



Remaillage adaptatif pour la mise en forme des tôles minces

Laurence Moreau, Houman Borouchaki, Abdelhakim Cherouat

LASMIS – CNRS FRE 2719, université de technologie de Troyes, BP 2060, 10010 Troyes cedex, France

Reçu le 2 décembre 2003 ; accepté après révision le 26 janvier 2005

Présenté par Évariste Sanchez-Palencia

Résumé

Les problèmes associés aux simulations éléments finis des procédés de mise en forme sont caractérisés par de grandes déformations thermoélasto-plastiques, du contact évolutif avec frottement, de fortes non-linéarités géométriques, entraînant de fortes distorsions du maillage du domaine de calcul. De fréquents remaillages du domaine sont alors nécessaires au cours du calcul afin d'obtenir une solution correcte et de pouvoir effectuer les calculs jusqu'à la fin du procédé. Cette Note présente une nouvelle méthode de remaillage adaptatif des structures minces pour la simulation numérique des procédés de mise en forme. La méthode proposée est basée sur des critères géométriques et ne tient pas compte de la géométrie des outils de mise en forme. Elle est intégrée dans un environnement de calcul utilisant le solveur ABAQUS. Des exemples numériques viennent illustrer l'efficacité de la méthode. *Pour citer cet article : L. Moreau et al., C. R. Mecanique 333 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Adaptive remeshing for sheet metal forming. Problems associated with finite element simulation of the forming processes are characterized by large elastoplastic deformations, evolutive contact with friction, geometrical nonlinearities inducing a severe distortion of the computational mesh of the domain. In this case, frequent remeshing of the deformed domain during computation are necessary to obtain an accurate solution and complete the computation until the termination of the numerical simulation process. This Note presents a new adaptive remeshing method of thin sheets for numerical simulation of metal forming processes. The proposed method is based on geometrical criteria and does not use the geometry of the forming tools. It is integrated in a computational environment using the ABAQUS solver. Numerical examples are given to show the efficiency of our approach. *To cite this article: L. Moreau et al., C. R. Mecanique 333 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Solides et structures ; Maillage adaptatif ; Raffinement et déaffinement de maillages ; Emboutissage ; Mise en forme ; Grandes déformations élastoplastiques

Keywords: Solids and structures; Adaptive meshing; Mesh refinement; Mesh derefinement; Deep-drawing; Forming; Finite elastoplastic deformation

Adresses e-mail : Laurence.Moreau@utt.fr (L. Moreau), Houman.Borouchaki@utt.fr (H. Borouchaki), Abdelhakim.Cherouat@utt.fr (A. Cherouat).

Abridged English version

During the numerical simulation of forming processes (stamping, hydroforming, bulging, etc), large plastic deformations imply important element distortion of initial mesh. It is then necessary to frequently remesh the part in order to be able to carry out the simulation and, in particular, to capture the geometrical details of surfaces under contact with forming tools. This remeshing procedure must be automatic and robust. Several remeshing methods have been proposed during the last years. The remeshing techniques presented by Zienkiewicz et al. [1], Fourment et al. [2], Coorevits et al. [3], Coupeuz [4], Borouchaki et al. [5] are based on the computation of a size map to govern a global remeshing of the part at each iteration. This kind of approach needs the knowledge of the geometry of forming tools. Cho and Yang [6] have proposed a refinement algorithm which consists in splitting each deformed element in two elements along an edge. This procedure leads to the creation of small edges and consequently degenerate elements during repetitive refinement iterations. Otherwise, refinement methods only based on edge bisecting (see for example [7] or [9]) lead to the creation of small edges or poor shaped elements.

This Note presents a novel remeshing technique based on geometrical criteria. It is applied to computational domain after each small displacement step of forming tools. It allows, in particular, to refine the current mesh of the part under the numerical simulation of the forming process in the curved area with preserving shape quality element, and to coarsen this mesh in the flat area. The mesh refinement is necessary to avoid large element distortions during the deformation. It ensures the convergence of the computation and allows an adequate representation of the geometry of the deformed domain. Moreover, thanks to the refinement procedure, the mechanical fields are simply induced in the new mesh. One of the major advantage of our approach is that the remeshing is applied without the knowledge of the forming tools under contact with the part. Two application examples are presented in order to show the efficiency of our remeshing technique.

1. Introduction

Au cours des simulations numériques des procédés de mise en forme (emboutissage, hydroformage, gonflement hydraulique, etc), les grandes déformations mises en jeu font que le maillage initial subit de fortes distorsions. Il est alors nécessaire de remailler continuellement la pièce afin de pouvoir continuer la simulation et, en particulier, capturer les détails géométriques des surfaces en contact. Cette procédure de remaillage doit être automatique et robuste. Ces dernières années, plusieurs méthodes de remaillage ont été proposées. Les techniques de remaillages présentées par Zienkiewicz et al. [1], Fourment et al. [2], Coorevits et al. [3], Coupeuz [4], Borouchaki et al. [5] sont basées sur le calcul d'une carte de taille pour un remaillage adaptatif global de la pièce à chaque itération. Ce genre de technique nécessite la connaissance a priori de la géométrie des outils de mise en forme. Cho et Yang [6] ont proposé un algorithme de raffinement consistant à partager chaque triangle à raffiner en deux. Cette procédure entraîne la création des petites arêtes et par suite des triangles dégénérés au cours des itérations répétitives de raffinement. Par ailleurs, toutes autres méthodes similaires de raffinement (par exemple [7] ou [9]) basées uniquement sur le cassage des arêtes aboutissent à la formation de petites arêtes ou d'éléments de mauvaises qualité en forme.

Dans cette Note, une nouvelle technique de remaillage basée sur des critères géométriques est introduite. Elle est appliquée au domaine en cours de déformation après chaque petit pas de déplacement des outils mobiles. Elle permet, en particulier :

- de raffiner le maillage courant de la pièce au cours de la simulation numérique du procédé de mise en forme dans les zones devenues courbes tout en préservant la qualité du maillage avant le raffinement,
- de déraffiner ce même maillage dans les zones redevenues plates.

L'enrichissement du maillage (ici par raffinement) est nécessaire pour éviter les distorsions importantes d'éléments au cours de la déformation. Il garantit la convergence du calcul et permet le respect de la géométrie du domaine

(en contact avec les outils) en cours de déformation. Par ailleurs, grâce à la procédure de raffinement, les champs mécaniques sont simplement induits dans le nouveau maillage. La méthode de raffinement introduite ressemble à celle proposée par Meinders [8] (dans le cas d'un maillage triangulaire) mais produit un nombre moins important d'éléments. L'un des avantages majeurs de notre approche est que le remaillage est appliqué sans la connaissance de la géométrie des outils qui viennent en contact avec la pièce. Deux exemples d'applications sont présentés afin de montrer la pertinence de la méthode.

2. Schéma de résolution

La simulation du procédé de mise en forme est basée sur un processus itératif. Dans un premier temps, un maillage initial grossier de la pièce (tôle mince) est généré avec des éléments triangulaires ou quadrangulaires. Puis, à chaque itération, un calcul par éléments finis est effectué afin de simuler numériquement le procédé de mise en forme pour un petit pas de déplacement de l'outil (ou une petite pression dans le cas par exemple d'un gonflement hydraulique). Afin de contrôler la distorsion des éléments du maillage de la pièce, ce pas de déplacement de l'outil est calculé en fonction de la taille minimale d'éléments du maillage courant de la pièce. Le maillage de la surface résultante de chaque itération est analysé au voisinage des sommets qui ont été déplacés. Le maillage est alors déraffiné localement dans les zones plates et est raffiné localement dans les zones anguleuses. Le déraffinement (resp. raffinement) est appliqué si la taille maximale (resp. minimale) d'éléments n'est pas atteinte. Les champs mécaniques sont moyennés dans les zones déraffinées (i.e. un nouvel élément hérite de la moyenne des champs des anciens éléments dont il est issu) et sont simplement induits dans les zones raffinées. Le procédé est itéré tant que le déplacement final de l'outil n'est pas atteint.

La convergence d'un tel schéma repose principalement sur les techniques de déraffinement et de raffinement du maillage. En particulier, le raffinement appliqué ne doit pas introduire une distorsion dans le maillage (qui peut être amplifiée au cours des itérations).

3. Remaillage adaptatif

Le remaillage adaptatif consiste à adapter le maillage à la géométrie de la surface courante de la pièce en cours de déformation. En d'autres termes, les zones plates et anguleuses devront être identifiées et respectivement déraffinées et raffinées (si possible). Par la suite, dans l'ordre, les procédés de raffinement et de déraffinement du maillage sont détaillés, le critère géométrique d'identification des zones plates et anguleuses est décrit et le schéma général du remaillage adaptatif est illustré.

3.1. Raffinement et déraffinement du maillage

Le raffinement consiste à subdiviser certains éléments du maillage, précisément ceux qui se trouvent dans les zones courbes. Il existe une seule subdivision d'élément qui préserve la qualité en forme d'élément. Il s'agit du découpage uniforme en quatre. Dans le cas d'un triangle, trois nouveaux sommets sont rajoutés au milieu des arêtes et dans le cas d'un quadrilatère, cinq nouveaux sommets, quatre au milieu des arêtes et un au barycentre (Fig. 1).



Fig. 1. Raffinement d'éléments.

Fig. 1. Elements refinement.

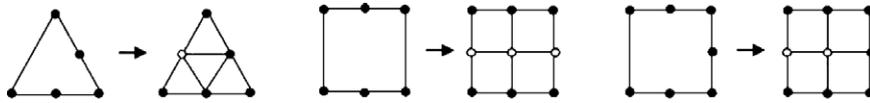


Fig. 2. Raffinement d'éléments et conformité.

Fig. 2. Elements refinement and conformity.

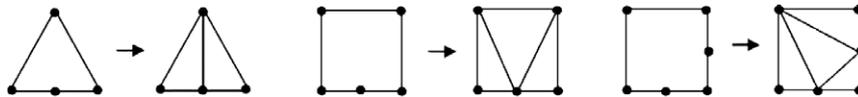


Fig. 3. Conformité pour le calcul.

Fig. 3. Conformity for computation.

Le raffinement appliqué à un élément influence ses éléments adjacents. En effet, comme les arêtes de l'élément subdivisé sont coupées en deux, un sommet se trouve sur les arêtes partageant les éléments adjacents rendant ainsi le maillage non conforme. Pour rétablir la conformité du maillage, les éléments adjacents devront aussi être subdivisés. Cette subdivision ne peut être un découpage à quatre car elle entraîne le découpage (systématique) de tous les éléments du maillage. En appliquant la subdivision à tous les éléments « courbes » du maillage, trois cas sont possibles pour les éléments non subdivisés :

- toutes les arêtes sont saturées,
- aucune des arêtes n'est saturée (i.e. ne possède un nouveau sommet),
- une seule arête ou deux arêtes non adjacentes ne sont pas saturées,
- deux arêtes adjacentes ne sont pas saturées.

Suivant les cas mentionnés, une subdivision éventuelle est appliquée aux éléments non « courbes » afin de garantir la conformité du maillage. Dans le premier, l'élément est naturellement subdivisé en quatre. Dans le deuxième cas, l'élément n'est pas subdivisé. Dans le troisième cas, toutes les subdivisions possibles (sans ajout d'autres sommets) entraînent la formation d'éléments de qualité en forme médiocre (éléments étirés). Il convient alors dans ce cas d'appliquer la subdivision en quatre par ajout de sommets supplémentaires (Fig. 2). Dans le dernier cas, l'élément est considéré saturé et aucune subdivision n'est appliquée. Ces éléments constituent la limite de la propagation du raffinement et leur présence garantit l'arrêt et la convergence de la propagation. Par ailleurs, comme l'ajout de sommets supplémentaires durant le raffinement influence les éléments voisins, l'opération de subdivision est itérée tant que des sommets supplémentaires sont ajoutés au maillage.

En pratique (et sur le plan algorithmique), le maillage est composé de deux types d'élément : ordinaire et extraordinaire. Un élément ordinaire est un triangle ou un quadrilatère. Un élément extraordinaire est un élément saturé. L'algorithme de raffinement prend en compte ses deux types d'élément. Le maillage résultant est transformé au niveau des éléments extraordinaires pour le calcul par éléments finis : un triangle extraordinaire est coupé en deux, tandis qu'un quadrilatère extraordinaire est coupé en trois ou quatre triangles (Fig. 3). Ce découpage est uniquement utilisé pour assurer la conformité du maillage pour le calcul.

Le déraffinement représente l'opération inverse du découpage d'éléments en quatre. Il peut être ainsi appliqué seulement à un groupement de quatre éléments ordinaires, que l'on désigne par éléments associés, issus du raffinement d'un élément pour restorer l'élément initial et dans la mesure où la zone couverte par les éléments est redevenue plate. En pratique, afin de localiser rapidement le groupement de quatre éléments associés issus d'un raffinement, il convient de considérer une structure d'arborescence quaternaire pour définir le maillage de la pièce. Chaque nœud de l'arbre représente donc un élément du maillage initial, les branches sont les éléments intermédiaires formés au cours des raffinements et les feuilles sont les éléments du maillage courant (et sont regroupés par

quatre par construction). Ainsi le déraffinement est appliqué uniquement aux feuilles du même niveau composés d'éléments ordinaires. Comme dans le cas du raffinement, pour garantir la conformité du maillage avec des éléments ordinaires (n'ayant aucune arête saturée) et des éléments extraordinaires (possédant une seule arête saturée), certaines zones déraffinées devront éventuellement être à nouveau raffinées. Comme cette dernière opération ne peut être appliquée qu'avec la connaissance globale du maillage après le déraffinement, elle ne peut être prise en compte localement afin d'éviter un déraffinement et un raffinement dans la même zone.

3.2. Critère géométrique d'identification de zone

Dans le cas du raffinement, la zone est constituée d'un seul élément. Pour tester si l'élément est « courbé », il suffit de considérer l'écart angulaire maximal entre la normale à l'élément et la normale aux sommets de l'élément. Ainsi, si cet écart est plus grand qu'un seuil donné (par exemple 10 degré), l'élément est considéré courbé. La normale à un sommet peut être définie comme une moyenne des normales aux éléments partageant le sommet. La normale à un élément selon sa forme et son type peut être définie comme :

- la normale à son plan support, pour un triangle ordinaire,
- la moyenne des normales aux plans supports des deux triangles issus de sa subdivision en deux à partir de son arête saturée, pour un triangle extraordinaire,
- la moyenne des normales aux plans supports des quatre triangles définis par son barycentre et ses quatre arêtes, pour un quadrilatère ordinaire,
- la moyenne des normales aux plans supports des trois triangles issus de sa subdivision en trois à partir de son arête saturée, pour un quadrilatère extraordinaire.

Dans le cas du déraffinement, la zone est constituée de quatre éléments. Pour tester si la zone est plate, il suffit de considérer l'élément formé par les quatre éléments constituant la zone et de vérifier si celui-ci est courbé. Si l'élément ainsi formé est courbé, le déraffinement ne peut être appliqué. Basé sur un même critère géométrique (test de courbure pour un élément) les procédés de raffinement et de déraffinement sont cohérents.

3.3. Schéma global du remaillage adaptatif

Le procédé du remaillage adaptatif est appliqué au domaine en cours de déformation après chaque petit pas de déplacement des outils. Il est illustré par le schéma général donné dans le Tableau 1.

Notons que dans l'étape du raffinement, seuls les éléments qui ont été déformés (i.e. ayant un sommet qui a été déplacé par rapport à l'itération précédente) seront examinés. En effet, le maillage initial peut contenir des éléments courbes (relativement au critère géométrique pris en compte, en particulier pour le seuil angulaire spécifié) dus à la géométrie intrinsèque de la pièce, qui ne devront pas être raffinés. Le transfert de champs par moyennage consiste à moyenner les champs des quatre éléments associés et à l'affecter au nouvel élément formé (cas du déraffinement).

Tableau 1
Schéma du remaillage adaptatif

<p>Déraffinement appliqué au groupement de quatre éléments ordinaires associés situés dans des zones plates</p> <p>Etablissement de la conformité du maillage par raffinement itératif des éléments possédant une seule arête ou deux arêtes non adjacentes non saturées</p> <p>Transfert des champs mécaniques par moyennage aux nouveaux éléments</p> <p>Raffinement appliqué aux éléments ordinaires ou extraordinaires « déformés » situés dans des zones courbes</p> <p>Etablissement de la conformité du maillage par raffinement itératif des éléments possédant une seule arête ou deux arêtes non adjacentes non saturées</p> <p>Transfert des champs mécaniques par héritage aux nouveaux éléments</p>
--

Le transfert par héritage est tout simplement l'affectation du champ associé à l'élément aux quatre éléments issus du raffinement (cas du raffinement).

4. Exemples numériques

Deux exemples d'applications utilisant la technique de remaillage adaptatif proposée sont présentés. Le premier traite l'emboutissage d'une tôle très mince et le deuxième, l'écrasement d'une canette vide. Dans les deux cas, le solveur 3D ABAQUS/EXPLICIT en grandes déformations avec un contact surface-surface du type maître-esclave à pénalisation cinématique est utilisé. Le matériau considéré est en aluminium de comportement élastoplastique isotrope et de caractéristiques mécaniques : module de Young $E = 85\,000$ MPa, coefficient de Poisson $\nu = 0,3$, limite élastique $\sigma_e = 316$ MPa et ductilité $A = 25\%$.

4.1. Emboutissage d'une tôle très mince

On considère la mise en forme d'une tôle très mince ($150 \times 150 \times 0,2$ mm³) par emboutissage mécanique sous l'action d'un poinçon rigide animé d'un déplacement total de 33 mm effectué en 11 étapes de petit pas de déplacement de 3 mm. Le flan est guidé au cours de la mise en forme par une matrice fixe et un serre-flan exerçant une force de 25 000 N. Le frottement flan-outils rigides est du type Coulomb avec un coefficient de frottement de $\mu = 0,15$. Le flan est initialement maillé avec 144 éléments triangulaires.

Après chaque étape du petit pas de déplacement du poinçon le remaillage (déaffinement et raffinement) est appliqué avec un seuil angulaire de 8 degré et une taille minimale de maillage de 0,75 mm. La Fig. 4 montre quelques étapes correspondant aux déplacements du poinçon de 3, 12, 21 et 33 mm. Sur cette figure, on peut constater les zones de raffinement du maillage de la pièce qui correspondent d'une part, aux courbures du poinçon et, d'autre part, aux ondulations de la tôle très mince due à son avalement par le poinçon. En outre, le maillage a été déaffiné dans les zones redevenues plates au cours de la simulation (bords de la boîte carée). Notons que le maillage final de la tôle déformée (correspondant à un pas de déplacement du poinçon de 33 mm) contient 38 901 éléments.

Nous avons comparé notre approche avec celle proposée par Meinders [8] qui présente une méthode de raffinement semblable :

- le maillage initial utilisé par Meinders est plus fin que le notre car le pas de déplacement appliqué aux outils est plus grand et dépend fortement de la géométrie des outils,
- la propagation du raffinement pour assurer la conformité du maillage est plus importante dans l'approche de Meinders,
- les zones raffinées restent fines dans le maillage (même si elles sont devenues plates) à cause du manque de déaffinement dans l'approche de Meinders,
- enfin, comme des grands pas de déplacement sont appliqués aux outils (à chaque itération du raffinement), les points de raffinement sont projetés sur la surface des outils, ce qui nécessite la connaissance préalable de leurs géométries.

En conclusion, nous avons obtenu une forme finale et une distribution des déformations plastiques dans l'épaisseur presque identiques, mais avec un nombre beaucoup moins important d'éléments.

4.2. Ecrasement d'une canette vide

Dans cet exemple, on traite le problème d'écrasement d'une canette vide par deux charges linéiques uniformes diamétralement opposées. Cet exemple constitue l'un des tests les plus sévères pour étudier la capacité de la

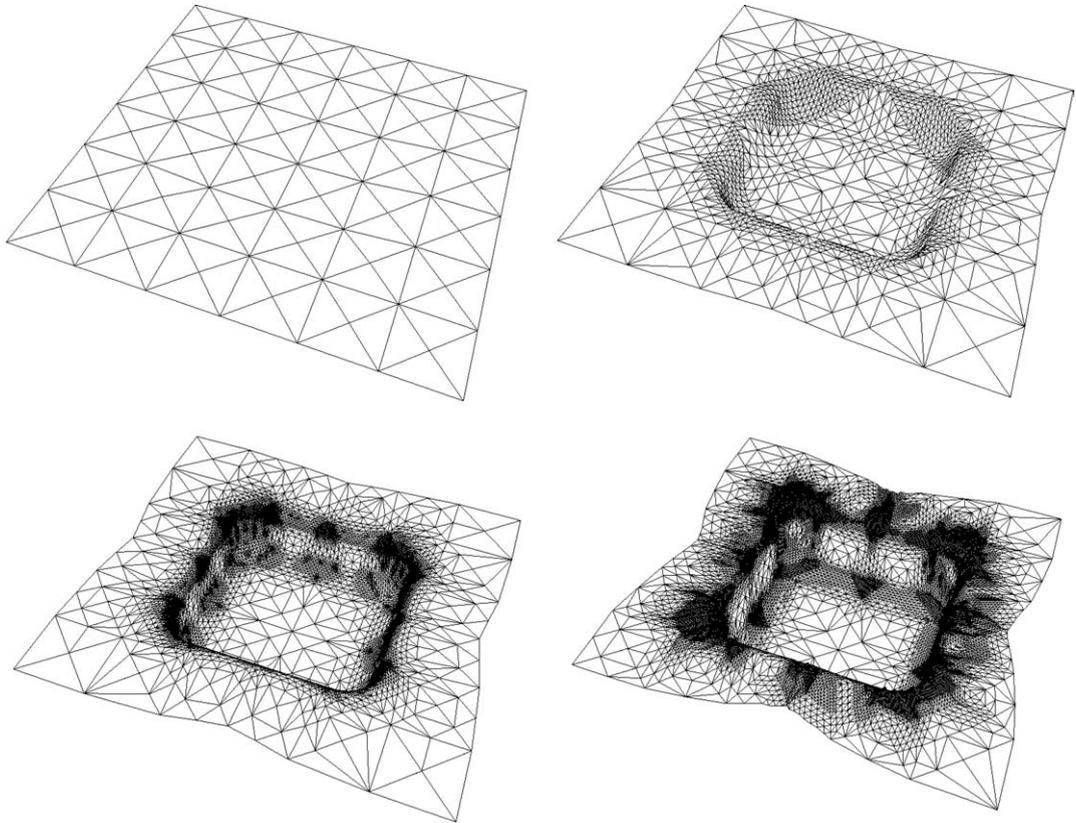


Fig. 4. Maillages au déplacement du poinçon de 3, 12, 21 et 33 mm.

Fig. 4. Meshes at punch displacement of 3, 12, 21 and 33 mm.

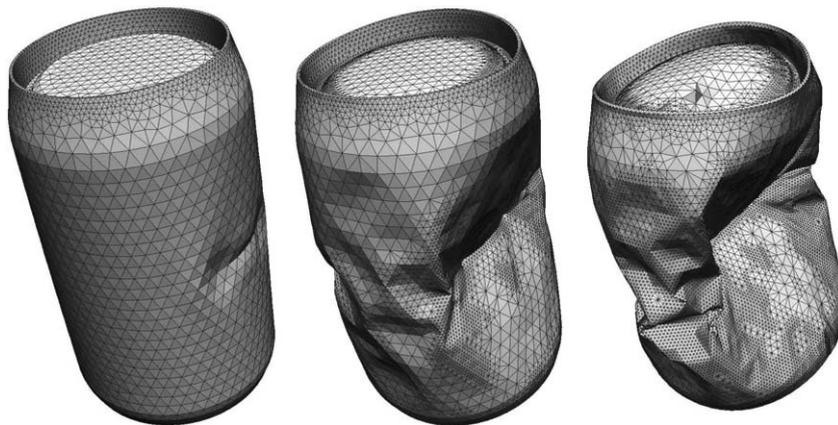


Fig. 5. Ecrasement d'une canette vide par remaillages adaptatifs.

Fig. 5. Crushing an empty can using adaptive remeshing.

technique de remaillage en grandes déformations géométriques. La canette de forme cylindrique a une longueur $L = 140$ mm, un rayon $R = 22$ mm et une épaisseur $e = 0,5$ mm. Elle est maillée initialement avec 7332 éléments triangulaires. La Fig. 5 montrent quelques configurations de la canette au cours de l'écrasement. En particulier, on peut constater l'adaptation des maillages aux très fortes déformations de la géométrie de la canette. Le maillage final de la canette comprend 41 734 éléments.

5. Conclusion et perspectives

Dans cette note, une méthode simple de remaillage adaptatif pour la mise en forme des tôles minces est proposée. La méthode utilise une technique particulière de raffinement et de déraffinement de maillages. Elle peut être appliquée aux maillages triangulaires et/ou rectangulaires. Elle a été implémentée et testée sur divers exemples d'application en grandes déformations géométriques. Les résultats obtenus montrent la pertinence de cette technique.

Comme suites et compléments de cette étude, les points suivants restent à aborder :

- validation sur des exemples industriels,
- prise en compte de critères physiques dans les procédures de raffinement et de déraffinement,
- transfert sous contraintes (relation d'équilibre en particulier) des champs mécaniques,
- extension à la mise en forme de structures massives.

Références

- [1] O.C. Zienkiewicz, J.Z. Zhu, Adaptivity and mesh generation, *Int. J. Numer. Methods Engrg.* 32 (1991) 783–810.
- [2] L. Fourment, J.L. Chenot, Adaptive remeshing and error control for forming processes, *Rev. Euro. Élé. Finis* 3 (2) (1994) 247–279.
- [3] P. Coorevits, J.P. Dumeau, J.P. Pelle, Analyses éléments finis adaptatives pour les structure tridimensionnelles en élasticité, *Rev. Euro. Élé. Finis* 5 (3) (1996) 341–373.
- [4] T. Coupez, Génération de maillage et adaptation de maillage par optimisation locale, *Rev. Euro. Élé. Finis* 9 (4) (2000) 403–422.
- [5] H. Borouchaki, A. Cherouat, P. Laug, K. Saanouni, Adaptive remeshing for ductile fracture prediction in metal forming, *C. R. Mécanique* 330 (2002) 709–716.
- [6] J.W. Cho, D.Y. Yang, A mesh refinement scheme for sheet metal forming analysis, in: *Proc. of the 5th International Conference, NUMISHEET02*, 2002, pp. 307–312.
- [7] M.C. Rivara, Local modification of meshes for adaptive and/or Multigrid finite-element methods, *J. Comput. App. Math.* 36 (1991) 79–89.
- [8] T. Meinders, Developments in numerical simulations of the real life deep drawing process, Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, Ponsen & Looijen Wageningen (publ.), ISBN 90-36514002, 2000.
- [9] E. Bansch, Local mesh refinement in 2 and 3 dimensions, *Impact Comput. Sci. Engrg.* 3 (1991) 181–191.