



HAL
open science

Formulation ALE et remaillage adaptatif : application à la modélisation du fluotournage

Marie Houillon, Roland E. Logé, Eric Ramel, Elisabeth Massoni

► **To cite this version:**

Marie Houillon, Roland E. Logé, Eric Ramel, Elisabeth Massoni. Formulation ALE et remaillage adaptatif : application à la modélisation du fluotournage. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. <hal-01495602>

HAL Id: hal-01495602

<https://hal.science/hal-01495602v1>

Submitted on 25 Mar 2017

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 CC0 1.0 - Universal - International License

Formulation ALE et remaillage adaptatif : application à la modélisation du fluotournage.

Marie Houillon^{*}, Roland Logé^{*}, Eric Ramel^{**}, Elisabeth Massoni^{*}

^{*} CEMEF, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
2 Rue Claude Daunesse
06904 Sophia Antipolis Cedex
marie.houillon@ensmp.fr

^{**} CEA Valduc
21120 Is-sur-Tille

RESUME: Un modèle éléments finis de calcul thermomécanique 3D doté d'une formulation ALE est implémenté dans le logiciel Forge2005® afin de simuler le procédé de fluotournage. On s'attache, dans cette étude, à optimiser le maillage par une méthode adaptative utilisant l'estimateur d'erreur de Zienkiewicz-Zhu. L'utilisation de la méthode ALE s'adapte tout à fait au caractère incrémental du procédé et permet de prendre en charge les difficultés liées au contact pièce/outil. Associée à des cinématiques d'outil complexes, cette formulation permet d'obtenir des résultats réalistes et encourageants en ce qui concerne les temps de calcul.

ABSTRACT: A finite element model allowing thermo-mechanical calculation using an ALE formulation is implemented in Forge2005® to simulate flow forming process. The aim of this work is to optimize meshing with an adaptive method using Zienkiewicz-Zhu error estimation. The ALE method is well adapted to incremental forming processes such as flow forming and allows dealing with difficulties generated by the contact between work piece and tools. Coupled with complex tool kinematics, this formulation gives realistic and promising results with regard to computation time.

MOTS-CLES: fluotournage, éléments finis, ALE, estimation d'erreur, adaptivité

KEYWORDS: flow forming, finite element method, ALE, error estimate, adaptivity

1. Introduction

1.1. *Le modèle éléments finis*

Dans la modélisation par la méthode lagrangienne des procédés impliquant de grandes déformations tels que le fluotournage, on ne peut pas utiliser le même maillage tout au long du calcul. Il faut remailler régulièrement la pièce afin d'éviter la distorsion des éléments. Cependant l'étape de remaillage est très coûteuse et source d'imprécision lors du transport des variables de l'ancien vers le nouveau maillage. La formulation ALE (arbitrairement lagrangien eulérien) permet un compromis entre la formulation lagrangienne qui a tendance à dégénérer les maillages et la formulation eulérienne qui ne permet aucun mouvement du domaine. On évite la distorsion du maillage sans augmentation catastrophique du temps de calcul par un mouvement relatif possible du maillage par rapport à la matière.

Le code Forge2005® ALE utilise une approche découplée de la méthode ALE. Cela consiste à résoudre le problème par la formulation lagrangienne et procéder ensuite à une régularisation du maillage qui tend idéalement à préserver des formes optimales d'éléments, la connectivité des éléments restant inchangée. La vitesse du maillage est évaluée sur des critères propres à chaque problème. Cette dernière peut être nulle, égale ou différente de la vitesse de la matière. On utilise un estimateur d'erreur afin de déterminer la taille optimale des éléments constituant le domaine et indirectement la vitesse du maillage.

1.2. *Le procédé de fluotournage*

Le fluotournage est un procédé à caractère incrémental qui permet d'amincir les parois de pièces tubulaires. La pièce est fixée sur un mandrin en rotation. Une ou plusieurs molettes libres sur leur axe exercent une force sur la paroi de la pièce et sur toute sa longueur, ce qui entraîne un allongement de la pièce et un amincissement de sa paroi.

Jeswiet (Jeswiet *et al.*, 2005) soulignent les difficultés à modéliser un procédé tel que le fluotournage ou le formage incrémental : la zone de contact est très localisée, elle a une géométrie complexe, engendre des gradients thermomécaniques localement très importants et balaye une grande partie de la surface de la pièce. En effet, la zone de contact entre une molette et la pièce représente dans les cas que nous avons étudiés pas plus de 0.05% de la surface de la pièce qui sera travaillée, c'est-à-dire la surface potentiellement en contact avec la molette au cours de la passe complète de fluotournage.

Modéliser la déformation locale avec précision est un impératif afin que, après plusieurs passes de l'outil sur la même zone, l'erreur finale cumulée soit tolérable.

Pour cela, il faut un maillage fin sur la zone sollicitée et grossier sur le reste de la pièce. On doit raffiner et déraffiner constamment le maillage car cette zone sollicitée est en mouvement. Le déraffinement et le transport doivent être soignés car ils peuvent engendrer une perte ou une diffusion d'information.

2. La formulation ALE (Chenot *et al.*, 1995)

Le code Forge2005® utilise une méthode implicite avec une formulation mixte vitesse/pression. Le problème mécanique se résout à un incrément donné connaissant l'incrément précédent. Il s'écrit sous la forme compacte suivante :

$$R(X^{t+\Delta t}, V^{t+\Delta t}, P^{t+\Delta t}) = 0 \quad [1]$$

où $X^{t+\Delta t}$, $V^{t+\Delta t}$ et $P^{t+\Delta t}$ sont respectivement les coordonnées spatiales, la vitesse et la pression à l'incrément $t + \Delta t$.

On résout [1] par méthode itérative à partir de la connaissance que l'on a du domaine à l'incrément précédent. La formulation ALE ajoute à la forme classique lagrangienne le problème suivant écrit sous la forme compacte :

$$D(X^{t+\Delta t}, V^{t+\Delta t}, W^{t+\Delta t}) = 0, \text{ où } W^{t+\Delta t} \text{ est la vitesse du maillage.} \quad [2]$$

2.1. Les surfaces libres

Afin de respecter les conditions de surface libre, la vitesse normale du maillage est égale à la vitesse normale de la matière. Le problème est complexe lorsqu'il s'agit de conserver le volume et de respecter les géométries complexes du domaine au cours d'une régularisation ALE. En fluotournage, la surface en cours de déformation, en contact avec l'outil adopte une géométrie complexe. Un maillage fin et une bonne gestion du mouvement du maillage en surface sont nécessaires. L'algorithme que nous utilisons dans cette étude pour gérer les surfaces libres permet de prendre en compte les arêtes et sommets de la surface libre. (Guerdoux, 2006)

2.2. Adaptation sur estimation de l'erreur

Le principe de la formulation ALE est de mettre en œuvre une r-adaptation qui permet d'améliorer la solution en optimisant la position des nœuds dans le maillage sans en ajouter de nouveaux et sans modifier les connectivités. On est donc limité à un nombre de degrés de liberté qui n'évolue pas.

La technique d'adaptation implémentée dans le code Forge2005® ALE que nous présentons ici a été initialement utilisée par Boussetta (Boussetta, 2005). Elle consiste, dans ses travaux, à définir sur le domaine une carte de maille à partir de l'estimateur d'erreur de Zienkiewicz-Zhu (Zienkiewicz *et al.*, 1987) et qui est utilisée pour effectuer un remaillage adaptatif. Dans le code ALE, on utilise le même algorithme pour définir la taille optimale des éléments et indirectement la vitesse du maillage. Le remaillage adaptatif reste possible.

2.2.1. Stratégie d'optimisation du maillage

On utilise une stratégie d'optimisation par précision imposée par l'utilisateur. Cette stratégie établie par Coffignal (Coffignal, 1987) et Zienkiewicz (Zienkiewicz *et al.*, 1987) permet d'une part de réduire l'erreur globale du domaine et d'uniformiser l'erreur sur tous les éléments du domaine. On écrit la variation de taille d'un élément au cours d'un remaillage en fonction de l'erreur sur l'élément considéré et l'erreur globale que l'utilisateur tolère sur le domaine. Le rapport de variation de taille est utilisé en tant que coefficient C_e introduit dans un barycentrage géométrique effectué sur chaque nœud du domaine.

$$x = \frac{1}{|\Gamma_n|} \sum_{e \in \Gamma_n} C_e x_{g_e} \quad [3]$$

où Γ_n est le voisinage proche de l'élément e et x_{g_e} est le centre de la facette de l'élément voisin e .

Le coefficient contient non seulement un critère d'adaptation mais également, entre autres, un critère de qualité volumique afin de modérer la distorsion des éléments soumis au critère d'adaptation. La vitesse du maillage est obtenue simplement à partir des coordonnées lagrangiennes et celles des nœuds du maillage.

2.2.2. L'estimateur d'erreur de Zienkiewicz-Zhu

L'estimateur de Zienkiewicz et Zhu (Z^2) (Zienkiewicz *et al.*, 1987) est basé sur la construction d'une solution plus proche de la solution exacte que la solution éléments finis car étant d'ordre supérieur par rapport à la solution éléments finis. L'erreur est la différence entre cette solution et la solution éléments finis sur un élément. On exprime la solution en terme de norme de puissance :

$$\theta_e^{Z^2} = \left(\int_{\Omega_e} (\tilde{s} - s) : (\dot{\tilde{\epsilon}} - \dot{\epsilon}) d\omega \right)^{1/2} \quad [4]$$

La solution exacte est construite par recouvrement, dans notre cas par la technique SPR (Superconvergent Patch Recovery) (Boussetta, 2005).

3. Calcul numérique

Nous présentons un cas de fluotournage composé d'un tube fermé, d'un mandrin et de plusieurs molettes uniformément réparties autour de l'axe de rotation (voir figure 1). La cinématique des outils respecte le libre mouvement de rotation des molettes sur leurs axes propres car la vitesse de rotation propre des molettes est intégrée au calcul numérique en tant qu'inconnue.

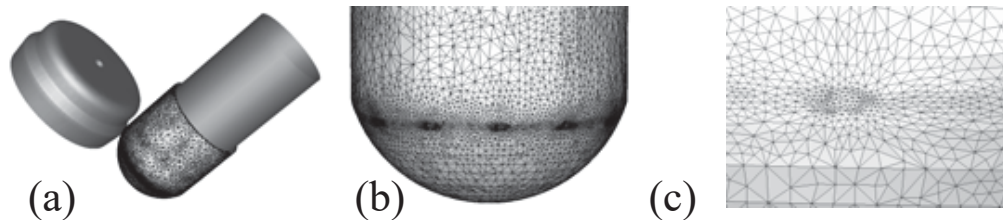


Figure 1. (a) Configuration de fluotournage comprenant un mandrin, une molette et une pièce. (b) Maillage de la pièce pour plusieurs molettes. (c) concentration des nœuds au contact avec une molette.

Les figures 1. (b) et (c) représentent les zones de contact de la pièce avec les molettes. Le maillage est raffiné sur les zones à fort gradient de puissance.

4. Résultats

En comparaison avec une méthode lagrangienne, la méthode ALE permet d'abord un gain de temps lié à la réduction du nombre d'éléments et à la diminution du nombre de remaillages. En effet, bien que l'on ajoute, à chaque incrément de temps, une étape de régularisation du maillage, le nombre d'éléments est optimisé. La figure 2 représente les zones de contact pièce/outil issues d'un calcul ALE sur cas plan, c'est à dire une molette qui roule sur un plan. Obtenir un résultat identique sur un cas lagrangien sans remaillage nécessite au moins 4 fois plus d'éléments et est 10 fois plus coûteux. La taille de maille est actuellement contrôlée uniquement par l'erreur de Z^2 . On constate en effet que le maillage est raffiné sur les nœuds présentant à la fois de forts gradients de contraintes de Von Mises et de vitesses de déformation.

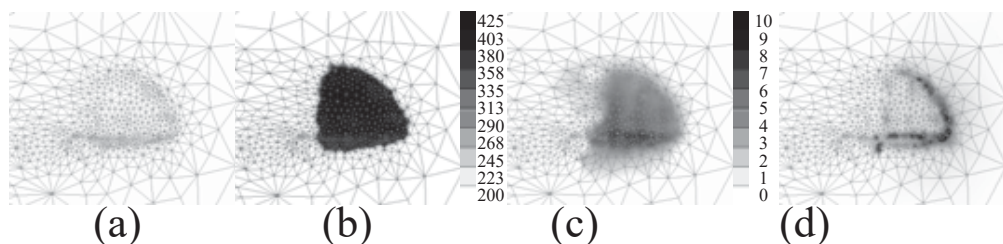


Figure 2. Zone de contact (a) maillage (b) contact avec outil (c) contraintes de Von Mises (d) vitesses de déformation

Cependant, en dehors des zones à forts gradients de puissance, l'estimateur d'erreur de Z^2 autorise une augmentation de la taille des éléments. Par exemple, le sillon créé par l'outil, dont la géométrie est complexe, ne présente pas de fort gradient de puissance et les éléments sont grossis sans respect de cette complexité. Par ailleurs, cette adaptation peut engendrer de forts gradients de taille d'éléments ce qui a pour conséquence de diffuser l'information.

5. Conclusion

L'utilisation de la formulation ALE pour la modélisation du fluotournage est tout à fait justifiée par le caractère incrémental que présente ce procédé de mise en forme. L'estimateur de Z^2 permet d'imposer un maillage fin sur la zone de contact entre la molette et la pièce c'est-à-dire sur la zone de la pièce où la déformation instantanée est la plus grande. En revanche, le code ne permet pas un maillage suffisamment fin sur ces surfaces à géométrie complexe et où l'estimateur de Z^2 ne prévoit pas de raffinement.

On propose pour perspectives de prendre en compte la complexité de la géométrie de la surface dans le calcul de la grille de taille de maille. Les surfaces libres seraient mieux respectées et le déraffinement moins sévère.

6. Bibliographie

- Boussetta R., Estimateurs d'erreur et remaillage adaptatif: application à la simulation 3D des procédés de mise en forme des matériaux, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005
- Chenot J-L., Bellet M., « The ALE method for the numerical simulation of material forming processes », *Simulation of Materials Processing : Theory, Methods and Applications*, 1995, p. 39-48.
- Coffignal G., Optimisation et fiabilité des calculs éléments finis en élastoplasticité, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 1987
- Guerdoux S., Rapports internes, 2006
- Jewiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Duflou J., Allwood J., « Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal », *55th general assembly of CIRP, Antalya, Turkey, Keynotes papers*, vol. 54, n°2, 2005, p. 623-649.
- Zienkiewicz O.C., Zhu J.Z., « A simple error estimator and adaptive procedure for practical engineering analysis », *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, 1987, p. 337-357