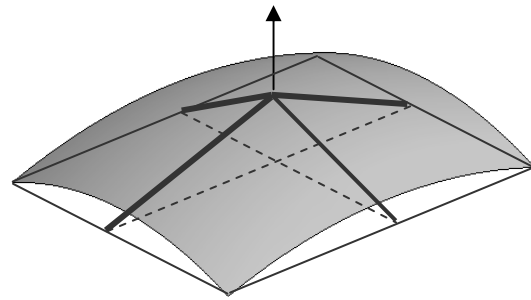
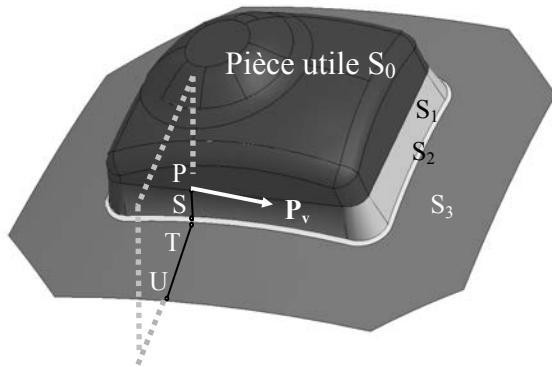


Figure 1- Pièce utile et surfaces additionnelles

Figure 2- Surface sous serre-flan bombée

## 2.2 Conception des surfaces du mur

La conception des SA du mur s'appuie sur la création de courbes de profil (PQRSTU) élaborées sur un certain nombre de points du contour inférieur de la pièce utile (Fig. 3). Chacune des courbes de profil est définie dans un plan de travail perpendiculaire au contour de la pièce utile. L'obtention des plans nécessite la connaissance des équations des courbes et des surfaces associées ainsi que leurs dérivées et normales. Le calcul des différentes parties géométriques de la courbe de profil se fait pour chacun des points du contour inférieur (Fig. 3). Les longueurs des segments PQ, RS et TU, les rayons  $R_b$  et  $R_h$  ainsi que l'angle d'inclinaison  $\alpha$  sont connus à chaque itération d'optimisation. Il reste alors à déterminer la position des points de raccords Q, R, S et T qui permettent d'assurer une continuité  $G_1$ . La position des points Q et R est calculée à partir de l'angle du mur  $\alpha$ .

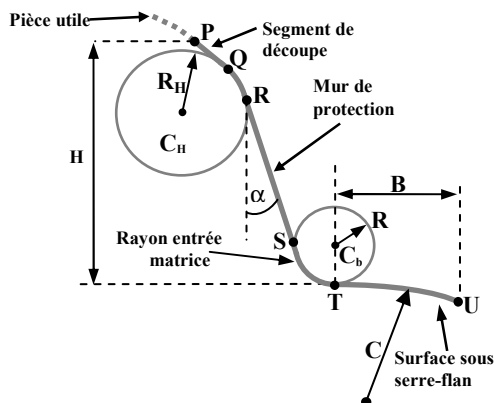


Figure 3 – Création d'une courbe de profil

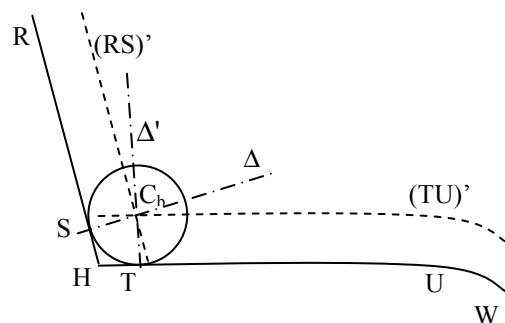


Figure 4- Création du congé d'entrée matrice

Le calcul des positions des points de tangence S et T, et du centre  $C_b$  du congé de raccordement bas sont plus complexes car la surface sous serre-flan n'est pas

nécessairement plane. Nous élaborons deux courbes en faisant un offset dont la valeur est celle du rayon  $R_b$ , l'intersection des deux courbes d'offset donne la position du centre  $C_b$ . Ensuite, les deux points S et T sont déduits de l'intersection des segments RH et HW avec leurs normales ( $\Delta$  et  $\Delta'$ ) passant par le centre  $C_b$  (Fig. 4). Finalement, les surfaces additionnelles du mur de protection sont créées à partir de nombreux petits carreaux construits en s'appuyant sur une grille de points créés sur les courbes de profil. En profitant des propriétés des COONS [2], la continuité  $G_1$  entre les surfaces sur les côtés adjacents est assurée (Fig. 5).

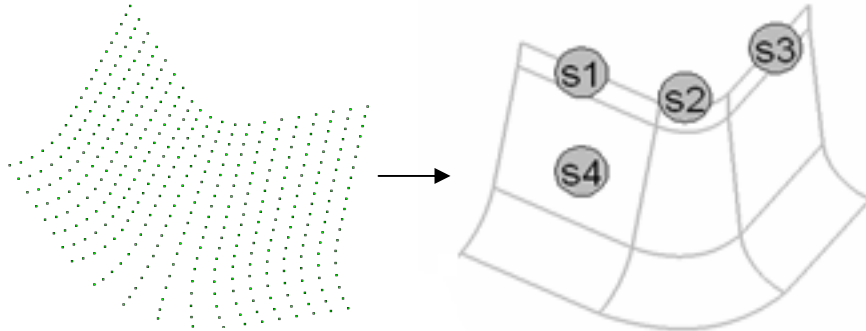


Figure 5 - Grille de points et surfaces de COONS

### 2.3 Modification du contour des surfaces additionnelles

Afin d'économiser de la matière et/ou de faciliter la découpe du flan initial, il peut être opportun de rendre le contour du flan initial polygonal. En s'appuyant sur la forme générale de l'embouti, le nombre de côtés ainsi que l'angle d'inclinaison de leurs normales sont définis initialement par l'utilisateur (Fig. 6). Le programme gère ensuite automatiquement la création des côtés du polygone extérieur en exploitant les informations de l'ancien contour (les points de vertex et les côtés) afin de projeter les nouveaux points de vertex et les nouveaux côtés du contour polygonal à la surface 2D, en fonction du calcul des coordonnées paramétriques  $u$  et  $v$ . Le nouveau contour polygonal est ainsi projeté correctement sur une surface 3D en respectant les mêmes informations paramétriques. Finalement, les informations topologiques et géométriques de l'ancien contour sont remplacées par celles du nouveau contour.

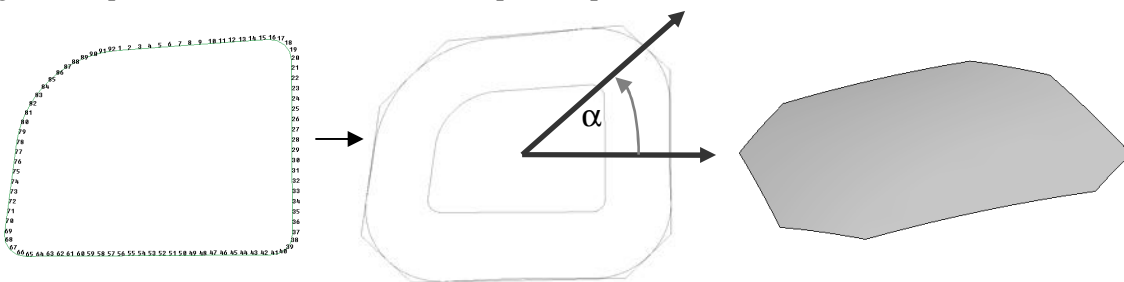


Figure 6 –Modification du contour de la surface sous serre-flan.

### 2.4 Géométrie, topologie et maillage des surfaces additionnelles

Pour la création du maillage des différentes surfaces, nous avons retenu une structure hiérarchisée de type B-Rep (*Boundary Representation*). Les nouvelles surfaces additionnelles, dont les références sont uniques, sont ainsi stockées dans leur ordre de création dans la structure B-Rep [5]. Lorsque certains points, courbes ou surfaces sont communs à d'autres déjà existants dans B-Rep, les numérotations des nouveaux éléments sont adaptées afin d'intégrer l'existant tout en suivant l'ordre dans le système B-Rep. La méthode implémentée dans le logiciel BLSURF [6] permet de générer un maillage qui respecte certaines contraintes (tailles souhaitées des éléments au voisinage des points de la surface) et qui approche fidèlement la géométrie des surfaces additionnelles (fig. 7).

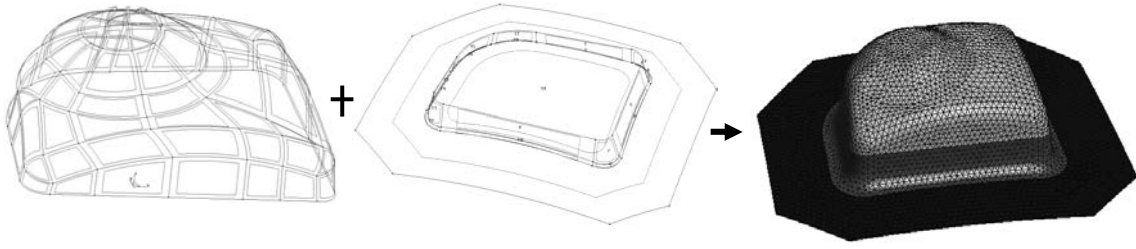


Figure 7 - Assemblage et maillage des surfaces additionnelles

### 3 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 [8]. Toutefois, minimiser la variation d'épaisseur peut conduire à une trop forte uniformisation d'épaisseur non nécessaire. En pratique, il suffit d'imposer juste des limitations sur l'amincissement et l'épaississement de l'épaisseur (Eq. 1). Pour les pièces de peau, la fonction objectif choisie est une fonction d'aspect pour éviter les rayures dues au passage des surfaces apparentes de la pièce sur le rayon d'entrée matrice (Eq. 1). Ainsi les positions initiales des nœuds au dessus du contour inférieur (Fig. 1) doivent rester à l'intérieur du contour d'arrondi (défini par le point T, Fig. 3) :

$$-\Delta_{\min} \leq (h^e - h^0) / h^0 \leq \Delta_{\max} \quad \text{et} \quad J^{\text{asp}} = \max(\|\bar{u}_i\| - d_i) \quad (1)$$

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 inférieur et  $d_i$  la distance horizontale entre les points P et T (Fig. 3). L'optimisation des surfaces additionnelles consiste à optimiser les cinq variables géométriques qui définissent les courbes de profil (Fig. 3) : la hauteur H, l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du mur de protection, le rayon d'entrée matrice  $R_b$ , la largeur de la surface sous serre flan B et éventuellement la courbure de la surface sous serre-flan C.

Un algorithme d'optimisation est combiné avec l'Approche Inverse très rapide [1]. Elle exploite au maximum la connaissance de la forme de la pièce finale désirée pour trouver itérativement les positions des nœuds dans le flan plan initial satisfaisant l'équilibre dans la pièce finale.

Deux approches d'optimisation sont utilisées. L'algorithme FSQP s'appuie sur la méthode SQP classique [7] qui nécessite le calcul des gradients. Les gradients sont calculés par perturbations et peuvent engendrer des problèmes numériques et une divergence. Pour palier cet inconvénient, nous avons développé la Méthode des Surfaces de Réponse (MSR). 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 la fonction objectif et des contraintes est réalisée à l'aide de méta-modèles de type MLS (Moving Least Squares) [4] ou Kriging [10] qui permettent 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 :

$$\tilde{J}(x) = \langle p(x) \rangle \{a(x)\} \quad (2)$$

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  $x$ . Pour le méta-modèle MLS, 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 [11]:

$$\{a(x)\} = [A]^{-1} [B] \{f_i\} \quad \text{avec} \quad [B] = [P][W] \quad ; \quad [A] = [B][P]^T \quad (3)$$

$$[P] = [\dots p(x_i) \dots] \quad ; \quad W_{ii} = w_i(x_i, x) \quad ; \quad W_{ij} = 0 \quad \text{dans} \quad [W] \quad (4)$$

$$w_i(x, x_i) = \left[1 - r/r_i\right]^4 \times [4.r/r_i + 1] \quad \text{si} \quad r = |x - x_i| \leq r_i \quad ; \quad \text{sinon} \quad w_i(x, x_i) = 0 \quad (5)$$

où  $r_i$  est une valeur limite déduite du pas caractérisant la grille définissant la positions des points où les fonctions objectif réelles sont calculées. Pour le méta-modèle Kriging, la réponse déterministe du simulateur est considérée comme la réalisation d'une fonction aléatoire :

$$Y(\mathbf{x}) = X(\mathbf{x})\beta + \Gamma(\mathbf{x}) \quad (6)$$

où  $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_d)$  représente les variables d'entrée,  $X(\mathbf{x})$  est le vecteur des fonctions de base de la régression,  $\beta$  est le vecteur des coefficients inconnus du modèle et  $\Gamma$  est un processus gaussien d'espérance nulle et de fonction de covariance donnée par :

$$\text{cov}(\Gamma(\mathbf{x}), \Gamma(\mathbf{w})) = \sigma^2 \cdot R(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \sigma^2 \cdot \begin{pmatrix} R(x_1, w_1) \dots R(x_1, w_N) \\ \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ R(x_N, w_1) \dots R(x_N, w_N) \end{pmatrix} \quad (7)$$

où  $\sigma^2$  est la variance et  $R(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ , la fonction de corrélation :

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \exp\left(-\theta \sum_{i=1}^d (x_i - w_i)^2\right) \quad (8)$$

avec  $\theta$  un paramètre de corrélation du modèle [10]. Les réponses connues du simulateur aux points du plan,  $Y^T=[y(x_1), \dots, y(x_n)]$ , sont utilisées pour estimer les paramètres inconnus du modèle  $\beta$ ,  $\sigma^2$  et  $\theta$ .

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. Les méta-modèles sont utilisés pour approcher la fonction objectif d'aspect mais aussi les limitations imposées. 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.

## 4 Résultats numériques

Nous avons traité une pièce de forme triangulaire de grandes dimensions avec un contour géométrique de forme complexe. Les contraintes d'amincissement et d'épaississement ont été fixées respectivement à -25% et 15%. Le maillage initial comporte 4239 nœuds et 8264 éléments (Fig. 9).

Nous notons que les trois méthodes ont donné des fonctions d'aspect finales proches et que les variations de l'épaisseur satisfont les contraintes d'inégalité imposées. FSQP a nécessité un nombre d'appels de l'AI 39% supérieur aux nombres d'appels des deux MSR, nécessitant un temps de calcul supérieur de 31% par rapport à l'approche MSR. Ceci s'explique par le fait que FSQP nécessite le calcul des gradients de la fonction objectif et des contraintes d'inégalité. Les meilleurs résultats pour la fonction d'aspect sont ceux obtenus avec l'algorithme MSR-MLS. On remarque également que la fonction d'aspect atteinte est assez loin de la valeur idéale de zéro, ce qui ne permet pas d'éviter le passage de la tôle sur le rayon d'entrée matrice et donc l'apparition d'éventuelles rayures. La distribution de l'épaisseur et l'évolution de la fonction d'aspect sont illustrées à la figure 9. Nous constatons que le méta-modèle Kriging conduit dès la première itération à une fonction d'aspect proche de la solution optimale, alors que MLS converge de façon moins directe vers la meilleure solution (inférieure de 5% par rapport à FSQP). Cette pièce a surtout posé des problèmes d'ordre géométrique (construction des surfaces additionnelles) car elle comporte à deux endroits différents des changements de courbures sévères sur le contour inférieur de la pièce utile. Cela a nécessité quelques approfondissements et corrections de notre méthodologie avant d'aboutir à des surfaces de géométries correctes.

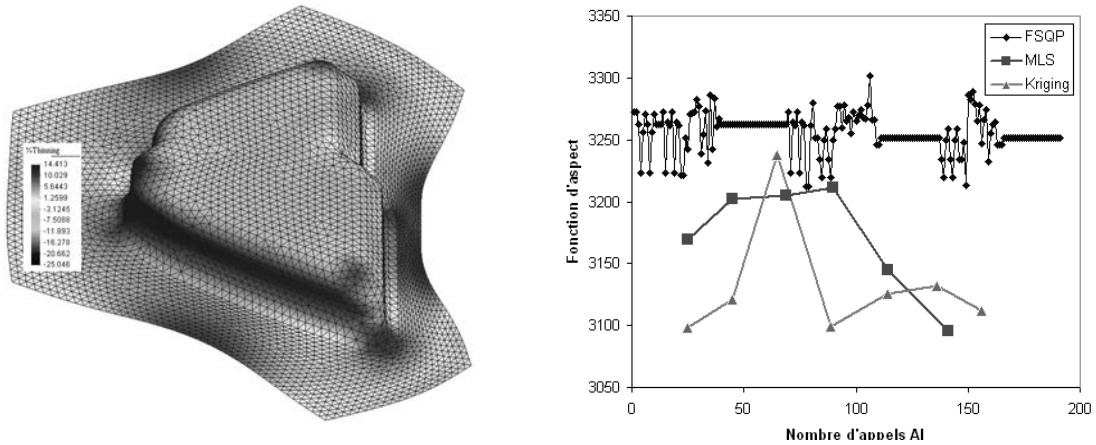


Figure 9 : Distribution des variations d'épaisseur et évolution de  $F_{ASF}$

## 5 Conclusion

L'objectif de l'étude est de développer une méthodologie de conception et d'optimisation automatique des SA pour le procédé d'emboutissage de tôles minces. Notre démarche s'appuie sur (i) un outil numérique de conception automatique des SA associé à un mailleur automatique, (ii) la simulation numérique de l'emboutissage par l'AI, (iii) et l'optimisation paramétrique des variables géométriques à l'aide des algorithmes FSQP et MSR. La méthodologie montre que l'optimisation combinée avec une conception automatique et l'AI rapide est pertinente. L'évolution croissante de la puissance des ordinateurs et des logiciels d'éléments finis (calculs parallèles) nous permet d'envisager l'utilisation d'un solveur incrémental pour optimiser des problèmes d'emboutissage plus complexes.

## Références

- [1] J.L. Batoz, Y.Q. Guo, F. Mercier. The inverse approach with simple triangular shell elements for large strain predictions of sheet metal forming parts. *Engineering Computations*, page864-892, 1998.
- [2] S.A Coons, Surfaces for computer aided design of space form. *Technical rept*, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, page105-110, 1967.
- [3] M. Dong, K. Debray, Y.Q. Guo, J.L. Shan. Design and optimization of addendum surfaces in sheet metal forming process. *Int. J. for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, Vol. 8, page211-222, 2007.
- [4] T. Jansson, A. Anderson, L. Nilsson. Optimization of draw-in for an automotive sheet metal part: An evaluation using surrogate models and response surfaces. *J. Materials Processing Technology*, Vol. 159, page426-434, 2005.
- [5] P. Laug. Topologie et maillage des surfaces paramétrées à partir d'une modélisation B-Rep. *17ème Congès Français de Mécanique*, 2005.
- [6] P. Laug, H. Borouchaki. BLSURF – Mailleur de surfaces composées de carreaux paramétrés Manuel d'utilisation, 1999
- [7] C.T. Lawrence, A.L. Tits. Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming. *Optimization Methods and Software*, page265-282, 1996.
- [8] H. Naceur, Y.Q. Guo, J.L. Batoz, C. Knopf. Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process. *I.J. Mech. Sci.* Vol. 43, page2407-2434, 2001.
- [9] L. Piegl, T. Wayne. *The NURBS Book*. Springer, 1997.
- [10] J. Sacks, W.J. Welch, T.J. Mitchell, H.P. Wynn. Design and analysis of computer experiments. *Statist.Sci*, page409–435, 1989.
- [11] H. Wendland. Local polynomial reproduction and moving least squares approximation. *Journal of Numerical Analysis*, Vol. 21, page285-300, 2001