



**HAL**  
open science

## Optimisation géométrique des outillages de découpe

Souleymane Ramde, Luc Penazzi, François Ronde-Oustau

► **To cite this version:**

Souleymane Ramde, Luc Penazzi, François Ronde-Oustau. Optimisation géométrique des outillages de découpe. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. 6 p. hal-03391299

**HAL Id: hal-03391299**

**<https://hal.science/hal-03391299>**

Submitted on 21 Oct 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.

# Optimisation géométrique des outillages de découpe

S. RAMDE, L. PENAZZI, F. RONDE-OUSTAU

Université de Toulouse; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE; ICA (Institut Clément Ader), CROMeP; Campus Jarlard, F-81013 Albi cedex 09, France

## Résumé :

*Ce document présente une optimisation multi objectif en découpage. Dans le souci d'alléger les structures, des matériaux dits à haute limite d'élasticité sont utilisés en carrosserie automobile. La mise en forme de ces matériaux induit d'importantes sollicitations en termes d'effort de découpe et de pression de contact aux interfaces tôle/outils. Il est connu que les géométries d'outillages influencent aussi bien les sollicitations que la qualité du produit final. L'objectif de l'étude est de proposer une méthode d'optimisation multi objectif permettant de définir les paramètres géométriques de l'outillage (rayon de poinçon, jeu poinçon-matrice) qui minimisent les efforts dans l'outillage, la pression de contact et la hauteur de bavure.*

## Abstract :

*This paper deals with multi objective shape optimization in blanking process. In order to reduce vehicle weight, "high yield limit" materials are used in automotive manufacturing. The forming of these materials induces important loads, like blanking force and contact pressure on the tool/work-piece interfaces. It is known that the geometrical parameters (relative clearance and punch radius) influence the loads (force and contact pressure) and the product quality. The aim of this work is to propose a methodology of multi objective shape optimisation, which gives the geometrical parameters leading to the least force, contact pressure and the lowest burr height.*

**Mots clefs :** découpage, optimisation multi objectif, simulation numérique

## 1 Introduction

Le découpage consiste à enlever de la matière par un cisaillement normal (éventuellement non perpendiculaire) au plan de la tôle [1]. Les sollicitations dues à cette opération sont à la fois très importantes en terme de pression de contact aux interfaces tôle/outils et complexes [2]. Ces chargements peuvent réduire considérablement la durée de vie des outillages. Contrairement aux autres procédés de mise en forme, le découpage conduit à des déformations permanentes très localisées et à la séparation totale de la pièce initiale en deux parties. Selon Chabenat [2], on peut distinguer deux classes de découpe : la découpe sur un contour fermé (poinçonnage) et la découpe sur un contour ouvert. Ici, nous nous intéresserons au cas du poinçonnage. Une vue en coupe de la partie active de l'outillage de poinçonnage et de la tôle est présentée sur la figure 1. La tôle (1) est maintenue sur la matrice (2) grâce au serre flan (3). Le poinçon (4) animé d'un mouvement de translation vient en contact avec la tôle, la déforme plastiquement jusqu'à la rupture conduisant à la formation de la débouchure finale.

L'objectif de l'étude est de définir les paramètres géométriques de l'outillage (rayon de poinçon, jeu poinçon-matrice) permettant de satisfaire trois objectifs : la réduction de la pression de contact (usure de l'outil), la réduction des efforts dans l'outillage et la presse (fatigue des structures) ainsi que de garantir une bonne qualité de découpe (hauteur de bavure minimale). Pour atteindre ces objectifs, nous choisissons une approche de simulation numérique couplée à une méthode d'optimisation multi objectif.

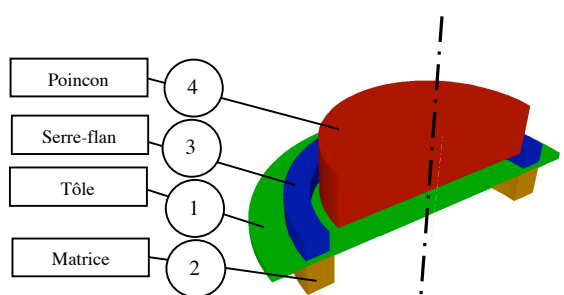


FIG. 1 : Vue en coupe de la partie active de l'outillage de poinçonnage et de la tôle

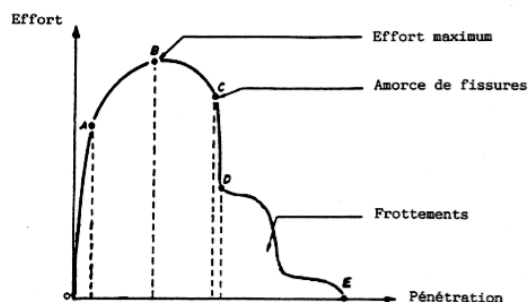


FIG. 2 : Evolution de l'effort axial du poinçon en fonction de la pénétration [1]

## 2 Bibliographie

L'étude des efforts développés dans les opérations de découpage a fait l'objet de nombreux travaux [1, 3–9, 16]. Lors de l'opération de découpage, Maillard [1] a observé une évolution de l'effort axial sur le poinçon en fonction de la pénétration en 5 phases (figure 2). Au cours des 3 premières phases, plusieurs auteurs [4, 7] ont montré l'importance de la prise en compte d'un comportement élasto-plastique endommageable de la tôle pour la modélisation de l'opération et la prévision des états de contraintes et de déformations dans la tôle. Les travaux de Hambli [3] et Hatanaka [6] ont également montré l'influence des rayons de poinçon et matrice ainsi que du jeu poinçon-matrice. Des études [1, 4, 6-9] montrent l'influence des paramètres géométriques d'outillage et du comportement du matériau de la tôle sur la géométrie du bord (figure 3). Par ailleurs, d'autres études concernant l'usure des outillages [4] établissent la relation entre pression de contact à l'interface outil/tôle et usure de l'outil (figure 4). Il a été également observé l'influence de l'usure du rayon sur la géométrie du bord découpé [3, 7, 10].

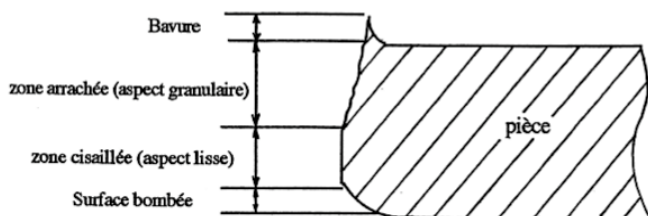


FIG. 3 : Longueurs caractéristiques du bord découpé [3]

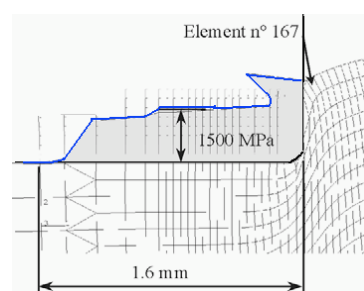


FIG. 4 : Distribution de la pression de contact [4]

Les travaux portant sur la simulation numérique de l'opération de découpage par la méthode des éléments finis [1, 3, 4, 6, 7] sont nombreux. Il est établi que la complexité des modèles vient de la localisation et du très grand niveau des déformations.

Des études d'optimisation de paramètres procédés sur la qualité de la pièce à partir de méthodes déterministes sont couramment utilisées en mise en forme [11, 12, 13]. Mathey [14] s'est intéressée à l'optimisation de canaux de refroidissement d'un moule d'injection de thermoplastique par la résolution d'un problème d'optimisation multi objectif non-linéaire sous contraintes avec une méthode SQP. Elle a ramené le problème multi objectif en mono objectif en associant un poids aux deux objectifs (le temps de refroidissement et l'uniformité de la température de la pièce) à optimiser.

## 3 Modélisation et simulation numérique du poinçonnage

### 3.1 Modèle de calcul éléments finis

Cette section présente l'étape de mise en œuvre de la simulation numérique de l'opération de découpage. La simulation numérique est effectuée avec le code de calcul ABAQUS/Explicit<sup>TM</sup>. Le poinçon a un diamètre de  $D$ . Un jeu relatif  $j$  est positionné entre le poinçon et la matrice comme illustré sur la figure 5. Le matériau de

la tôle est modélisé par un comportement élasto-plastique endommageable à écrouissage isotrope. L'écrouissage est décrit par une loi de Swift :

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (1)$$

Pour l'endommagement, nous empruntons la même démarche que Hambli [3]. L'endommagement s'amorce pour un niveau critique la déformation plastique  $\varepsilon_D$  et de taux de triaxialité des contraintes  $\eta$ . Son évolution en fonction de la déformation plastique est caractérisée expérimentalement par la variation du module d'élasticité lors d'essais de traction (charge-décharge). La rupture est prise en compte dans la simulation numérique quand l'élément est complètement endommagé.

### 3.2 Application au cas d'une tôle DC04

Nous présentons ici le cas d'un poinçonnage ( $D = 100$  mm) d'une tôle en acier DC04 (Tableau 1) d'épaisseur 0,67 mm, avec des valeurs de 0,03 mm et 0,1 mm respectivement pour le jeu et le rayon d'extrémité des outillages.

Tableau 1 : Propriétés du matériau de la tôle

$K$ (MPa)	$\varepsilon_0$	$n$	$\varepsilon_D$	$\eta$
470	0,004	0,22	0,15	- 0,33

La tôle est discrétisée avec des éléments axisymétriques à interpolation linéaire (CAX4R) qui ont une taille de l'ordre de 0,03 mm dans la zone de découpe. Un maillage adaptatif est utilisé pour contrôler les distorsions des éléments. Les outils sont supposés parfaitement rigides avec un rayon d'extrémité de 0,1 mm. La matrice et le serre flan sont encastés et un déplacement est imposé au poinçon. Le frottement aux interfaces outils/tôle est décrit par un modèle de Coulomb avec ici une valeur de 0,2, ce qui correspond à des conditions de découpe sans lubrifiant [6].

La figure 6 présente un exemple de contours de déformations plastiques équivalentes au cours de l'opération découpage. Les valeurs maximales (0,52) sont localisées aux interfaces outils/tôle près des rayons poinçon et matrice. Ces interfaces sont aussi le lieu d'amorçage de la fissure. D'où l'intérêt de raffiner le maillage dans cette zone.

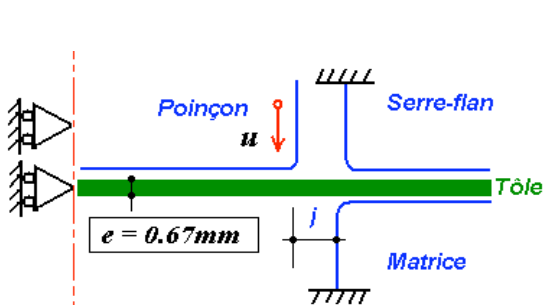


FIG. 5 : Modélisation du poinçonnage

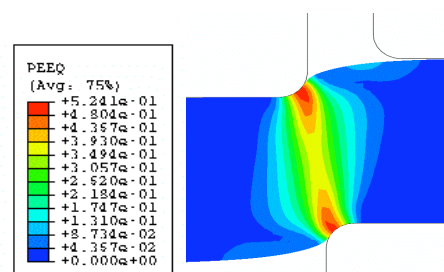


FIG. 6 : Contour de déformations plastiques équivalentes (23% de pénétration)

### 3.3 Extraction de l'effort, de la pression de contact et de la hauteur de bavure

En fin de simulation numérique, les différentes grandeurs (effort, pression, déplacement, endommagement) sont extraites à l'aide de programme python<sup>TM</sup>, exploitées avec un programme Matlab<sup>®</sup>. L'effort maximal ( $F_{\max} \approx 48$  kN) de découpe est relevé sur le poinçon. La pression de contact est relevée sur la surface de la tôle en contact avec la surface du poinçon. Les valeurs importantes de pression sont localisées autour du rayon poinçon. Parmi ces valeurs, celle qui est la plus importante ( $p_{\max} \approx 1000$  MPa) est retenue pour l'optimisation. La hauteur de bavure est estimée par exploitation de l'endommagement de la zone de découpe et les déplacements des nœuds du profil du bord découpé. Après une suppression des éléments rompus, le profil du bord découpé est reconstitué pour estimer la hauteur de bavure. Cette estimation de la hauteur de bavure semble sensible au maillage et à la loi d'évolution de l'endommagement. Elle fera l'objet de validation avec les essais de poinçonnage.

## 4 Optimisation

### 4.1 Principe

Le problème consiste à déterminer les paramètres géométriques (jeu relatif et rayon d'extrémité du poinçon) de l'outillage qui permettent de satisfaire trois objectifs : la réduction de la pression de contact, la réduction des efforts dans l'outillage et la presse, la réduction de la hauteur de bavure. Le code de calcul par éléments finis ABAQUS/Explicit™ sera utilisé pour la simulation numérique de l'opération de découpage et le programme Matlab® pour l'optimisation. Des valeurs initiales de paramètres permettent de commencer la simulation numérique. En fin de simulation, les données sont extraites des résultats de simulation pour évaluer les différents objectifs avec Matlab®. Ensuite, le test de convergence de l'algorithme est effectué. Si le critère de convergence est satisfait, les paramètres sont identifiés ; sinon de nouveaux paramètres sont réintroduits dans la simulation numérique pour un nouveau calcul. Cette boucle se répète jusqu'à la satisfaction du critère de convergence.

### 4.2 Formulation

Il s'agit d'un problème d'optimisation multi objectif avec contraintes qui sont les limitations des variables de conception. Les objectifs à optimiser sont l'effort global  $\phi_f$ , la pression de contact  $\phi_p$  et la hauteur de bavure  $\phi_h$ . Grâce à l'introduction de coefficients de pondération ( $\beta_f, \beta_p$  et  $\beta_h$ ) la fonction objectif peut s'exprimer sous la forme :

$$\phi_t = \beta_f \phi_f + \beta_p \phi_p + \beta_h \phi_h \text{ où } \beta_f + \beta_p + \beta_h = 1 \quad (2)$$

La relation entre les différents coefficients est établie en fonction de la priorité accordée aux différents objectifs. Ici nous accordons deux fois plus d'importance à l'objectif sur la pression de contact que sur la hauteur de bavure. On obtient donc les relations :

$$\beta_p = 2\beta_h, \quad \beta_f = 1 - 3\beta_h \quad (3)$$

Dans les problèmes d'optimisation, il est souhaitable d'homogénéiser les quantités utilisées par l'algorithme d'optimisation (fonction objectif, variables de conception et limitations). La normalisation améliore la convergence de l'algorithme et la qualité de la solution optimale [15]. Ainsi, les différents objectifs se normalisent sous la forme :

$$\phi_f^j = \frac{f^j}{f_0}, \quad \phi_p^j = \frac{p^j}{p_0} \text{ et } \phi_h^j = \frac{h^j}{h_0} \quad (4)$$

avec  $f_0, p_0$  et  $h_0$  les valeurs moyennes respectives de l'effort global, de la pression de contact et de la hauteur de bavure. Elles sont déterminées à partir de résultats de simulations numériques dont les paramètres géométriques de l'outillage sont les valeurs extrêmes des variables de conception et  $f^j, p^j$  et  $h^j$  les valeurs respectives de l'effort global, de la pression de contact et de la hauteur de bavure à l'évaluation  $j$ .

Les travaux de Hatanaka [6] et de Fan [17] ont servi de référence au choix des valeurs extrêmes des variables d'optimisation. Le jeu varie entre 1 et 25% de l'épaisseur de la tôle et le rayon entre 0,01 et 0,1mm. La relation entre variables normalisées et réelles s'exprime :

$$X_{r_i}^j = A_i \cdot X_{t_i}^j + B_i \text{ où } A_i = \frac{X_{r_i}^{\max} - X_{r_i}^{\min}}{2}, \quad B_i = \frac{X_{r_i}^{\max} + X_{r_i}^{\min}}{2} \text{ et } -1 \leq X_{t_i}^j \leq 1 \quad (5)$$

$X_{r_i}^j$  et  $X_{t_i}^j$  sont respectivement les variables réelles et transformées à l'évaluation  $j$  et  $i = 1, 2, \dots, n$  le nombre de variables de conception.

Soient  $X_{t_1}^j$  et  $X_{t_2}^j$  les variables transformées respectivement du jeu relatif et du rayon d'extrémité du poinçon. Les contraintes d'inégalité associées aux deux variables peuvent s'exprimer à l'aide de deux fonctions :

$$g_1(X_{t_1}^j, X_{t_2}^j) = -(X_{t_1}^j + X_{t_2}^j) - 2 \text{ et } g_2(X_{t_1}^j, X_{t_2}^j) = X_{t_1}^j + X_{t_2}^j - 2. \quad (6)$$

En résumé, le problème consiste à minimiser  $\phi_i(X_{t_i}^j)$  sous les contraintes  $g_k(X_{t_i}^j) \leq 0$  et  $-1 \leq X_{t_i}^j \leq 1$  où  $k = 1, 2, \dots, m$  est le nombre de contraintes d'inégalités. Le choix de l'algorithme d'optimisation est aussi primordial. En raison de la nonlinéarité et des contraintes associées au problème, l'algorithme SQP (Sequential Quadratic Programming) est utilisé pour l'optimisation [14].

### 4.3 Résultats

Pour un coefficient de pondération de 0.3 sur la hauteur de bavure ( $\beta_h = 0.3$ ,  $\beta_p = 0.6$  et  $\beta_f = 0.1$ ), les figures 7 présentent l'évolution des variables de conception au cours de l'optimisation. En initialisant l'optimisation avec un jeu de 0,07 mm et un rayon de 0,05 mm, les paramètres optimum sont obtenus au bout de douze itérations (90 évaluations de la fonction objectif (2)). La valeur de jeu choisie comme point de départ de l'optimisation correspond à une valeur optimale qui minimise l'effort de découpe [3]. Les valeurs varient entre 0,07 mm et 0,14 mm pour le jeu (figure 7 gauche) et 0,03 mm et 0,05 mm pour le rayon (figure 7 droite) poinçon.

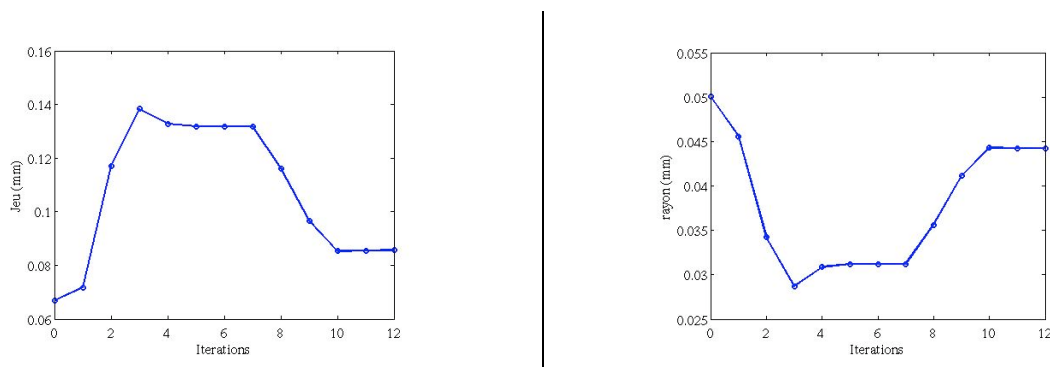


FIG. 7 : Evolution du jeu (a) et du rayon (b) au cours des itérations

Les figures 8 présentent l'évolution des différents objectifs en fonction du nombre d'itérations. Avec un choix de coefficients qui privilégie la pression de contact et la hauteur de bavure, on note aisément sur la figure 8 de gauche que l'objectif sur l'effort ne diminue (2%) pas nécessairement au cours des itérations. Quant à la pression de contact, elle augmente (12,5%) en début d'optimisation puis diminue de 15%; soit une diminution globale de 2,5%. La hauteur de bavure diminue de plus de 90%. L'objectif global (figure 8 droite) diminue de près de 25%. Le choix de paramètres déjà optimum vis-à-vis de l'effort de découpe comme point de départ de l'optimisation, peut justifier les faibles diminutions des objectifs sur l'effort et la pression de contact. On peut aussi observer que l'optimisation est principalement pilotée par l'objectif sur la hauteur de bavure. Une caractérisation expérimentale de la hauteur de bavure permettra d'améliorer les résultats d'optimisation.

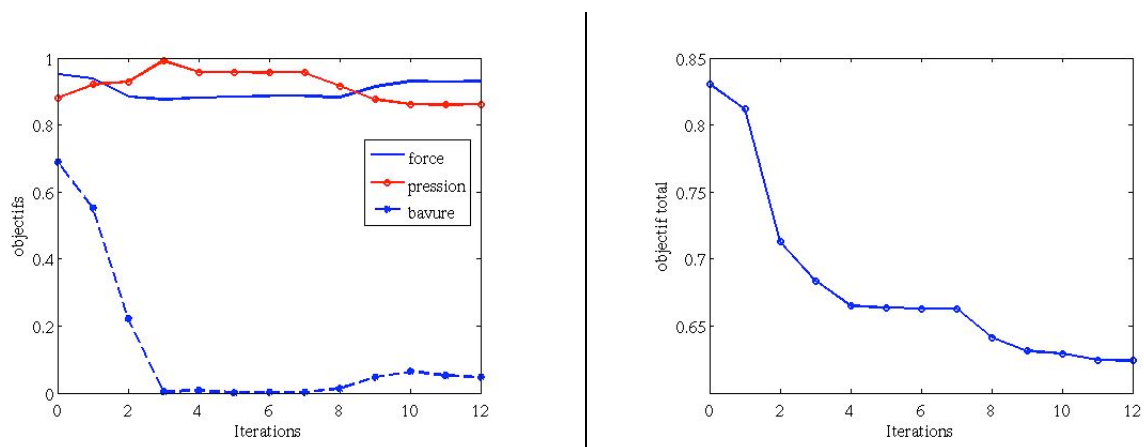


FIG. 8 : Evolution des objectifs en fonction des itérations : l'effort, la pression de contact, la hauteur de bavure (gauche) et l'objectif global (droite)

## 5 Conclusion

Une optimisation multi objectif de paramètres géométriques des outillages de découpe a été présentée pour une tôle DC04. Le problème multi objectif est reconverti en mono objectif par le biais de coefficients de pondération dont le choix revient à l'utilisateur. La méthode d'optimisation qui a été présentée permet de retrouver les valeurs de jeu et rayon permettant de minimiser l'effort de poinçon comme cela a été montré dans la bibliographie. De plus, cette approche numérique montre que les paramètres sont également optimisés pour réduire la pression de contact et la hauteur de bavure. La validation de l'estimation de la hauteur de bavure et l'extension de ces travaux aux tôles à haute limite d'élasticité sont envisagées.

## Remerciements

Nous remercions la DGE (Direction Générale de l'Entreprise) et le Pôle Automobile Haut de gamme pour le financement de ces travaux dans le cadre du projet EMOA (Excellence dans la Maîtrise des Ouvrants Automobiles).

## References

- [1] Maillard A., Etude expérimentale et théorique des opérations de découpage, Thèse de l'UTC, Spécialité Mécanique Appliquée et Matériaux, Compiègne, 1991
- [2] Chabenat A., Martin R., Travail des métaux en feuilles, Découpage - Poinçonnage, Techniques de l'ingénieur B 7561, Paris, 1978
- [3] Hambli R., Potiron A., Finite element modelling of sheet-metal blanking operations with experimental verification, *Journal of Material Processing Technology* 102, 257-265, 2001
- [4] Hambli R., Blanking tool wear modeling using the finite element method, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41, 1815-1829, 2001
- [5] Hilditch T. B., Kelly G. L., and Hodgson P. D., Effect of punch and die geometry on trimming quality of aluminium and steel autobody sheet, *Proceedings of the TMS* 2001
- [6] Hatanaka N., Yamaguchi K., Takakura N., Iizuka T., Simulation of sheared edge formation process in blanking of sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 628-634, 2003
- [7] Husson C., Ahzi S., Daridon L., Poizat C., Numerical study of the effect of processing parameter in the high-speed blanking in the connectic field, *International Deep Drawing Research Group* 2005
- [8] Azaouzi M., Delamazière A., Naceur H., Sibaud D., Batoz J.L., Belouettar S., A numerically based approach for the blank design of thin precision metallic parts obtain by stamping, *ESAFORM* 2006
- [9] Klocke F., Sweeney K., Raedt H. W., Improved tool design for fine blanking through the application of numerical modeling techniques, *Journal of Material Processing Technology* 115, 70-75, 2001
- [10] Hernandez J., Franco P., Estrems M., Faura F., Modelling and experimental analysis of the effects of tool wear on form errors in stainless steel blanking, *Journal of Material Processing Technology* 180, 143-150, 2006
- [11] Bonte M. H. A., van den Boogaard A. H., Huétink J., Deterministic and robust optimization strategies for metal forming processes, *Forming Technology Forum 2007- Application of Stochastics and Optimization Methods*, IVP, ETH Zurich, Switzerland, 2007
- [12] Ben Ayed L., Modélisation numérique de l'emboutissage et optimisation des outils serre-flan, Thèse de doctorat, UTC, 2005
- [13] Oudjene M., Batoz J. L., Penazzi L., Mercier F., A methodology for the 3D stress analysis and the design of layered sheet metal forming tools joined by screws, *Journal of Materials Processing Technology* 189, 334-343, 2007
- [14] Mathey E., Penazzi L., Schmidt F. M., Rondé-Oustau F., Automatic optimization of the cooling of injection mold based on the boundary element method, *NUMIFORM* 2004
- [15] Lebal N., Optimisation de la tête d'extrusion pour la fabrication de pièces thermoplastiques, Thèse de l'INPL, Spécialité Mécanique et Energetique, Nancy, 2007
- [16] Golovaschenko S.F., Quality of trimming and its effect on stretch flanging of automotive panels, *Journal of Materials Engineering and Performance* 17, 316-325, 2008
- [17] Fan W.F., Li J.H., An investigation on the damage of AISI-1045 and AISI-1025 steels in fine-blanking with negative clearance, *Materials Science and Engineering A* 499, 248-251, 2009