

Contribution à une Approche Simplifiée pour la simulation numérique du formage incrémental

Y.YU ^{a,b}, A.DELAMÉZIÈRE ^{a,b}, M.NOUARI ^{a,b}, L. BEN AYED ^{a,b}

a. Université de Lorraine, LEMTA, UMR 7563, Saint-Dié des Vosges, F-88100, France
b. CNRS, LEMTA, UMR 7563, GIP-InSIC, 27 rue d'Hellieule, Saint-Dié des Vosges, F-88100, France

Résumé :

Le formage incrémental est un procédé innovant de mise en forme des tôles métalliques [1][2]. A l'aide d'un outil à bout hémisphérique, la tôle encastrée sur son contour est déformée localement suivant une trajectoire d'outil définissant ainsi la forme finale de la pièce. La maîtrise de la simulation numérique de ce procédé permet de prédire la formabilité et la qualité de la géométrie de la pièce. Les algorithmes classiques de la simulation du formage incrémental amènent à des temps de calculs très longs. Pour diminuer les temps de calcul, une Approche Simplifiée a été développée. Cette approche permet de se soustraire à l'intégration de l'outil et de l'algorithme de contact dans la simulation numérique, en les remplaçant par une imposition locale et évolutive de déplacements sur certains nœuds supposés être en contact avec l'outil. Une alternative est proposée pour diminuer la durée d'une séquence de simulation, en utilisant un élément fini de type coque, appelé DKTRF (Discrete Kirchhoff Triangle Rotation Free). Cet élément permet de tenir compte des effets de membrane et de flexion avec un nombre limité de degré de liberté, 9 ddl par élément. Les termes en flexion sont définis en fonction des déplacements nodaux des éléments adjacents. Ces méthodes permettent d'obtenir une bonne estimation de la géométrie, de l'épaisseur de la pièce et des déformations, avec des temps de calculs considérablement réduits.

Abstract:

The incremental sheet forming (ISF) is an innovative process in sheet metal forming method. By using a hemispherical tool, the embedded sheet is locally deformed following a tool path, defining thus the final geometry of the product. The numerical simulation controls permit to foresee the formability and the geometrical quality of the part. Classic algorithms of ISF simulation lead to very long computation times. In order to reduce the computation time, a simplified approach was developed. This approach allows avoiding the integration of the tool and the algorithm contact into the numerical simulation, by replacing them with a local and progressive displacement imposition of certain nodes supposed to be in contact with the tool. Another alternative is proposed to reduce the duration of a simulation sequence, by using a finite element shell type called DKTRF (Discrete Kirchhoff Triangle Rotation Free). This element takes account of the membrane and bending effects with a limited number of degrees of freedom, 9 dof per element. The flexion terms are defined in accordance with the nodal transverse displacements of the adjacent elements. These methods provide a good geometrical, thickness estimation of the part, with a significant reduce of the computation time.

Mots clefs : Formage incrémental, condition de contact, élément finis, élément rotation libre

1 Introduction

Le processus de conception des pièces métalliques industrielles est largement influencé par la demande de diminution des coûts, et des délais des cycles de développement. Le respect de ces impératifs a désormais rendu la simulation incontournable, aussi bien pour les constructeurs, que les nombreux sous-traitants et fournisseurs. Pour le formage incrémental, la simulation numérique permet de prédire la formabilité et la

qualité de la géométrie d'une pièce pour une trajectoire donnée [3]. Il existe de nombreux codes de calculs commerciaux utilisés pour la simulation du procédé de formage incrémental. Les résultats obtenus sont de bonnes qualités, mais les temps de calcul sont encore très élevés [4]. Ces temps élevés sont dû à la non-linéarité du contact en lui-même, notamment à une zone de contact évolutive (un point de la tôle entre en contact avec l'outil, puis ce contact est perdu), mais également au pas de déplacement de l'outil qui doit être très faible.

Pour pouvoir diminuer le temps de calcul élevé, le développement d'une Approche Simplifiée de contact a été effectué [5], permettant ainsi d'avoir une bonne approximation de la géométrie et de l'épaisseur de la tôle. En évitant de décrire l'outil et le contact, l'Approche Simplifiée estime par des hypothèses géométriques les déplacements imposés à la tôle lors d'une partie de la trajectoire de l'outil. Ces déplacements sont ensuite imposés dans une simulation par éléments finis du comportement élasto-plastique de la tôle.

Pour continuer à diminuer la durée d'une séquence de simulation, l'utilisation d'un élément coque triangulaire DKTRF (rotation free) [6] est proposée dans ce travail. Cet élément contient moins de degré de liberté par élément par rapport à l'élément DKT12 [7] utilisé précédemment, mais permet de tenir compte des effets de flexion.

2 Approche Simplifiée

Le principe de cette approche est d'appliquer des déplacements sur les nœuds qui sont supposés être en contact avec l'outil, ou avoir été en contact pendant un incrément de temps [8]. Les déplacements des autres nœuds ainsi que les autres champs mécaniques sont obtenus uniquement par l'équilibre élasto-plastique de la tôle (figure 1). L'outil n'est pas inclus dans le modèle d'élément finis. Le frottement entre les deux surfaces (l'outil / la tôle) est omis. Un critère géométrique est utilisé en plus de l'interpénétration entre les deux surfaces afin de déterminer les nœuds aux déplacements imposés.

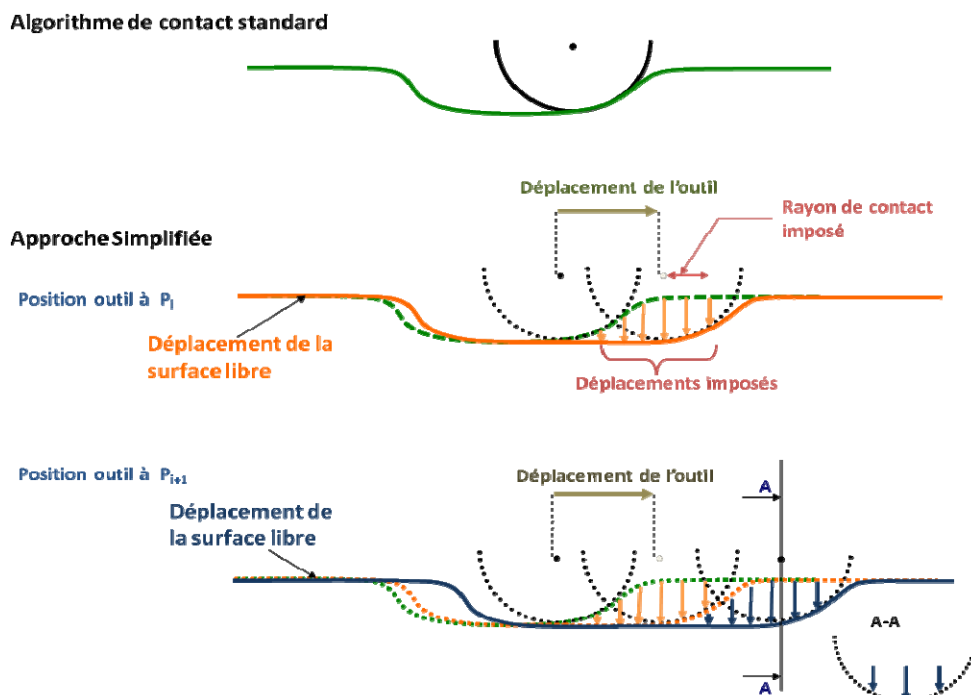


FIG 1 : – Comparaison entre l'algorithme de contact classique et l'Approche Simplifiée

3 Modèle éléments finis

Des éléments de coque triangulaires sont largement utilisés pour résoudre des problèmes de coque à grande échelle. Beaucoup de ces problèmes impliquent des non linéarités en géométrie et en matériel. Ces difficultés,

sont généralement augmentées par la nécessité de discrétisation des formes géométriques complexes. Au cours de ces dernières années, des éléments coques sans degré de liberté en rotation ont été développés, et sont utilisés avec succès dans la simulation de la mise en forme par emboutissage [9] [10] [11]. Ces éléments constituent une alternative intéressante par rapport aux éléments plaques-coques classiques. Le principe de cet élément est de définir les termes en flexion par les trois translations sur les nœuds aux sommets d'un élément et de ses éléments adjacents. Avec son faible nombre de degrés de liberté, le temps de calcul est divisé par deux dans un cas élastique [6]. L'absence du phénomène de blocage cisaillement-flexion représente un autre avantage de cet élément.

3.1 Élément DKTRF

Pour pouvoir atteindre l'objectif de réduction du temps de calcul de la simulation, l'élément de coque DKTRF (RF : rotation free) [6] est intégré dans un code élément du laboratoire [12] adapté pour l'Approche Simplifiée. Seulement trois déplacements transversaux par élément, avec les trois éléments adjacents, les rotations autour des trois côtés sont exprimées avec 18 déplacements des nœuds aux sommets. Les effets de membrane et de flexion sont calculés pour un élément, avec seulement 9 ddl (figure 2), qui présente une diminution importante des temps de calculs.

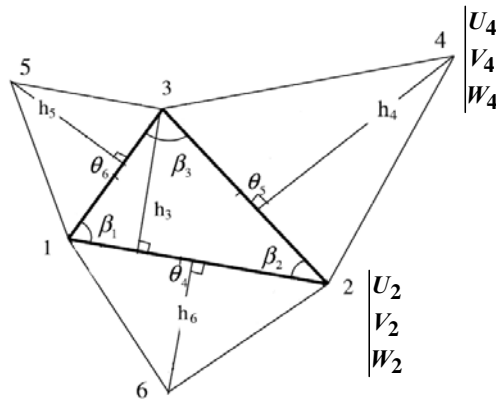


FIG 2– L'élément coque DKTRF (élément 123 avec ces éléments adjacents)

3.2 Aspects formulation

L'équilibre de la structure coque est décrit par le principe des travaux virtuels (PVW) :

$$W = \sum_{elt} W^e = \sum_{elt} (W_{int}^e - W_{ext}^e) = 0$$

Si l'effet de cisaillement transversal est négligé, dans une référence locale, les travaux virtuels intérieurs peuvent être écrits par le vecteur de déformation virtuelle et le vecteur de la contrainte de Cauchy :

$$W_{int}^e = \int_{V^e} \langle \varepsilon_x^* \ \varepsilon_y^* \ \gamma_{xy}^* \rangle \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dV$$

Avec le vecteur de déformation virtuelle composée de :

$$\{\varepsilon^*\} = \{e^*\} + z\{\chi^*\} = \begin{Bmatrix} u_{,x}^* \\ u_{,y}^* \\ u_{,y}^* + u_{,x}^* \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \beta_{x,x}^* \\ \beta_{y,y}^* \\ \beta_{x,y}^* + \beta_{y,x}^* \end{Bmatrix} \quad \left(-\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}\right)$$

$\{e^*\}$ et $z\{\chi^*\}$ représente les déformations virtuelles de membrane et de flexion. Les déformations virtuelles de la partie membrane et flexion pour un élément DKT12:

$$\begin{aligned} \{e^*\} &= [B_m]\{u_m^*\} \\ \text{avec } \langle u_m^* \rangle &= \langle u_1^* \quad v_1^* \quad u_2^* \quad v_2^* \quad u_3^* \quad v_3^* \rangle \\ \{\chi^*\} &= [[B_w] \quad [B_\theta]]\{w_n^*\} = [B_f]\{w_n^*\} \\ \text{avec } \langle w_n^* \rangle &= \langle w_1^* \quad w_2^* \quad w_3^* \quad \theta_4^* \quad \theta_5^* \quad \theta_6^* \rangle \end{aligned}$$

(Avec $[B_m]$ l'opérateur constant des déformations en membrane, $[B_f]$ l'opérateur constant des déformations en flexion)

La déformation virtuelle de flexion pour un élément DKTRF est exprimée avec les déplacements des 6 nœuds (dont 3 nœuds de l'élément en question, et 3 nœuds de ces éléments adjacents) par l'intermédiaire des angles de rotation de chaque triangle α_i :

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{Bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \alpha_3 - \alpha_6 \\ \alpha_1 - \alpha_4 \\ \alpha_2 - \alpha_5 \end{Bmatrix} = [\bar{R}_0]\{w_n\} \\ \text{avec } \langle w_n \rangle &= \langle w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4 \quad w_5 \quad w_6 \rangle^T \\ \{\chi^*\} &= [B_w] \begin{Bmatrix} w_1^* \\ w_2^* \\ w_3^* \end{Bmatrix} + [B_\theta] \begin{Bmatrix} \theta_4^* \\ \theta_5^* \\ \theta_6^* \end{Bmatrix} = [B_w] \begin{Bmatrix} w_1^* \\ w_2^* \\ w_3^* \end{Bmatrix} + [B_\theta][\bar{R}_0]\{u_n^*\} = [B_f]\{u_n^*\} \end{aligned}$$

La matrice de rotation $[\bar{R}_0]$ (18x18) qui est constitué des caractéristiques géométriques de l'élément principal, représente le principal de l'élément DKTRF. La matrice de rigidité global est composée de deux parties : la matrice de rigidité non-linéaire (partie élasto-plastique) $[k_{eq}]$ et la matrice de rigidité géométrique $[k_\sigma]$:

$$[K_T^i] = \sum_e [T]^T ([k_{ep}] + [k_\sigma] - [k_\lambda])[T]$$

La matrice de rigidité de DKTRF est de taille 18x18 qui considèrent les 18 déplacements transversaux. La modification exige un peu plus de temps de CPU pour le calcul de la matrice de rigidité, mais il n'augmente pas le nombre total de degré de liberté dans les équations du système global, par rapport à un élément de membrane seul.

4 Tests et validations

Un cas-test proposé est de mettre en forme la tôle avec une trajectoire de l'outil donnée. Cet outil parcourt un carré de 20 mm de côté pour une profondeur progressive atteignant 5 mm au final (figure 3). La tôle carrée utilisée dans ce cas-test mesure 50mm de côté et 1.5 mm d'épaisseur, elle est encastrée sur son contour. Les paramètres du matériau avec le comportement élasto-plastique sont les suivants :

- Module de Young : 69000 MPa
- Coefficient de poisson : 0.33

La loi d'érouissage suit la loi Swift, le comportement est supposé isotrope :

$$\sigma^y = 150(0.013 + \bar{\epsilon}^{pl})^{0.214} \text{ MPa}$$

Dans la simulation, un outil hémisphérique de 10mm de diamètre est utilisé. La tôle est discrétisée en 2992 éléments triangulaires, et 1509 ddl avec 5 points d'intégration dans l'épaisseur, 9027 ddl pour DKT12, et 13167 pour Abaqus.

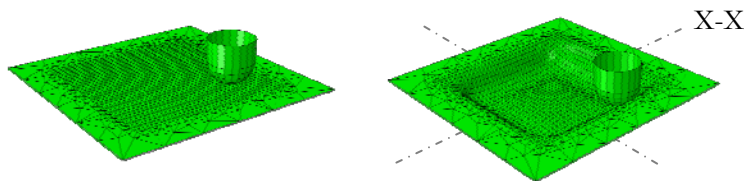


FIG 3 – Géométrie de la tôle et la trajectoire de l'outil

4.1 Interprétations des résultats

Une bonne corrélation des résultats est observée entre les valeurs obtenues avec Abaqus (statique/implicite) et les valeurs calculées à l'aide de l'Approche Simplifiée en utilisant l'élément DKTRF. Le temps de calcul est considérablement réduit (tableau 1).

Tableau 1 : Comparaison du temps de calcul entre les deux algorithmes			
	DKTRF-ISF	DKT12	Abaqus
Temps de CPU total	50min40s	59min 19s	5h16min6s
Rapports du temps	1	1.17	6.24

La géométrie de la tôle est bien prédite. Les déplacements des nœuds sur le plan de coupe X-X sont représentés ci-dessous (figure 4). Le profil de la pièce proche du contour encastré, est quasi identique à celui obtenu avec Abaqus. Cependant, une différence de profondeur d'environ 0.2 mm est observée au centre de la pièce. En termes de prédiction de l'épaisseur, le minimum est prédit. Un maillage plus affiné peut améliorer la répartition de l'épaisseur (Tableau 2).

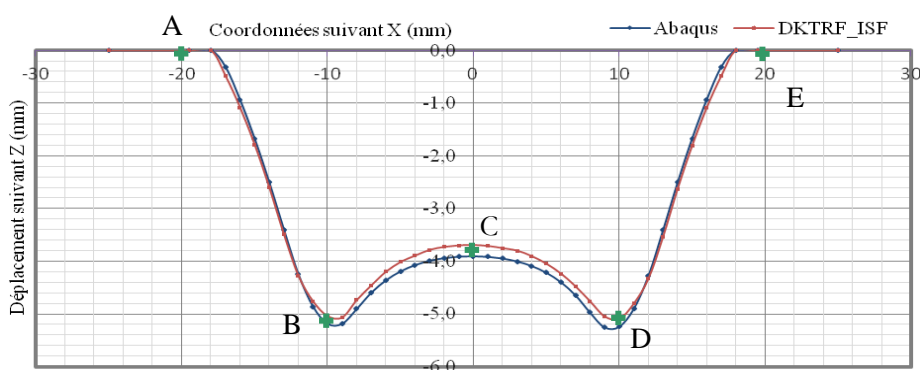


FIG 4 – Comparaison du déplacement suivant Z avec l'algorithme de contact classique (Abaqus)

Coupe X-X

Tableau 2 : Comparaison de l'épaisseur entre les deux algorithmes (épaisseur initiale =1.5mm)		
Coordonnées en X (mm)	DKTRF-ISF	Abaqus
-20	1.5	1.5
-10	1.213	1.147
0	1.484	1.482
10	1.237	1.146
20	1.5	1.5

5 Conclusion et perspectives

L'Approche Simplifiée a été développée et validée dans l'objectif de réduire le temps de calcul très élevé de la simulation classique du formage incrémental, en partie due aux gestions de contact. Cette approche consiste à remplacer le contact entre l'outil et la tôle par des impositions de déplacement aux nœuds supposés être en contact avec l'outil. Dans ce contexte, l'utilisation d'un élément sans degré de liberté en rotation (DKTRF) permet également de réduire le temps de simulation, en diminuant le nombre de nœuds en calcul. Une bonne corrélation des résultats a été observée, par ailleurs, la précision de la prédiction de l'épaisseur et d'autres résultats inhérents aux comportements élasto-plastique de la pièce nécessite une amélioration. La suite des travaux portera sur l'amélioration de la convergence de l'algorithme de résolution, qui est relativement faible en comparaison avec les logiciels de simulation classique.

References

- [1] E. Leszak, "Apparatus and process for incremental Dieless forming", brevet US 3,342,051, 1967
- [2] W.G. Berghahn, Lee, and G.F.Murray, Jr. (General Electric Company), "Method of dieless forming surfaces of revolution", brevet US 3,316,745, 1967
- [3] M. Bambach, G. Hirt, and J. Ames, "Quantitative validation of FEM simulations for incremental sheet forming using optical deformation measurement", *Advanced Materials Research*, 6-8, 509-511, 2005
- [4] Y.H. Kim, J.J. Park, "Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal", *J. Materials Proces. Technol.* 130-131, 42-46, 2002
- [5] C. Robert, L. Ben Ayed, A. Delamézière, P. Dal Santo, J.-L. Batoz, "On a simplified model for the tool and the sheet contact conditions for the SPIF process simulation", *SHEMET'09*, 13th International Conference on Sheet Metal, UK, Key Engineering Materials, 410-411, ISSN1013-9826, 373-379, 2009
- [6] Y.Q. Guo, W. Gati, H. Naceur, J.L. Batoz, "An efficient DKT rotation free shell element for springback simulation in sheet metal forming", *Comput. Structures*, 80 2299-2312, 2002
- [7] J.L. Batoz, Y.Q. Guo, H. Shakourzadeh. Analyse non linéaire de coques minces élasto-plastiques avec l'élément DKT12. *Revue Européenne des Eléments Finis*, 7(1-3), 223-39, 1998
- [8] C. Robert, L. Ben Ayed, A. Delamézière, P. Dal Santo, J.L. Batoz, "Development of a simplified approach of contact for incremental sheet forming", *Int. J. Mater. Forming*, 3, 987-990, 2010
- [9] E. Oñate, F.G. Flores, "Advances in the formulation of the rotation-free basic shell triangle", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 194 2406-2443, 2005
- [10] H. Laurent, G. Rio, "Formulation of a thin shell finite element with C^0 and convected material frame notion", *Computational Mechanics*, 27 218-232, 2001
- [11] M. Brunet, F. Sabourin, "A simplified triangular shell element with a necking criterion for 3-D sheet-forming analysis", *J. Mater. Proces. Technol.* 50 238- 251, 1995
- [12] J.L. Batoz, G. Dhatt, "Modélisation des structures par éléments finis", vol 3, Coques, Ed. Hermès, Paris, 1992