
Analyse fiabiliste du procédé de mise en forme des tôles minces

S. Bouabdallah, S. Ben Chaabane, S. Missoum

*Pôle Universitaire Léonard de Vinci
12, avenue Léonard de Vinci
92916 Paris La Défense CEDEX
samir.benchaabane@devinci.fr*

RÉSUMÉ. Les procédés de mise en forme font intervenir plusieurs paramètres dont les valeurs varient autour de valeurs nominales de manière incertaine. Nous proposons dans cette étude une méthode d'analyse fiabiliste du procédé d'emboutissage des tôles minces basée sur l'utilisation du diagramme limite de formage. Une probabilité d'échec est définie en fonction de l'éloignement des points du domaine d'acceptabilité défini par les courbes limites de formage.

ABSTRACT. Forming processes deal with several parameters presenting uncertainties. We propose in this paper a method for the reliability analysis of the deep drawing process. The limit state functions used in this analysis are based on the forming limit diagram. The distance of points to the diagram allows to defining a failure criterion and the corresponding probability.

MOTS-CLÉS : Mise en forme, éléments finis, fiabilité, surface de réponse, plan d'expériences.

KEYWORDS: Deep drawing, Finite element method, reliability, response surface, design of experiments.

1. Introduction

Les outils numériques de simulation des procédés de mise en forme sont de plus en plus utilisés par les grandes et les petites entreprises dès les premières phases de la conception du produit. Ces outils sont devenus aujourd’hui indispensables pour la mise au point des produits et du procédé lui même, de manière automatique et dans des délais de plus en plus courts.

La simulation du procédé de mise en forme fait intervenir plusieurs paramètres physiques. Cependant ces paramètres sont souvent considérés comme déterministes et leur variabilité n'est pas prise en compte. Notre étude s'intéresse aux effets des dispersions des coefficients de frottement sur l'admissibilité de l'embouti afin de calculer une probabilité de défaillance du procédé vis à vis du domaine délimité par les courbes limites de formage.

Les méthodes utilisées pour le calcul de cette probabilité d'échec se basent sur des simulations de type Monte Carlo. Afin de limiter le nombre d'analyses éléments finis, et ainsi le temps de calcul, les résultats seront approchés par des surfaces de réponses construites à partir de plans d'expérience adéquats tels que les hypercubes latins (LHS).

La méthode développée sera appliquée à l'emboutissage d'une boîte carrée avec prise en compte du retour élastique.

2. Modélisation du procédé de mise en forme et critères d'admissibilité de la conception

Le procédé de mise en forme des tôles minces fait intervenir de nombreux phénomènes physiques : grandes transformations, trajets complexes des déformations, comportement élasto-plastique anisotrope, contacts et frottements, auxquels il est difficile et coûteux d'accéder par des voies expérimentales. Seules les techniques de simulation numérique et principalement la méthode des éléments finis, permettent d'approcher un comportement aussi complexe.

Dans un procédé de mise en forme, la feuille de métal est soumise à l'action d'outils : poinçon, matrice, et serre-flan. Ces outils sont généralement considérés comme des corps rigides, provoquant par une action de contact, la déformation de la tôle suivant une cinématique bien définie. Les interactions normales et tangentielles dues au contact entre les outils et la tôle sont prises en compte. Les coefficients de frottement outils-tôle ont une grande influence sur le déroulement du procédé et sur la qualité de l'embouti.

A partir de calculs par éléments finis nous utilisons les valeurs des déformations principales en chaque point d'intégration pour juger de la qualité et de l'acceptabilité de la pièce. En effet dans le domaine de l'emboutissage les critères d'acceptation d'une pièce portent sur le risque de rupture, le risque d'apparition de

plis ou la présence de défauts de plats. Pour une pièce donnée, ces trois critères peuvent être représentés dans l'espace des déformations principales ($\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$) par des courbes ou des droites, délimitant ainsi l'espace des valeurs admissibles en $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$.

Ne disposant pas de courbe limite d'emboutissage, nous utiliserons dans ce qui suit comme critère de rupture le critère d'amincissement. Nous tolérerons un amincissement de l'ordre de 20%. La droite représentative du risque de rupture est alors donnée par :

$$\varepsilon_I = 0.2 - \varepsilon_{II}$$

La droite représentative du risque de plis est donnée par :

$$\varepsilon_I + \varepsilon_{II} = 0$$

Le risque de plat est représenté par le cercle

$$\sqrt{\frac{3}{2}(\varepsilon_I^2 + \varepsilon_{II}^2)} \leq \varepsilon_{admissible} = 4\%$$

Le rayon du cercle est $R = 0.03266$

La figure 1 illustre la représentation des différents critères retenus dans le plan des déformations principales ($\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$).

3. Méthodologie proposée pour l'analyse fiabiliste du procédé de mise en forme

L'analyse fiabiliste d'un système permet d'évaluer la probabilité d'échec d'un système vis-à-vis d'un état limite donné. Cette probabilité est calculée grâce à la connaissance des distributions des paramètres incertains influant sur les réponses du système. Dans l'approche proposée, nous utilisons la distance des points n'appartenant pas au domaine de faisabilité de la pièce aux courbes représentatives des différents critères de défaillance. Ces distances, qui fournissent une mesure de la violation des critères, nous permettent de calculer la probabilité de défaillance.

Afin d'analyser de façon statistique les résultats d'une simulation, les fonctions suivantes sont évaluées pour chaque simulation :

- DIST1 = $\sum \delta_1^2$: somme des carrées des distances entre les points violant le critère de rupture et la droite représentant ce critère.
- DIST2 = $\sum \delta_2^2$: somme des carrées des distances entre les points violant le critère de plissement et la droite représentant ce critère.
- DIST3 = $\sum \delta_3^2$: somme des carrées des distances entre les points violant le critère de plats et le cercle représentant ce critère.

Pour les points situés à l'intérieur du domaine admissible : $\delta_i = 0$

La méthodologie que nous avons adoptée est la suivante :

Après une analyse de sensibilité permettant de déterminer les paramètres influents, des simulations éléments finis sont réalisées sur un échantillon régulièrement répartis sur l'espace de conception choisi. Dans notre étude, la technique des hypercubes latin (LHS) est utilisée. Les points sont d'abord générés en faisant l'hypothèse que les distributions des variables incertaines sont uniformes afin d'échantillonner uniformément l'espace. A partir de ces premiers résultats une surface de réponse est construite pour chaque critère estimé. L'approximation utilisée, donnant la somme des distances à un critère donnés en fonction des paramètres incertains, est un polynôme du second ordre dont les coefficients sont obtenus par la méthode des moindres carrés.

Les fonctions DIST1, DIST2, DIST3 sont alors estimées pour un nouvel échantillon plus conséquent (10^4 à 10^5 tirages selon la précision souhaitée) à partir des surfaces de réponse. Les distributions obtenues sont estimées par le calcul de la moyenne et de l'écart type pour chacune des réponses : $(\mu_1, \sigma_1), (\mu_2, \sigma_2), (\mu_3, \sigma_3)$.

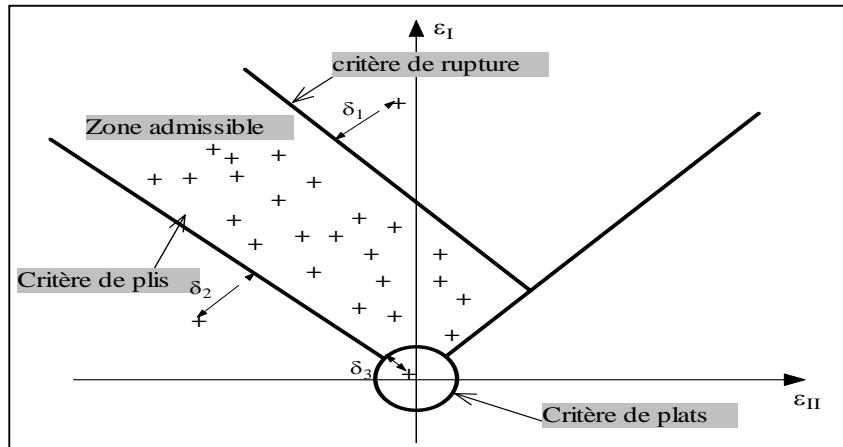


Figure 1. Domaine d'admissibilité et mesures de défaillance

On définit enfin un critère permettant d'estimer la probabilité de défaillance. En faisant l'hypothèse que toutes les simulations aboutissant à une réponse se situant au-delà de $\mu_i + 2\sigma_i$ sont défaillantes.

La probabilité de défaillance est alors donnée par :

$$P_f = \frac{N_{def}}{N_{sim}}$$

où N_{def} désigne le nombre de points défaillants et N_{sim} le nombre de simulations.

4. Application

L'exemple considéré est extrait de [NAG 91]. Il consiste à mettre en forme une boîte carrée de 36 mm de profondeur. Le flan initial a une dimension de 200mm x 200 mm et une épaisseur de 0.82 mm. Les outils sont considérés comme rigides. Les dimensions du poinçon et de la matrice sont précisées sur la figure 2. L'effort vertical appliqué sur le serre-flan est de 2.287×10^4 N. Les coefficients de frottement, considérés comme incertains, et ont des moyennes de 0.25 entre le flan et le poinçon et de 0.125 entre le flan et la matrice. On ne considère pas de frottement entre le flan et le serre-flan.

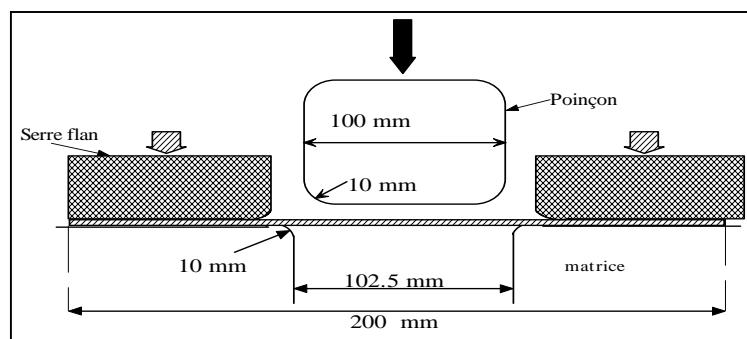


Figure 2. Emboutissage d'une boîte carrée

La tôle est en acier avec une loi de comportement de type Ramberg-Osgood : $\varepsilon = (\sigma/K)^{1/n}$, où ε est la déformation logarithmique et σ la contrainte de Cauchy. $K = 513$ MPa et $n = 0.223$. La limite élastique du matériau est $\sigma_y = 91.3$ MPa, le Module d'Young $E = 211$ GPa et le coefficient de poisson $\nu = 0.3$.

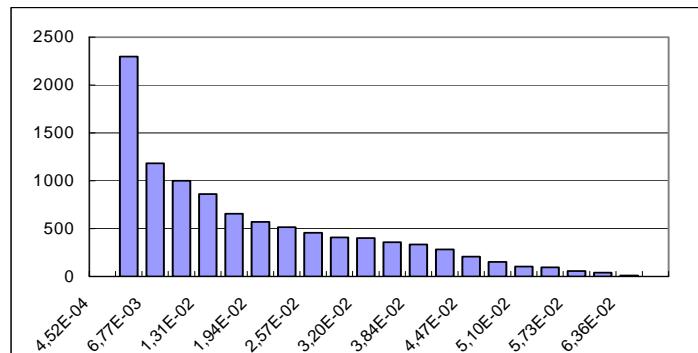
Seul le quart de la plaque a été modélisé. Nous avons utilisé ABAQUS Explicite pour la simulation de l'emboutissage et ABAQUS Standard pour le retour élastique.

L'étude a été menée en faisant varier les coefficients de frottement dans une plage comprise entre $\pm 40\%$ des valeurs indiquées ci-dessus. La distribution obtenue pour la mesure de distance par rapport au critère de rupture est représentée sur la figure 3. Pour la valeur seuil de $\mu+2\sigma$, l'estimation de la probabilité de défaillance donne, pour le critère de rupture 4.73 %, pour le critère de plis 8.0 % et pour le critère de plats 0.0 %.

5. Conclusions

Nous avons présenté une méthodologie d'analyse fiabiliste dans le but d'estimer l'acceptabilité de la conception d'un embouti. Cette approche repose sur la mesure

de la distance séparant les points situés à l'extérieur du domaine de faisabilité aux frontières de ce dernier dans le plan des déformations principales. Après une série de calculs sur un échantillon de taille réduite, et la construction de surfaces de réponse, une probabilité de défaillance relative à chacun des critères limitant le domaine de faisabilité est calculée sur un échantillon de taille plus importante. Cette démarche permettra d'étendre l'étude à l'optimisation fiabiliste du procédé d'emboutissage. Dans ce dernier cas l'étude de la fiabilité devient très pertinente puisque l'optimisation pousse typiquement les conceptions en bordure du domaine



réalisable.

Figure 3. Distribution de la distance au critère de rupture(DIST1)

6. Bibliographie

- [MEL 99] R.E Melchers. "Structural Reliability Analysis and Prediction". Chichester: John Wiley & Sons; 1999
- [MYE 02] R.H. Myers, D.C. Montgomery "Response Surfaces Methodology". New-York: Wiley & Sons; 2002.
- [BEN 99] S. Ben Chaabane, J. Pavie, V. Braibant, E. Di Pasquale, « Study and Evaluation of Different Formulations of the Optimization Problem Applied to the Stamping Process ». in "Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering '98", Chedmail et al., Kluwer Academic Publishers, Netherlands 1999.
- [GUO 00] Y.Q. Guo, J.L. Batoz, H. Naceur, S. Bouabdallah, S. Mercier, O. Barlet, "Recent developments on the Analysis and Optimum Design of Sheet Metal Forming Parts using a Simplified Inverse Approach", *Computer & Structures*, Volume 80, Issues 1-3, November 2000, Pages 133-148.
- [NAG 91] Nagtegaal, J. C., and L. M. Taylor,"Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods for Analysis of Sheet Forming Problems", *VDI Berichte* No. 894, 1991.