



**HAL**  
open science

## Modélisation du comportement d'outillages stratifiés basés sur la Stratoconception® pour le procédé d'emboutissage

Mourad Oudjene, Frédéric Mercier, Luc Penazzi, Jean-Louis Batoz

### ► To cite this version:

Mourad Oudjene, Frédéric Mercier, Luc Penazzi, Jean-Louis Batoz. Modélisation du comportement d'outillages stratifiés basés sur la Stratoconception® pour le procédé d'emboutissage. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. 6 p. hal-01798898

**HAL Id: hal-01798898**

**<https://hal.science/hal-01798898v1>**

Submitted on 29 Sep 2023

**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.

## Modélisation du comportement d'outillages stratifiés basés sur la Stratoconception<sup>®</sup> pour le procédé d'emboutissage

Mourad Oudjene <sup>a</sup>, Frédéric Mercier <sup>a</sup>, Luc Penazzi <sup>b</sup> & Jean-Louis Batoz <sup>a</sup>

<sup>a</sup> ERMeP, Institut Supérieur d'Ingénierie de la Conception (GIP-InSIC)  
27, rue d'Hellieule 88100 Saint-Dié-des-Vosges, France  
(mourad.oudjene, jean-louis.batoz, frederic.mercier)@insic.fr

<sup>b</sup> CROMeP, Ecole des Mines d'Albi  
81013 Albi, cedex 9, France  
luc.penazzi@enstimac.fr

### Résumé :

Plusieurs techniques de prototypage rapide réduisent voire remplacent la phase d'usinage conventionnelle qui représente environ 50% du coût global des outils d'emboutissage. Plus particulièrement, la réalisation des outils par le procédé de Stratoconception<sup>®</sup>, notamment dans le cadre du projet européen CRAFT-FASTOOL a permis de valider expérimentalement cette technologie et d'envisager une utilisation plus industrielle. Cependant, il apparaît nécessaire d'étudier le comportement mécanique des outils réalisés par Stratoconception<sup>®</sup> afin de prédire leur tenue mécanique en service et aussi d'optimiser leur conception et donc leur coût de fabrication. Dans ce papier, nous présentons une démarche numérique pour l'analyse du comportement élastique des outils d'emboutissage stratifiés assemblés par collage et vissage. Pour une première étape de l'étude, les résultats sont présentés dans le contexte du benchmark Numisheet'93 en utilisant les codes éléments finis STAMPACK et CATIA V5.

### Abstract :

A number of solutions based on rapid prototyping techniques will reduce or even replace the 3D machining operations which represent around 50% of the global cost of the stamping tools. A prototyping tool based on the Stratoconception approach has been recently produced and tested in a CRAFT european project. It has been used successfully to produce some parts, so that more industrial applications can be foreseen. However, it appears necessary to study in more depth the mechanical behaviour of the stratified tools resulting from the Stratoconception<sup>®</sup> approach in order to predict their strength and also to optimize their design and their cost. In this paper, we present a numerical procedure to analyze the elastic behaviour of stamping laminated tools joined using adhesive and screws. For the first stage of the study, the results are presented in the context of Numisheet'93 benchmark test (square cup) using STAMPACK and CATIA V5 finite element codes.

### Mots-clefs :

**emboutissage, outillage rapide, modélisation numérique, assemblage vissés**

## 1 Introduction

L'emboutissage est un procédé largement employé dans l'industrie de la mise en forme des matériaux métalliques en feuille [1]. Aujourd'hui, plus encore qu'hier, dans l'industrie de l'emboutissage, il y a un fort besoin de réduire les coûts et délais de fabrication des outils (poinçon, matrice, serre-flan) [2]. D'autre part, l'apparition et l'évolution importante des techniques de prototypage rapide au cours de ces dernières années constituent sans doute une alternative aux techniques conventionnelles pour réduire les coûts et délais de fabrication des outillages. Particulièrement, les techniques de fabrication des outils d'emboutissage par empilement successif de couches métalliques, ont permis la réalisation et la validation expérimentale de plusieurs

applications [1, 2, 3, 4]. Récemment, dans le cadre du projet européen CRAFT-FASTOOL un poinçon d'emboutissage basé sur le procédé de Stratoconception<sup>®</sup> a été fabriqué et testé de manière industrielle [1]. Cependant, une étude approfondie du comportement mécanique des outils déformables, stratifiés et assemblés par diverses techniques, s'impose afin de prédire leur tenue mécanique en service. Or, les sollicitations appliquées aux outils d'emboutissage ne sont que partiellement connues [5] et l'analyse mécanique des outils d'emboutissage reste pour le moment un domaine de recherche limité. Toutefois, des analyses du comportement mécanique et tribologique des outils d'emboutissage sont disponibles dans la littérature. Ainsi, beaucoup de travaux concernent le comportement à l'usure des rayons d'outils [6]. On peut citer aussi les analyses mécaniques des outils d'emboutissage [1, 7]. Plusieurs études numériques ou expérimentales relatives aux assemblages vissés sont identifiées dans la littérature [8, 9, 10].

## 2 Présentation du procédé de Stratoconception<sup>®</sup>

Parmi les procédés de fabrication rapide, la Stratoconception<sup>®</sup> est un procédé français breveté et développé par le Cirtes à Saint-Dié-des-Vosges depuis 1991 [12, 13]. Ce procédé consiste à trancher la pièce en couches élémentaires 2D ou 3D appelées strates (figure 1), dans lesquelles sont prévus des inserts. Les couches élémentaires sont ensuite découpées dans un matériau en plaque à partir des procédés d'usinage avancé en 2,5 axes ou 5 axes : micro fraisage rapide, laser, jet d'eau. Les strates sont ensuite positionnées les unes par rapport aux autres à l'aide d'inserts pour constituer le prototype final. L'assemblage est pris en compte dès la décomposition de l'objet. Afin d'assurer une liaison appropriée des différentes strates, tous les types d'assemblage classique sont envisageables : assemblage vissé, collé, brasé, soudé, etc. Le procédé est rapide, il est sans limitation de forme, ni de matériaux : bois, plastiques, métaux. Il est applicable aussi bien pour des maquettes, des prototypes technologiques, des outillages.



FIG. 1 – Principe du procédé de Stratoconception<sup>®</sup> (source CIRTES [13]).

## 3 Méthodologie proposée

Idéalement, l'analyse mécanique des outils d'emboutissage nécessite la prise en compte de leur déformabilité au cours de la simulation du procédé. Cependant, cette procédure de simulation est très coûteuse en temps de calcul, particulièrement quand la taille du modèle est élevée. De plus, elle implique plusieurs difficultés, notamment la discrétisation des outils en éléments déformables et la gestion du contact [7], particulièrement dans le cas des modèles 3D

avec une géométrie complexe. Ces difficultés font que, jusqu'à présent, la plupart des modèles existants considèrent essentiellement des modèles plans (déformations planes, axisymétrie...). Afin de surmonter toutes ces difficultés, il apparaît donc nécessaire de découpler la simulation de l'emboutissage, de l'analyse du comportement de l'outil. Le travail consiste alors à effectuer une simulation de l'emboutissage en considérant un contact rigide permettant d'accéder à la répartition des forces de contact pièce/outil. Ces forces de contact seront ensuite exploitées comme condition de chargement pour analyser séparément le comportement élastique de l'outil considéré. Cette méthodologie a été validée dans [1], [11].

### 3.1 Sollicitations sur les outils

Généralement, l'opération d'emboutissage s'effectue par avancée du poinçon qui entraîne la tôle, pour éventuellement lui imprimer son empreinte en fond de matrice. La partie centrale de la tôle se déforme par expansion sous le poinçon et le fond de matrice, la périphérie par rétreint sous le serre-flan. Au cours de l'opération d'emboutissage, la tôle exerce sur le poinçon des forces normales à sa surface ainsi que des forces tangentielles (cas de frottement non nul). Ces différentes sollicitations sont variables en position et en amplitude au cours de l'opération d'emboutissage. Des études numériques du contact tôle/outil [1, 6, 7, 11] montrent que les efforts de contact sont répartis principalement sur les rayons d'outils (parties actives de l'outil). Certaines de ces études [1, 7, 11] montrent que les outils d'emboutissage sont sollicités en compression avec un maximum global observé en fin de course du poinçon.

### 3.2 Approche de modélisation

Le problème des outils d'emboutissage stratifiés, posé en terme d'analyse mécanique consiste à étudier principalement sous sollicitations maximales ; le niveau de déformation des strates et le comportement mécanique du système d'assemblage (collage + vissage) afin de prédire sa tenue en service et d'optimiser sa conception. L'approche développée ici, consiste alors à estimer les forces de contact pièce/outil et les appliquer ensuite, de manière statique, sur l'outil stratifié discrétisé par éléments finis.

## 4 Exemple d'application

L'exemple décrit en figure 2a, est le poinçon carré du benchmark Numisheet'93. Il a pour dimensions : 70mm x 70mm x 56mm. Il est constitué de 8 strates de 7mm d'épaisseur, en acier, orientées perpendiculairement à la direction d'emboutissage. Conformément au principe de la Stratoconception<sup>®</sup>, les strates sont guidées et positionnées à l'aide de deux inserts de 6mm de diamètre. L'assemblage est assuré par quatre vis de 6.5mm de diamètre et une colle structurale d'une épaisseur de 0.1mm sur toute l'interface des strates. La disposition des vis choisie est cohérente avec les dispositions constructives (espacement entre vis, distance entre l'axe de vis et le bord extérieur des pièces) que préconisent les règles Allemandes VDI-2230 pour le calcul des assemblages par éléments filetés.

La figure 2b décrit le modèle éléments finis du quart de poinçon étudié. Il est construit par des éléments tétraédriques à 4 noeuds à interpolation linéaire en déplacements. La couche de colle n'a pas été modélisée. Ainsi, nous avons utilisé un contact collant à l'interfaces des strates.

Le modèle ainsi développé indique des contraintes normales négatives à l'interface des strates dans le cas d'une compression (zones de contact) et des contraintes normales positives

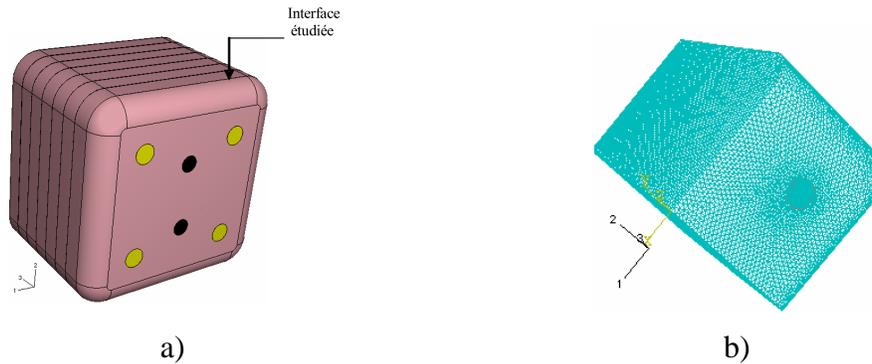


FIG. 2 – a) Poinçon assemblé par collage et vissage, b) Modèle élément fini.

dans le cas d'une traction (zones de décollement). Le chargement du modèle est ainsi composé:

- d'une force minimale de vissage (équation 3);
- des forces de contact imposées au poinçon rigide (figure 3).

La force de vissage est automatiquement générée par CATIA V5 en utilisant une connexion de serrage "virtuelle". En général, la valeur minimale [10] de la précontrainte de vissage à installer est déterminée par différentes conditions (non décollement des pièces, desserrage spontané...etc.) ou encore par les niveaux de préserrage expérimentés. Dans notre cas, nous considérons la condition de non décollement des pièces assemblées. Tant que les sollicitations extérieures  $F_{ext}$  n'entraînent pas le décollement relatif des faces initialement en contact, l'égalité suivante est vérifiée [10]:

$$\frac{1}{K_V} (F_V - F_V^{init}) = \frac{1}{K_{Str}} (F_V^{init} - F_{Str}) \quad (1)$$

avec  $F_V^{init}$  force de précontrainte initiale dans la vis,  $F_V$  et  $F_{Str}$  sont respectivement les efforts dans la vis et dans les strates assemblées.  $K_V$  et  $K_{Str}$  sont respectivement les rigidités de la vis et des strates. De plus l'équilibre de l'ensemble vissé donne:

$$F_{ext} + F_{Str} - F_V = 0 \quad (2)$$

D'où

$$F_V^{init} = F_V - \Delta F_V = F_V - \gamma \cdot \frac{K_V}{K_V + K_{Str}} \cdot F_{ext} = F_V - \phi \cdot F_{ext}, \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (3)$$

avec  $\Delta F_V$  la variation de l'effort dans la vis dû à  $F_{ext}$ .  $\phi$  est le facteur de charge.

Les forces de contact (voir figure 3), issues de la simulation de l'opération de l'emboutissage, sont appliquées de manière statique, sur le modèle de poinçon discrétisé par éléments finis. Ces forces de contact engendrent une force axiale totale  $F_{ext} = 13359$  N, qui correspond à la force totale d'emboutissage.

## 5 Résultats et discussion

Les figures 4a et 4b montrent respectivement la distribution de la pression à l'interface étudiée, sous l'effet du vissage et sous l'effet combiné du vissage et des forces externes. L'application des forces de contact sur le modèle, provoque une variation de l'effort de précontrainte

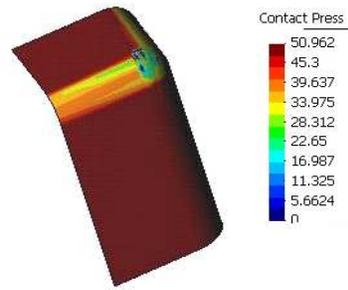


FIG. 3 – Distribution de la pression de contact sur le poinçon rigide.

de l'ordre de  $\Delta F_V = 55$  N dans la vis. La force de précontrainte initiale étant de 115 N. La force totale de compression à l'interface étudiée peut être calculée selon la relation:  $F_c = F_V^{init} + (F_{ext} - \Delta F_V)$ . D'après la figure 5a, la variation de l'effort de précontrainte dans la vis est linéaire vis à vis du chargement extérieur  $F_{ext}$ . La figure 5b montre que la valeur relative de la variation de précontrainte décroît de manière exponentielle en fonction de la force minimale  $F_V^{init}$  installée initialement dans la vis. Les résultats obtenus sont en cohérence avec la littérature sur les assemblages par éléments filetés [8, 10].

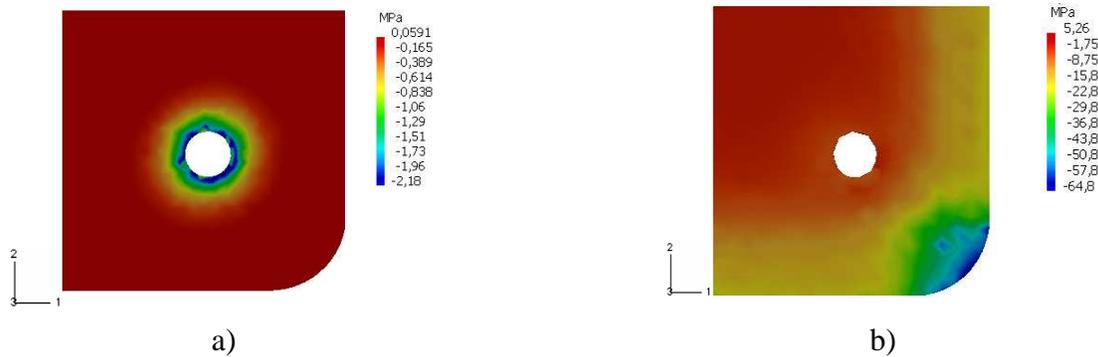


FIG. 4 – a) Distribution de la pression à l'interface étudiée, sous l'effet du vissage, b) Distribution de la pression à l'interface étudiée, sous l'effet des forces de contact; pour  $F_V^{init} = 115$  N

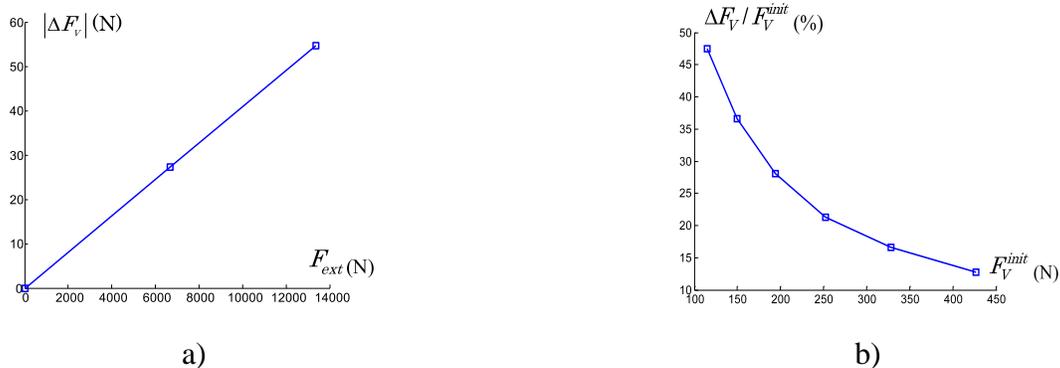


FIG. 5 – a) Variation de l'effort dans la vis en fonction de  $F_{ext}$ ; pour  $F_V^{init} = 115$  N, b) Influence de  $F_V^{init}$  sur la variation relative de l'effort dans la vis; pour  $F_{ext} = 13359$  N

## 6 Conclusion et Perspectives

Dans ce travail, nous avons présenté une procédure numérique pour le dimensionnement des outils d'emboutissage stratifiés et assemblés par vissage. Dans une première étape de l'étude, des résultats sur la réponse élastique des liaisons vissées d'un poinçon stratifié sont obtenus dans le cadre de l'emboutissage de la boîte carrée du benchmark Numisheet'93. La principale perspective consiste à traiter un cas industriel avec une géométrie complexe, afin de mettre en place une démarche générale de calcul et éventuellement d'optimisation de la conception des outils d'emboutissage stratifiés, assemblés par vissage.

## Références

- [1] M. Oudjene, J-L. Batoz, F. Mercier, L. Penazzi and C. Pelaingre. Mechanical Analysis of Prototyping Tools for Sheet Metal Stamping. Proceedings of RPD2004 - Advanced Solutions and Development, Marinha Grande, Portugal, 2004.
- [2] D.F. Walczik and D.E. Hardt. Rapid Tooling for Sheet Metal Forming Using Profiled Edge Laminations - Design Principles and Demonstrations. Journal of Manufacturing Systems., 120:746–754, 1998.
- [3] D.H. Müller and H. Müller. Rapid Prototyping Techniques to Manufacture Sheet Metal Forming Tools. ISATA 2000, Dublin, Ireland, 9 pages, September 25-27 2000.
- [4] B. Wadman. Flui Cell Forming Tools Produced by Different Rapid Prototyping Methods. IDDRG Conference, Bled, Slovenia, 205-214, 2003.
- [5] R. Martin. Formage à la presse: Travail des métaux en feuilles; Assemblage. Techniques de l'Ingénieur, Vol. B7-II, art. B7510, Paris (Fr.), 1977.
- [6] M.R. Jensen, F.F. Damborg, K.B. Nielsen, J. Dankert. Applying the finite element method for determination of tool wear in conventional deep-drawing. Journal of Materials Processing Technology., Vol. 83:98-105, 1998.
- [7] M. Burlat. *Analyse mécanique et tribologique de l'emboutissage: application aux outils fabriqués par combinaison de différents matériaux*. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- [8] M. Yoneno, T. Sawa and T. Ishihara. The Strength of Joints Combining Adhesives with Bolts (Case where Adherends are Pipe Flanges of which the Interfaces are Bonded Partially). JSME International Journal., Vol. 42:126-134, 1999.
- [9] H.H Ziada and A.K. Abd El Latif. Loading Conditions in Bolted and Riveted Joints Affected by Plate Thickness Ratio. Journal of Mechanical Design., Vol. 102:851-856, 1980.
- [10] J. Massol. *Etude des assemblages boulonnés à chargement faiblement excentré soumis à des sollicitations de fatigue*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 1994.
- [11] M. Oudjene, F. Mercier, L. Penazzi and J-L. Batoz. Finite Element Analysis of Laminated Tools for Sheet Metal Stamping. Proceedings of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming. Cluj-Napoca, Romania, April 27-29, 2005.
- [12] C. Barlier. Le procédé de prototypage rapide par STRATOCONCEPTION®. Actes des premières assises Européennes du prototypage rapide. Ecole Polytechnique, Plaiseau, 1992.
- [13] [www.cirtes.fr](http://www.cirtes.fr)