

# Développement d'une Approche Simplifiée de la simulation numérique du formage incrémental

Y.YU<sup>a</sup>, A.DELAMEZIERE<sup>a</sup>, M.NOUARI<sup>a</sup>, J.L.BATOZ<sup>b</sup>

a. LEMTA, UMR 7563 CNRS, Institut Supérieur d'Ingénierie de la Conception, France

b. Laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne, France

## Résumé :

*Le formage incrémental est un procédé qui permet de déformer localement la tôle à l'aide d'un outil à bout hémisphérique[1]. La forme finale de la pièce est générée par la trajectoire de l'outil qui impose une déformation incrémentale[2]. L'avantage de ce procédé est son faible coût de l'outillage par rapport à la méthode classique de la mise en forme (ex, emboutissage)[3]. La simulation numérique permet de prédire la formabilité et la qualité de la géométrie pour une trajectoire donnée. Avec les modèles classiques, le temps CPU de la simulation est très long. Le principe de l'Approche Simplifiée est d'éviter la description de l'outil et du contact en le remplaçant par une imposition locale et évolutive de déplacement à certains nœuds. L'Approche Simplifiée permet d'avoir une bonne estimation de la géométrie et de l'épaisseur de la pièce avec un temps de calcul réduit.*

## Abstract :

*The Incremental Sheet Forming (ISF) is a process, which can transform a flat metal sheet in a 3D complex part using a hemispherical tool. The final geometry of the product is obtained by the relative movement between the tool and the blank. The main advantage of this process is the very low cost of the tool compared to deep drawing with rigid tools. Classical contact algorithms give good agreement with experimental results, but are time consuming. A Simplified Approach for the contact management between the tool and the blank in ISF is presented here. The general principle of this approach is to impose displacement of the nodes in contact with the tool at a given position. On a benchmark part, the CPU time of the present Simplified Approach is significantly reduced compared with a classical simulation performed with Abaqus implicit.*

**Mots clefs :** Formage incrémental, condition de contact, élément finis

## 1 Introduction

La production de structures métalliques pour le prototypage ou des faibles séries à partir de tôles minces, est souvent problématique pour les industriels. Les fabricants doivent réduire le coût du développement d'un ensemble d'outillages et être capable de réagir rapidement pour répondre aux besoins de leurs clients. Dans ce contexte, les procédés de formage non conventionnels se sont beaucoup développés au cours de ces dix dernières années. Parmi ces procédés, le formage incrémental représente une alternative intéressante à l'emboutissage classique. Son principe est de déformer localement une tôle à l'aide d'un outil rigide à bout hémisphérique. Avec une trajectoire d'outil donnée, la tôle aura la forme finale souhaitée. L'avantage de ce procédé est sa très grande flexibilité et le faible coût de l'outillage.

La simulation numérique permet de prédire la formabilité et la qualité de la géométrie d'une pièce pour une trajectoire donnée. Il existe de nombreux codes de calculs commerciaux utilisés pour la simulation du procédé de formage incrémental. Les résultats obtenus sont de bonne qualité, 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 rentre en contact avec l'outil, puis ce contact est perdu), mais également au pas de déplacements de l'outil qui doit être très faible. Ce faible pas de déplacements nécessite donc un grand nombre d'incrément de la trajectoire pour pouvoir simuler la mise en forme d'une pièce

complète. En formage incrémental, la tôle subit des déplacements imposés par le contact avec l'outil et le mouvement relatif de l'outil par rapport à la tôle. 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 élastoplastique de la tôle.

## 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 (figure 1, flèches rouges), ou avoir été en contact pendant un incrément de temps [5]. Les déplacements des autres nœuds (figure 1, flèches vertes) ainsi que les autres champs mécaniques sont obtenus uniquement par l'équilibre de la tôle. L'outil n'est pas inclus dans le modèle d'éléments finis. Le frottement entre les deux surfaces (l'outil/la tôle) est omis. Un critère géométrique sera utilisé en plus de l'interpénétration entre les deux surfaces afin de déterminer les nœuds à déplacement imposé. Différentes tailles de l'incrément de déplacement sont testés dans cette étude. Cette taille d'incrément est considérée comme un paramètre d'entrée de l'algorithme.

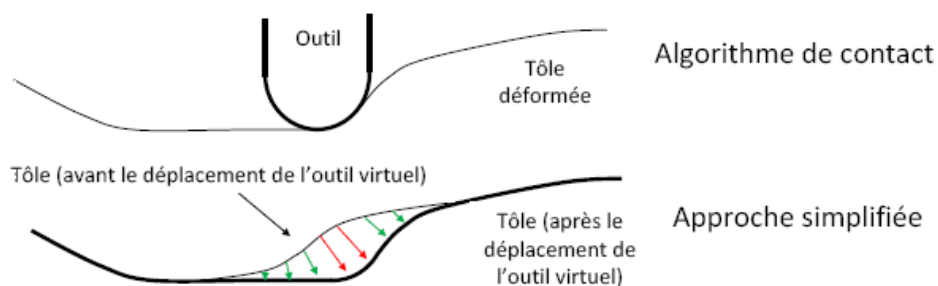


FIG. 1 – Comparaison entre l'algorithme de contact et l'Approche Simplifiée

### 2.1 Recherche des nœuds en contact

L'interpénétration entre la surface de l'outil et celle de la tôle n'est pas suffisante pour déterminer les nœuds sur lesquels il faut imposer les déplacements. Si tous les nœuds en interpénétration sont considérés en contact avec l'outil à la fin de chaque incrément, la géométrie de la tôle sera non conforme par rapport à la réalité.

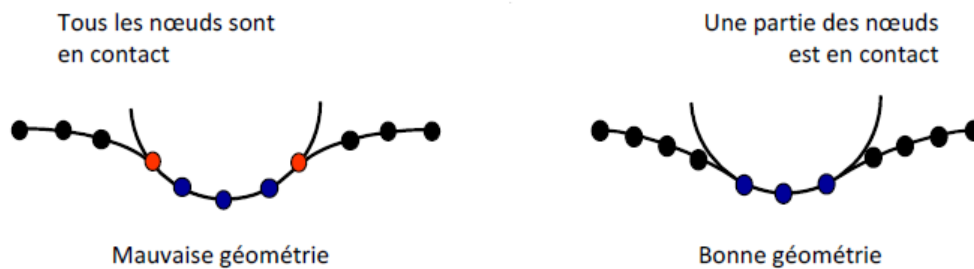


FIG. 2 – La géométrie conforme de la zone en contact (l'outil/la tôle)

Une hypothèse géométrique a été proposée pour déterminer la partie des nœuds en contact. Le paramètre 'rayon de contact imposé'  $R_{imp}$  est introduit dans cette hypothèse pour limiter la zone de contact. La tôle déformée peut être présentée en deux parties en forme de cercle, la première correspond à la zone de contact avec l'outil (figure 3, en rouge) et la deuxième représente la surface libre de la tôle (figure 3, en bleu).  $P_1$  est supposé suffisamment éloigné de la zone de contact, la tôle peut être considérée encastrée en point  $P_1$ .

La valeur de  $R_{imp}$  dépend de la longueur  $L$ . Si cette distance est trop grande (jusqu'à l'encastrement par exemple, figure 4, en rouge), l'hypothèse géométrique ne sera pas efficace pendant la simulation, et les résultats auront de moins bonne qualité. Dans cette Approche Simplifiée, une valeur de  $L$  de cinq fois le rayon de l'outil a été retenue après plusieurs cas-tests.

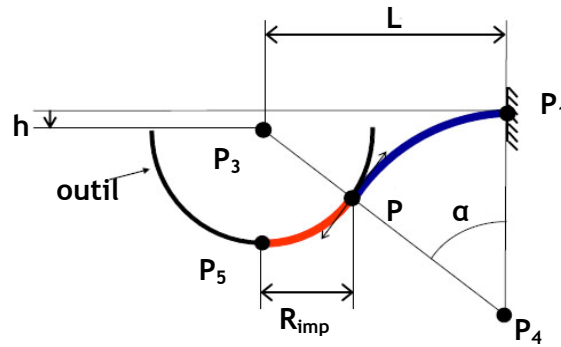


FIG. 3 – L’hypothèse géométrique

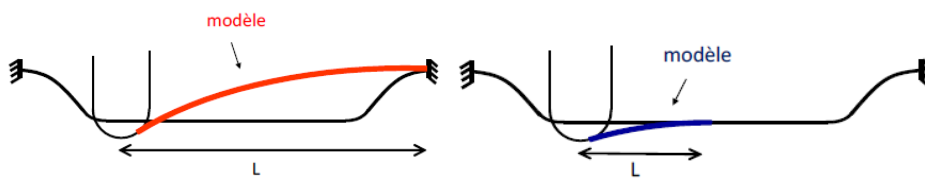


FIG. 4 – Le choix de la longueur L à l’encastrement

## 2.2 Incrément de déplacement

Pour pouvoir utiliser l’incrément de déplacement le plus grand possible afin de réduire le temps de calcul, il est nécessaire de positionner judicieusement l’outil au cours de chaque incrément de déplacement. Sur la figure 5,  $P_i$  et  $P_{i+1}$  sont deux différentes positions de l’outil au début et à la fin d’un incrément. En effet, pour des nœuds qui sont entre ces deux positions, il n’est pas réaliste de maintenir l’outil à la position  $P_i$  ou  $P_{i+1}$ . Car cette résolution risque de créer un effet de bombement local de la surface déformée (figure 5a, les nœuds rouges). Pour éviter ce problème, il est possible de diminuer la taille de l’incrément de déplacement, mais le temps de calcul sera plus long. Pour chaque nœud entre  $P_i$  ou  $P_{i+1}$ , une position d’outil intermédiaire sera choisit (figure 5b), qui permet aussi de minimiser la distance entre le centre de l’outil et le nœud piloté.

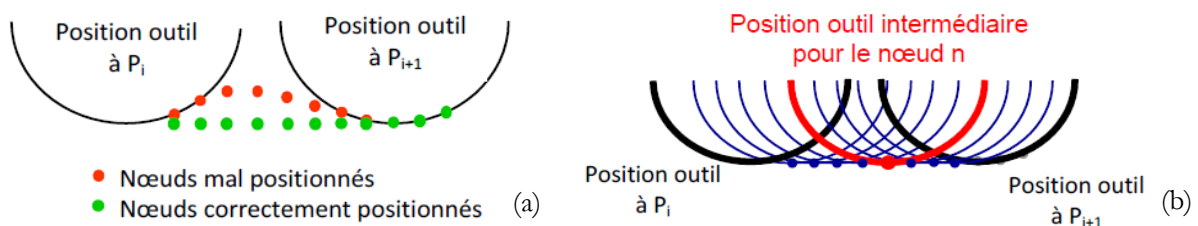


FIG. 5 – Positionnement de l’outil

La taille de l’incrément de déplacement est un paramètre qui permet de diminuer le temps de calcul en réduisant le nombre de calcul d’équilibre de la tôle. Ce paramètre est introduit comme une donnée de l’Approche Simplifié de gestion de l’interface de la tôle et l’outil. La taille de l’incrément est également dépendante de l’évolution de la tangente à la trajectoire. Lorsque la trajectoire change brusquement sa direction, l’algorithme termine l’incrément en cours (figure 6) et réinitialise le suivant. Pour chaque incrément, un calcul de l’équilibre de la tôle est réalisé en prenant compte du comportement élastoplastique. Plus la taille de l’incrément est grande, moins de calcul de l’équilibre de la tôle aura besoin. Le temps de calcul est donc diminuée, mais les résultats sont moins précis. Plusieurs tailles de déplacement ont été testées dans le cas-test détaillé dans le paragraphe suivant.

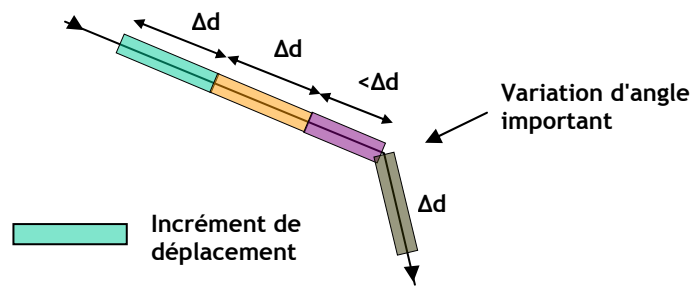


FIG. 6 – Incrément de déplacement

### 3 Comparaison et Validation

Ce cas-test proposé est de mettre en forme une géométrie pyramide [6]. Deux des surfaces opposées ont des inclinaisons différentes. La pyramide a une profondeur de 36mm et une base de 120x120mm (figure 7). Le flan initial est une tôle carré de 200mm de côté et de 1mm d'épaisseur. Un outil hémisphérique de 10mm de diamètre est utilisé. Une matrice, percée d'un trou carré de 130mm de côté, modélise la table où repose la tôle. La trajectoire de l'outil alternée (figure 7) par palier est choisie pour la réalisation de la pyramide. Le pas de déplacement suivant l'axe de l'outil, entre chaque contour, est de 0,5mm. Le matériau est un alliage d'aluminium (AA1050).

Dans la simulation numérique, la tôle est encadrée sur son contour. Les éléments utilisés sont des éléments de coque à six nœuds et 12ddl appelé DKT12 [7] qui associé l'élément de membrane CST ( $u, v$  aux nœuds sommets) et l'élément de flexion DKT6 ( $w$  aux sommets et  $\theta_s$  aux milieux des côtés). La tôle est discrétisé en 5784 éléments triangulaires, et 17515 ddl avec 3 points d'intégration dans l'épaisseur. 4 tailles d'incrément de déplacement ont été testés dans ce cas-test,  $\Delta d = \alpha.R$ ,  $R$  est le rayon de l'outil.

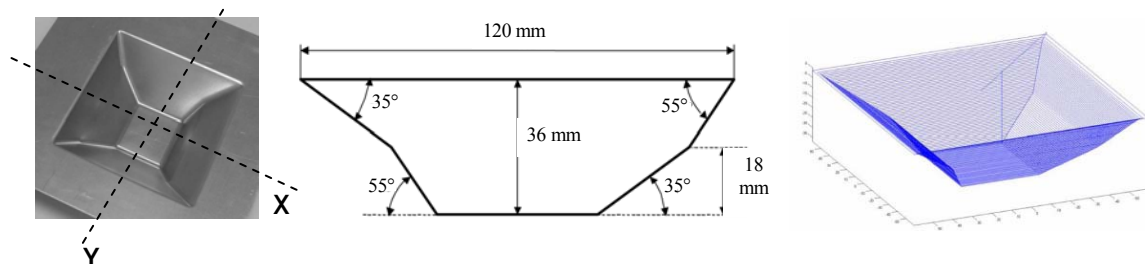


FIG. 7 – Géométrie de la pyramide et la trajectoire de l'outil

#### 3.1 Comparaison avec l'algorithme de contact standard

Les résultats obtenus avec l'Approche Simplifiée, en termes de l'épaisseur, sont comparés avec les valeurs obtenues avec Abaqus (statique/implicite) et celles d'expérimentales (figure 8). Une bonne approximation de la diminution de l'épaisseur est observée, malgré les valeurs minimales de l'épaisseur à la fin de l'opération du formage sont légèrement différentes.

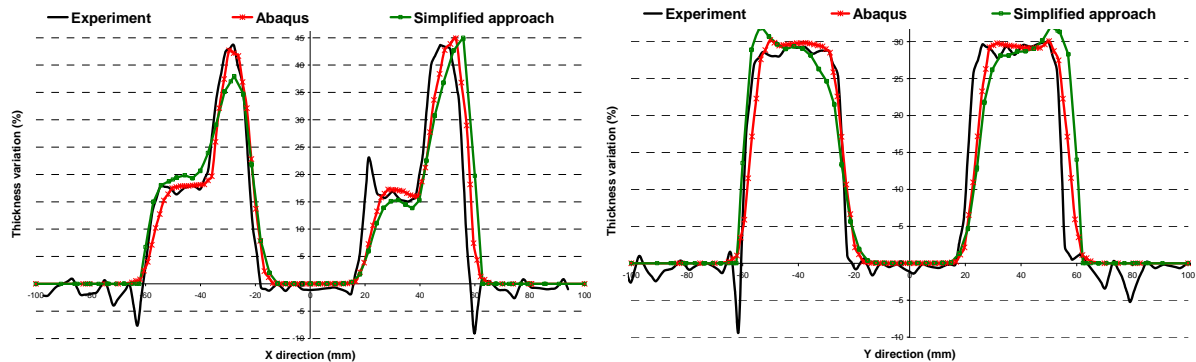


FIG. 8 – Comparaison de la diminution de l'épaisseur dans la direction x et y avec l'algorithme de contact classique (Abaqus)

### 3.2 Influence de l'incrément de déplacement

Dans ce cas-test, plusieurs tailles de l'incrément de déplacement ont été testées. Les résultats sont comparés en termes de temps de calcul. Un gain de temps de CPU considérable est obtenu avec l'Approche Simplifiée comparé avec l'algorithme de contact classique (Abaqus). A propos de la taille de l'incrément de déplacement, plus la taille est grande, plus le temps de CPU est réduit.

Table 1 : Le temps de calcul pour différentes taille de déplacement de l'outil					
	L'algorithme de contact classique (implicite)	Taille 1 (R)	Taille 2 (2R)	Taille 3 (3R)	Taille 4 (4R)
Temps de CPU total	86h13min	64h55min	31h24min	20h46min	13h21min
Rapports du temps	1	1,32	2,75	4,15	6,46

En termes de prédiction de l'épaisseur, une bonne corrélation est observée dans la figure 9. Malgré une répartition de l'épaisseur de moins bonne qualité pour la plus grande taille ( $\Delta d = 4R$ ), l'épaisseur minimale est bien prédite.

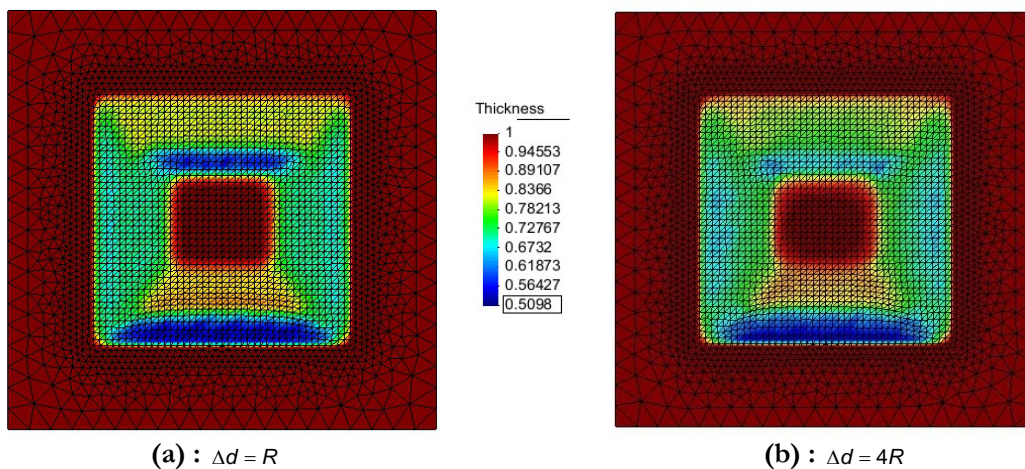


FIG. 9 – L'épaisseur de la tôle pour différentes taille de l'incrément de déplacement

## 4 Modèle élément finis

Pour diminuer le temps de calcul, un autre élément coque appelé DKTRF (DKT rotation free) [8] est en cours d'intégration dans l'Approche Simplifiée. Le principe de cet élément est d'utiliser les déplacements transversaux pour définir les termes en flexion. 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 10), qui présente une diminution importante en temps de calcul.

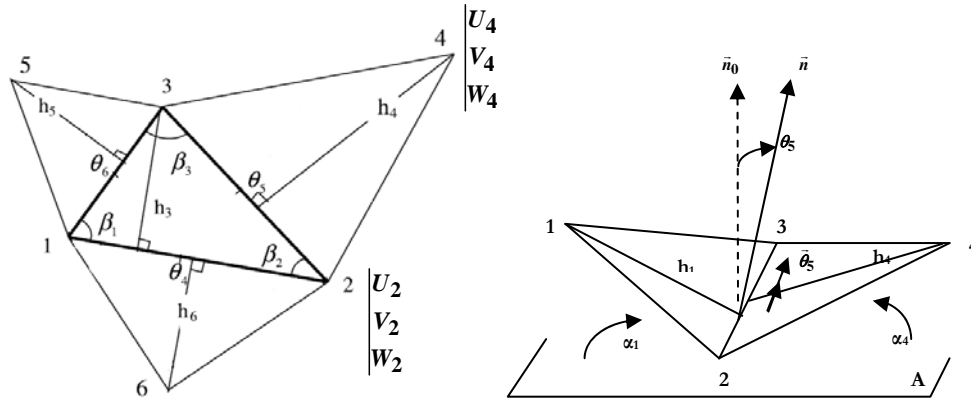


FIG. 10 – L'élément coque DKTRF (élément 123 avec ces éléments adjacents)

## 5 Conclusion

L'Approche Simplifiée a été développée pour réduire le temps de calcul de la simulation numérique du procédé de formage incrémental. Cette approche est basée sur l'imposition des déplacements sur certains nœuds, qui sont considérés en contact avec l'outil. Un gain de temps important a été obtenu en comparant avec l'algorithme du contact classique, pour la géométrie d'une pyramide. La prédiction de la géométrie et des épaisseurs est d'une grande précision. La suite des travaux portera sur l'adaptation d'un autre élément coques DKTRF, qui permettra de réduire davantage le temps de calcul.

## Références

- [1] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou and J. Allwood, "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal" in Annals of CIRP, Vol 54/2, pp. 623-649, 2005.
- [2] J.J. Park and Y.H. Kim, "Effect Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique", J. Mater. Process. Technol. Vol.140, pp. 447-453, 2003.
- [3] E. Ceretti, C. Giardini and A. Attanasio, "Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines", J. Mater. Process. Technol. Vol. 150, pp. 176-184, 2004.
- [4] Y.H. Kim, J.J. Park, "Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal", J. Mater. Process. Technol. Vol. 130-131, pp. 42-46, 2002.
- [5] 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, V.3, pp987-990, 2010.
- [6] M. Bambach, "A geometrical model of the kinematics of incremental sheet forming for the prediction of membrane strains and sheet thickness", J. Mater. Process. Technol. V.210, Issue 12, pp1562-1573, 2010.
- [7] J.L. Batoz, Y.Q. Guo and H. Shakourzadeh, "Analyse non linéaire de coques minces élasto-plastiques avec l'élément DKT12", Revue Européenne des Eléments Finis 7 1-3, pp. 223-239, 1998.
- [8] 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, vol. 80, no27-30, pp. 2299-2312, 2002.