HAL open science

Remaillage surfacique 3D couplé à une nouvelle technique de projection

Laurence Giraud-Moreau, Houman Borouchaki, Abdelhakim Cherouat

To cite this version:

Laurence Giraud-Moreau, Houman Borouchaki, Abdelhakim Cherouat. Remaillage surfacique 3D couplé à une nouvelle technique de projection. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01408404

HAL Id: hal-01408404

https://hal.science/hal-01408404

Submitted on 4 Dec 2016

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Remaillage surfacique 3D couplé à une nouvelle technique de projection

L. Giraud-Moreau, H. Borouchaki, A. Cherouat

Institut Charles Delaunay, FRE CNRS 2848
Université de Technologie de Troyes
12 rue Marie Curie – BP 2060
10010 Troyes Cedex - FRANCE
{laurence.moreau,houman.borouchaki,abdelhakim.cherouat}@utt.fr

1 Résumé

Résumé – Dés qu'il s'agit de modéliser le suivi d'une géométrie évolutive lors d'une opération de mise en forme, les difficultés de maillage et remaillage sont souvent mises en avant. Dans ce papier, nous présentons une stratégie de remaillage adaptatif basée sur des procédures de raffinement et déraffinement. Cette méthode a été couplée à une technique de projection des nouveaux nœuds sur les outils rigides afin de conserver le contact entre la pièce et ces outils. Des exemples numériques montrent l'efficacité de la méthode.

Mots clés – Remaillage adaptatif, projection, mise en forme.

2 Introduction

Dés qu'il s'agit de modéliser le suivi d'une singularité par éléments finis sur une géométrie évolutive, les difficultés de maillage et remaillage sont souvent mises en avant. En effet, au cours des simulations numériques des procédés de mise en forme, 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 capturer les détails géométriques des surfaces en contact, adapter la taille du maillage à la nature de la solution du problème (plasticité, endommagement…) et surtout pouvoir effectuer la simulation jusqu'à la fin du procédé de mise en forme. Cette procédure de remaillage doit être automatique et robuste.

En outre, en plus des aspects liés à la physique du problème, une bonne gestion du contact entre la pièce et les outils doit être réalisée. En effet, au cours des simulations de mise en forme, la déformation s'effectue par contact entre la pièce et les outils rigides. Il est alors indispensable lors de l'opération de remaillage de la pièce, que les nouveaux nœuds créés sur la pièce soient bien compris entre ces outils rigides.

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], Borouchaki *et al* [4], sont basées sur le calcul d'une carte de taille et nécessitent un remaillage total de la pièce à chaque itération. Ce remaillage total n'est pas adapté dans le cas de simulations numériques de mise en forme car la pièce déformée est ici comprise entre des outils rigides mobiles. Afin de simuler la mise en forme des matériaux en trois dimensions, Kubli et Reissner [5] ont introduit un schéma de remaillage adaptatif utilisé dans le logiciel AUTOFORM. Cette technique de remaillage, comme celle de plusieurs autres programmes commerciaux, est basée sur le partage des triangles en quatre et l'introduction de nœuds milieux contraints. L'inconvénient du nœud milieu contraint est de rendre la convergence très difficile.

Cho et Yang [6], ont proposé un algorithme de raffinement consistant à partager chaque triangle à raffiner en deux. Cette procédure conduit à la génération d'éléments très étirés.

Ce papier présente une méthode de remaillage adaptatif basée sur des critères géométriques et physiques, permettant de raffiner et déraffiner le maillage de la pièce au cours de la simulation numérique du procédé de mise en forme en trois dimensions. L'originalité de la méthode de remaillage présentée ici, comparée aux stratégies présentées précédemment par les auteurs de ce papier [7, 8] réside dans la création des nouveaux nœuds, obtenus par projection sur la surface de l'outil rigide. La méthode de remaillage adaptatif, couplée à cette méthode de projection, a été interfacée avec le logiciel E.F. Abaqus/explicit et a permis d'effectuer plusieurs simulations de mise en forme de tôle en trois dimensions. Deux exemples d'application sont présentés afin de montrer la pertinence de la méthode

3 Schéma de résolution

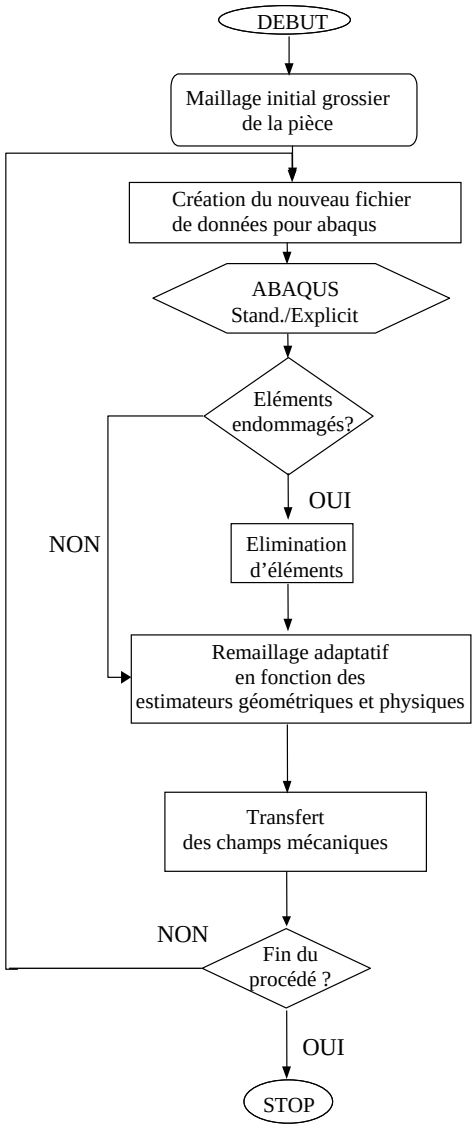


Figure 1 – Schéma de résolution du problème de mise en forme

La simulation du procédé de mise en forme est ici basée sur un processus itératif. Dans un premier temps, un maillage initial grossier de la pièce (tôle mince) est généré avec des

éléments triangulaires et/ou quadrangulaires. Puis, à chaque itération, un calcul Eléments Finis avec ABAQUS est effectué afin de simuler numériquement le procédé de mise en forme pour un petit incrément de déplacement de l'outil.

Le remaillage commence par une analyse de l'endommagement au point de Gauss de chaque élément du maillage de la pièce afin de détecter les éléments totalement endommagés. Les éléments totalement endommagés (pour lesquels la variable d'endommagement dépasse une valeur critique donnée) sont alors éliminés du maillage. Une condition essentielle sur la taille des éléments a été ajoutée pour pouvoir supprimer des éléments : seuls les éléments totalement endommagés, *ayant atteint la taille minimale de taille*, peuvent être éliminés du maillage. Cette suppression d'éléments permet ainsi de simuler l'amorce de rupture.

La surface résultante de chaque itération est ensuite analysée via des estimateurs d'erreurs géométriques et physiques. Le maillage est raffiné et/ou déraffiné en fonction des cartes de taille générées par ces estimateurs d'erreur.

Grâce à cette procédure de raffinement/déraffinement, les champs mécaniques sont simplement induits dans le nouveau maillage. 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 déraffinées.

Le critère d'arrêt du processus itératif est associé à la fin du procédé de mise en forme.

4 Estimateurs d'erreur

4.1 Estimateur d'erreur géométrique

Au cours du remaillage de la pièce, un estimateur d'erreur géométrique est utilisé afin de pouvoir déraffiner ce maillage dans les zones devenues planes au cours de la simulation numérique, puis raffiner ce maillage au voisinage des sommets anguleux. L'estimateur d'erreur géométrique est basé sur l'analyse de la courbure locale sous-jacente à la surface de la pièce au cours de la déformation.

Dans le cas du raffinement, un élément est considéré comme « courbé » si l'écart angulaire maximal entre la normale à cet élément et la normale aux sommets de l'élément est plus grand qu'un seuil donné. Tout élément détecté comme « courbé » doit être raffiné.

Dans le cas du déraffinement, la zone analysée est constituée de quatre éléments. Pour tester si cette zone est devenue plate, il suffit de considérer l'élément formé par les quatres éléments constituant la zone et de vérifier si celui-ci est courbé.

4.2 Estimateur d'erreur physique

Un estimateur d'erreur physique est de plus utilisé afin d'adapter la taille du maillage à la nature de la solution mécanique du problème. Une carte de taille physique est définie à partir des valeurs de un ou plusieurs champs mécaniques. Dans ce papier, l'endommagement ductile (défini au point de Gauss de chaque élément par une valeur réelle entre 0 et 1) a été choisi afin de définir la carte de taille physique. On définit pour chaque élément du maillage une taille physique à atteindre (h_D) en fonction de la valeur de l'endommagement à son point de Gauss. Cette taille physique correspond à la taille minimale pour un élément totalement endommagé (D=1), et la taille maximale pour un élément dans lequel l'endommagement est nul (D=0). Une valeur critique Dc (ex : Dc=0.8) a de plus été ajoutée, valeur à partir de laquelle l'élément doit prendre la taille minimale. Pour tous les autres éléments, une variation linéaire de taille entre la taille maximale et la taille minimale a été utilisée.

L'estimateur d'erreur utilisé est alors basé sur le rapport entre la taille moyenne de chaque élément ($\bar{h}$) et sa taille physique à atteindre (h_D). Si ce rapport ($\bar{h}/h_D$) est plus grand qu'un critère donné, l'élément doit être raffiné. Le raffinement est alors répété tant que la taille physique n'est pas atteinte.

5 Remaillage adaptatif

5.1 Schéma de remaillage basé sur des techniques de raffinement et déraffinement

Le remaillage adaptatif consiste à partir de techniques de raffinement et déraffinement à adapter le maillage de la pièce à la géométrie courante et à la nature de la solution mécanique de la pièce en cours de déformation.

Le remaillage s'effectue en trois phases. Dans la première phase, le maillage est déraffiné dans les zones devenues planes au cours de la simulation numérique. Dans la deuxième phase, le maillage est raffiné au voisinage des sommets anguleux, en utilisant l'estimateur d'erreur géométrique. Dans la dernière phase de remaillage, le maillage de la pièce est raffiné en fonction de la carte de taille physique (obtenue grâce à l'estimateur d'erreur physique), l'objectif étant ici d'adapter le maillage à la solution physique.

La méthode de raffinement utilisée consiste à subdiviser certains éléments du maillage, précisément ceux qui se trouvent dans des zones courbes (estimateur géométrique) ou ceux dont la taille moyenne est supérieure à la taille physique à atteindre (estimateur physique). Il existe une seule subdivision d'éléments qui préserve la qualité en forme d'éléments, il s'agit du découpage uniforme en quatre. Tout triangle ou quadrilatère du maillage devant être raffiné est alors subdivisé en quatre éléments. Un nœud est alors ajouté au milieu de chaque arête de cet élément. Le raffinement ainsi appliqué influence les éléments adjacents aux éléments raffinés et le maillage de la pièce peut ne plus être conforme. Une procédure de raffinement itératif consistant à subdiviser les éléments adjacents en 2 ou 3 avait été développée afin de rendre le maillage à nouveau conforme. Les détails de la méthode de raffinement ont déjà été développés dans [7,8].

La méthode de déraffinement représente l'opération inverse du découpage d'éléments en quatre. Il ne peut être appliqué qu'à un groupement de quatre éléments, préalablement obtenus par une opération de raffinement. Le déraffinement consiste à restorer l'élément initial dans la mesure où la zone couverte par ces quatres éléments est devenue plate.

5.2 Projection des nouveaux nœuds sur les surfaces des outils rigides

Comme nous venons de le voir, au cours des phases de raffinement du maillage (suivant le critère géométrique ou physique) de nouveaux nœuds sont créés au milieu de chaque arête des éléments à raffiner. Or ces nouveaux nœuds, au milieu de l'arête, peuvent être à l'intérieur de l'outil rigide. En effet, au cours des simulations numériques de mise en forme, la déformation s'effectue par contact entre la pièce et des outils rigides. La pièce prend la forme de ces outils au cours de la déformation. Si un des nouveaux nœuds créés de la pièce se situe à l'intérieur de l'outil rigide, la simulation du procédé est stoppée. Une procédure de projection a donc été intégrée afin d'éviter ce phénomène. Chaque nouveau nœud créé au milieu d'une arête est analysé afin de savoir si celui-ci est à l'intérieur ou non de l'un des outils rigides. Si c'est le cas, il est alors projeté suivant la normale à l'arête de l'élément, sur la surface extérieur de l'outil.

6 Applications numériques

Le procédé d'emboutissage de tôle 3D (un benchmark de test pour le remaillage) sera présenté afin d'examiner les possibilités du modèle de Gurson pour prévoir l'apparition de dommage pendant le processus de mise enforme par emboutissage profond. Les éléments finis (triangles et quadrangles) sont du type coque isoparamétrique avec intégration réduite (S3R et S4R d'ABAQUS/EXPLICIT) avec la taille adaptative sont employés. Les outils (poinçon, matrice et serre-flan) sont modélisés par des surfaces rigides (voir Figure 2). La tôle endommageable est

définie par des coefficients matériels récapitulés dans le Tableau 1. Elle faut noter que le matériau utilisé présente un écrouissage non linéaire et un adoucissement induit par le dommage, la contrainte maximale est d'environ $\sigma_{eq} = 894\,\text{MPa}$ pour $\overline{\varepsilon}_p \approx 18.5\,\%$ tandis que la ductilité (contrainte en plastique à la rupture) est environ 29,5%. Les résultats pour différents étapes de remaillage sont donnés dans la Figure 3. On peut noter l'adaptation du maillage aux géométries et aux contours des outils d'une part et aux champs physiques d'autre part. Un endommagement significatif s'est produit au niveau du rayon matrice sur la partie croisée de la croix.

Tableau 1. Propriétés mécaniques du matériau

Epaisseur initiale	1mm
Module d'élasticité	E = 200.0 GPa et ν = 0.3
Ecrouissage $\sigma_y\left(\overline{\varepsilon}_p\right) = \sigma_e + K\overline{\varepsilon}_p^n$	n = 0.42 σ_e = 410.6 MPa K = 968.92 MPa
Paramètres d'endommagement	$q_1 = 1.5 \quad q_2 = 1. \quad q_3 = 2.25$ $f_f = 0.75 \quad f_c = 0.05 \quad \varepsilon_n = 0.25 \quad S_n = 0.15 \quad f_n = 0.03$

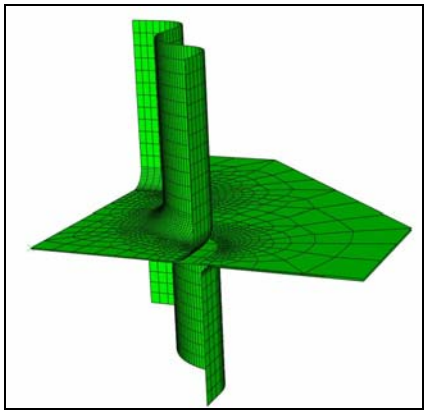
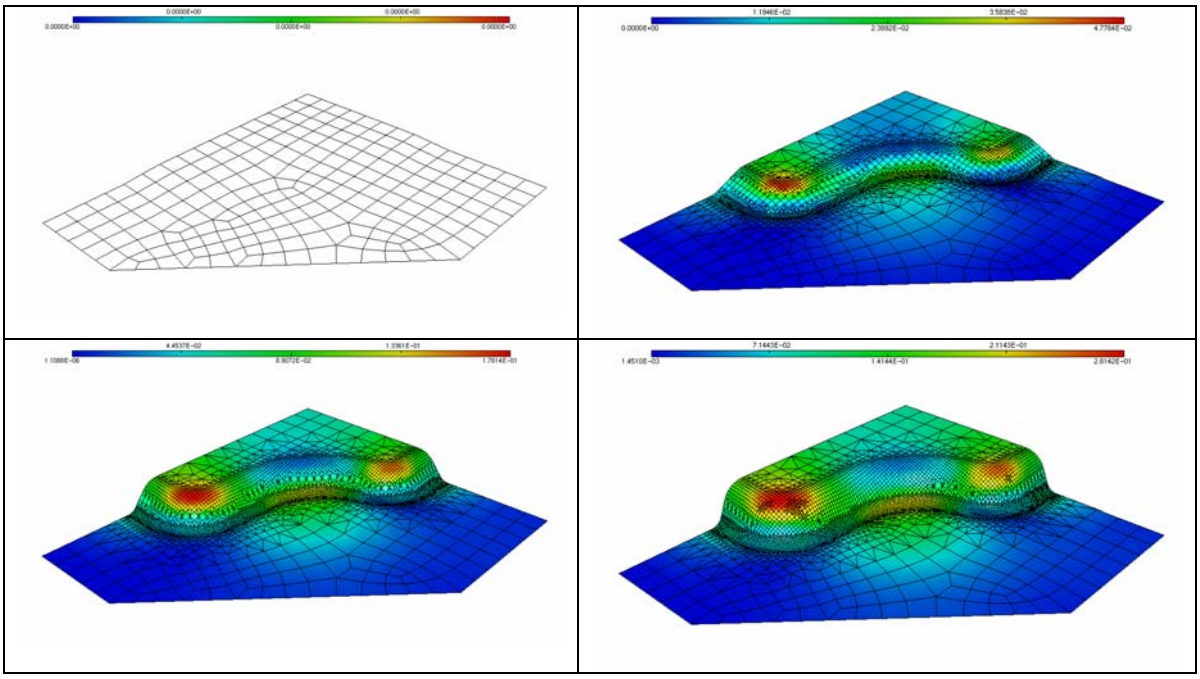


Figure 2 - Géométrie et maillage des outils de l'essai d'emboutissage



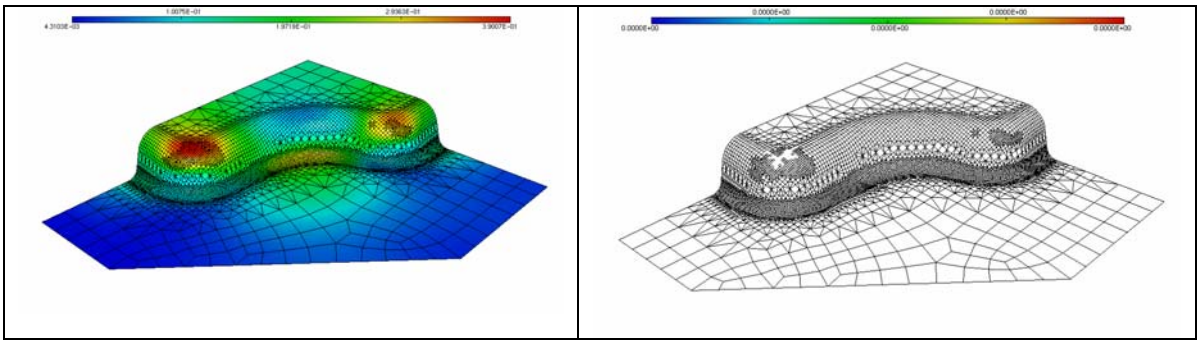


Figure 3 - Différentes étapes du remaillage avec iso-valeur de la déformation plastique

7 Conclusions

Dans ce papier, une stratégie de remaillage adaptatif pour la mise en forme des tôles minces a été proposée. Cette méthode utilise des techniques de raffinement et déraffinement de maillage et a été couplée à une procédure de projection des nouveaux nœuds créés sur les outils rigides. Ce couplage permet une meilleure gestion des problèmes de contact entre la pièce et l'outil. Les résultats numériques montrent l'efficacité du remaillage adaptatif. Cette méthode, actuellement développée dans le cas de mise en forme de tôles minces en 3D, sera dans la suite portée pour le cas de mise en forme de pièces massives en 3D.

Références

[1] O. C. Zienkiewicz, J. Z. Zhu, Adaptivity and mesh generation, *Int. J. Numer. Methods Eng.* Vol. **32**, page783- page 810, 1991.

[2] L. Fourment, J.-L. Chenot, Adaptive remeshing and error control for forming processes, *Revue européenne des éléments finis* Vol. **3**, 2, page247- page 279, 1994.

[3] P. Coorevits, J.P. Dumeau and J.P. Pelle, Analyses elements finis adaptatives pour les structures tridimensionnelles en élasticité, *Revue européenne des elements finis* 5 3, page341- page373, 2001.

[4] H. Borouchaki, D. Chapelle, P.L. George, P. Laug and J.P. Frey, Estimateurs d'erreur géométriques et adaptation de maillage, *Maillage et adaptation*, traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux, Méthodes numériques, Hermès, page279- page310, 2001.

[5] W. Kubli, J. Reissner, Optimization of sheet metal forming processes using the special purpose program AUTOFORM, *Proc. of the 2nd International Conference*, NUMISHEET'93, page271- page280, 1993.

[6] A. Cherouat, K. Saanouni, H. Borouchaki and P. Laug, Virtual metal forming with damage occurrence using adaptive remeshing, *International journal of forming processes*, vol 8, n°2-3, page311- page289, 2005.

[7] L. Giraud-Moreau, H. Borouchaki and A. Cherouat, Adaptive remeshing method based on refinement and coarsening techniques, *Proc. 10th ESAFORM Conference on Material Forming* , Espagne, 2007.

[8] L. Giraud-Moreau, H. Borouchaki and A. Cherouat, Sheet metal forming using adaptive remeshing, *Proc. of NUMIFORM'04*, Etats Unis, 2004.