

DEVELOPPEMENT D'UN CODE DE CALCUL EXPLICITE "ALE": APPLICATION A LA COUPE DES METAUX

Olivier PANTALE, Roger RAKOTOMALALA, Serge CAPERAA

Laboratoire Génie de Production - CMAO - ENIT

47 Av d'Azereix - 65016 Tarbes Cedex

RESUME

Nous présentons ici le développement d'un code de calcul explicite. La formulation ALE en grandes transformations adoptée, associée à des algorithmes de comportement et de contact efficaces permettent d'obtenir un code dédié à la simulation de problèmes d'impacts, de forgeage ou de coupe. Seules les premières applications sont présentées ici, et les comparaisons avec des solutions de référence montrent un bon niveau de corrélation.

ABSTRACT

We present here an explicit finite element code development. The large strains ALE formulation associated to efficient constitutive and contact algorithms will allow us to obtain a finite element code suitable for modeling impacts, forging or cutting problems. Only very first results are presented in this paper, and comparisons with referential solutions gives a good level of agreement.

MOTS-CLES : code de calcul, explicite, coupe des métaux

I. INTRODUCTION

Les observations expérimentales généralement menées autour des activités liées à la coupe des métaux montrent que les phénomènes associés à la formation du copeau sont très complexes. De nombreuses recherches sur la simulation numérique de la coupe des métaux ont été menées ces dernières années et de nombreux modèles sont disponibles dans la littérature (Marusich 95, Childs 97, Pantalé 99). L'outil de coupe est sujet à la fois à de très fortes et très localisées pressions et températures, et l'influence de ces paramètres sur l'usure est un fait bien connu. Le but de notre étude est de développer un modèle numérique capable de fournir les contraintes et températures dans la zone de contact outil-copeau afin de déterminer l'évolution de l'usure de l'outil de coupe.

Ce travail est une continuité de précédents travaux concernant la simulation numérique de la coupe des métaux (Pantalé 96, Joyot 98, Pantalé 99). Les conclusions principales résultant de ces travaux antérieurs concernent la nécessité d'utiliser un code de dynamique rapide basé sur une formulation Arbitraire Lagrangienne Eulérienne (ALE) incluant plusieurs lois de comportement et de contact afin de modéliser au mieux les phénomènes sévères autour de la pointe

de l'outil. Une formulation purement Lagrangienne nécessite l'utilisation d'un algorithme de remaillage (notamment autour de la pointe de l'outil) pouvant nuire à la précision des résultats numériques.

II . LE CODE ELEMENTS FINIS

L'écriture de ce code de calcul (du nom de DynELA) est motivée par le fait de disposer au sein du laboratoire d'une plate-forme de développement permettant de servir de support de recherche pour de nouveaux algorithmes numériques dans le domaine des lois de comportement et de contact principalement. Il s'est en effet avéré nécessaire d'avoir à disposition un code de calcul entièrement ouvert et maîtrisé qui, même s'il ne peut "rivaliser" avec les codes de calcul industriels en matière de fonctionnalités ou de rapidité de calcul doit permettre une grande souplesse d'utilisation et de développement de nouvelles lois de comportement, contact ou algorithmes de résolution.

1 . Présentation

Le code de calcul DynELA est développé en C++ afin d'assurer une modularité optimale et la possibilité de faire un développement à plusieurs personnes (sans que celles-ci aient besoin de connaître la totalité du code source pour intervenir dans les modules qui leur sont dédiés). Un langage de commande a été spécialement développé afin de définir le modèle de calcul (maillage, conditions aux limites...), ainsi qu'un post-processeur graphique 3D pour l'exploitation des résultats. La version courante utilise une formulation purement Lagrangienne, la partie ALE est en cours de développement.

2 . Formulation mécanique

Schéma d'intégration explicite : DynELA utilise un schéma d'intégration explicite. Les quantités inconnues à l'instant $t + \Delta t$ sont déduites des quantités connues à l'instant t en fonction des lois de conservation décrites dans le paragraphe II.2. Afin d'améliorer la performance de l'algorithme d'intégration, on utilise le schéma de prédiction-corrrection défini par les relations ci-dessous:

$$\begin{cases} \rho_{t+\Delta t} = \rho_t + \dot{\rho}_t \Delta t \\ e_{t+\Delta t} = e_t + \dot{e}_t \Delta t \\ v_{t+\Delta t} = v_t + \frac{1}{2} (\dot{v}_t + \dot{v}_{t+\Delta t}) \Delta t \\ u_{t+\Delta t} = \Delta t v_t + \frac{1}{2} \dot{v}_{t+\Delta t} \Delta t^2 \end{cases}$$

Dans ces relations, la notation $\dot{()}$ désigne la dérivée par rapport au temps de la quantité $()$, ρ est la densité, e l'énergie interne, v la vitesse matérielle et u le déplacement matériel .

Lois de conservation : L'écriture des lois de conservation en ALE est déduite de l'écriture de ces mêmes lois en Lagrangien en introduisant la notion de vitesse convective \vec{c} définie par $c_i = v_i - \hat{v}_i$ avec v_i vitesse matérielle et \hat{v}_i vitesse de grille (Pantalé 96). Les formes matricielles correspondant aux équations de conservation sont alors données comme suit:

$$\begin{cases} \dot{\rho}_{t+\Delta t} = -(\mathbf{M}_t^\rho)^{-1} (\mathbf{N}_t^\rho \tilde{\rho}_{t+\Delta t} + \mathbf{K}_t^\rho \tilde{\rho}_{t+\Delta t}) \\ \dot{\tilde{e}}_{t+\Delta t} = (\mathbf{M}_t^e)^{-1} (\mathbf{r}_{t+\Delta t} - \mathbf{g}_t - \mathbf{N}_t^e \tilde{e}_{t+\Delta t}) \\ \dot{\tilde{v}}_{t+\Delta t} = (\mathbf{M}_t^v)^{-1} (\mathbf{f}_{t+\Delta t}^{ext} - \mathbf{f}_t^{int} - \mathbf{N}_t^v \tilde{v}_{t+\Delta t}) \end{cases}$$

Dans ces relations, les quantités $\tilde{\rho}_{t+\Delta t}$, $\tilde{e}_{t+\Delta t}$ et $\tilde{v}_{t+\Delta t}$ sont les valeurs prédites de la densité, l'énergie et la vitesse matérielle à l'instant $t + \Delta t$. Les quantités \mathbf{M}^α représentent les matrices de masse, les termes \mathbf{N}^α sont les termes de transport (où intervient la vitesse convective \vec{c}), \mathbf{K}^ρ est la matrice de rigidité, \mathbf{r} est la production interne de chaleur, \mathbf{g} est le vecteur de flux de chaleur, \mathbf{f}^{ext} et \mathbf{f}^{int} sont les vecteurs de forces externes (incluant les forces de contact) et internes appliqués à la structure.

Loi de comportement : Concernant la loi de comportement, le tenseur des contraintes de Cauchy $\boldsymbol{\sigma}$ est décomposé en une partie déviatrice \mathbf{S} et une partie sphérique p définies par la relation constitutive

$$\dot{S}_{ij} + c_k S_{ij,k} = C_{ijkl}^e v_{(k,l)} + S_{kj} v_{[i,k]} + S_{ki} v_{[j,k]} \quad (1)$$

et l'équation d'état

$$\mathbf{M}^p \dot{p} + \mathbf{N}^p p = P \quad (2)$$

respectivement. Dans ces deux équations P est la fonction d'état, $v_{(i,j)}$ et $v_{[i,j]}$ sont les parties symétrique et anti-symétrique du gradient des vitesses, \mathbf{M}^p et \mathbf{N}^p sont respectivement la matrice de masse et la matrice des termes convectifs et C_{ijkl}^e est le tenseur de comportement élastique du matériau donné par:

$$C_{ijkl}^e = 2\mu \left(\frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \quad (3)$$

où μ est un des deux coefficients de Lamé et δ le tenseur unité d'ordre 2.

Dans le cas où le matériau n'est pas purement élastique, on utilise un algorithme de retour radial pour évaluer la valeur du tenseur des contraintes de Cauchy à la fin de l'incrément, en fonction de la valeur du tenseur des contraintes prédit (de manière élastique). Cette méthode relativement simple à mettre en oeuvre, et applicable dans le cas 3D et le cas des déformations planes est actuellement utilisée dans DynELA. Dans un souci de généralisation et d'extension à l'intégration de la viscoplasticité (Ponthot 99), les développements actuels utilisent une méthode de "return mapping" et une plasticité de type J_2 pouvant prendre en compte à la fois l'écroutissage isotrope et cinématique (Simo 98).

Loi de contact : Le contact est défini par un couple de surfaces maître-esclave (dont la partie maître est rigide). Le développement d'un algorithme autorisant deux surfaces déformables est en cours. Le contact est traité de manière cinématique, par un algorithme corrigeant la valeur du vecteur d'accélération des noeuds en contact. La valeur de l'accélération prédite à partir de la loi de conservation de la quantité de mouvement ($\dot{\tilde{v}}_{t+\Delta t}$) est corrigée pour les noeuds de contact après avoir évalué la valeur de la force devant être appliquée au noeud par la relation $\vec{f}^e = f^n \cdot \vec{n} + \vec{f}^t$ dans laquelle la valeur de la composante normale est déduite de la valeur de la pénétration δ du noeud esclave dans la surface maître définie par:

$$f^n = m \cdot \frac{\delta}{\Delta t^2} \quad (4)$$

où m est la masse équivalente au noeud esclave et Δt l'incrément de temps. La valeur de la composante tangentielle \vec{f}^t est calculée en fonction de la loi de frottement. On peut alors déduire la valeur de l'accélération corrigée $\dot{v}_{t+\Delta t}$ du noeud par la relation:

$$\dot{v}_{t+\Delta t} = \dot{v}_{t+\Delta t} + 2 \frac{\vec{f}^e}{m} \quad (5)$$

Actuellement, seule une loi de contact de type Coulomb est implémentée dans le code de calcul. Les travaux actuels concernent la validation de la partie détection du contact (recherche des noeuds esclaves ayant pénétré la surface maître). En effet, il convient de disposer d'un algorithme robuste, précis et rapide pour effectuer cette opération qui reste très coûteuse en matière de temps de calcul et peut pénaliser lourdement une simulation si le nombre de noeuds de contact entre les deux pièces est important. Les priorités actuelles concernent donc l'optimisation de ces procédures de détection, pour lesquelles, il n'est pas utile de disposer d'une loi de contact raffinée.

III . APPLICATIONS

Nous ne présentons dans ce paragraphe que deux applications particulières, la première concerne un cas test de validation du code de calcul, la deuxième permet de montrer l'aptitude de l'algorithme de contact à gérer le décollement et le glissement relatif de deux surfaces en contact.

1 . Contact de Hertz

Le contact de Hertz est une application classique permettant de tester le bon fonctionnement de l'algorithme de contact d'un code de calcul. Le problème étudié ici concerne le contact entre deux cylindres de même diamètre le long d'une génératrice. Une solution de référence à ce type de problème peut être trouvée analytiquement ou numériquement dans le manuel du code de calcul Abaqus (Abaqus). Du fait de la symétrie, seul le quart d'un cylindre en contact avec une structure rigide plane est pris en compte ici.

Les cylindres ont un rayon de 254mm, ils sont élastiques de module de Young $E = 206GPa$ et de coefficient de Poisson $\nu = 0,3$. Les noeuds de la surface supérieure du cylindre subissent un déplacement vertical linéaire de 10,16mm pendant une durée de 0,01s afin d'obtenir une compression quasi-statique. La figure 1 montre la répartition des contraintes de Von-Mises dans le cylindre calculée par DynELA et Abaqus. Une comparaison des valeurs numériques en contraintes est donnée dans le tableau ci-dessous.

	DynELA	Abaqus	Ecart
$\sigma_{22_{max}}$	19,8Gpa	19,2GPa	3,1%
$\bar{\sigma}_{max}$	12,4GPa	12,2GPa	1,6%

2 . Simulation numérique de la coupe des métaux

La possibilité de simuler la coupe des métaux avec DynELA à été testée . Le but d'une telle application est simplement de vérifier la capacité de l'algorithme de contact à gérer le glissement

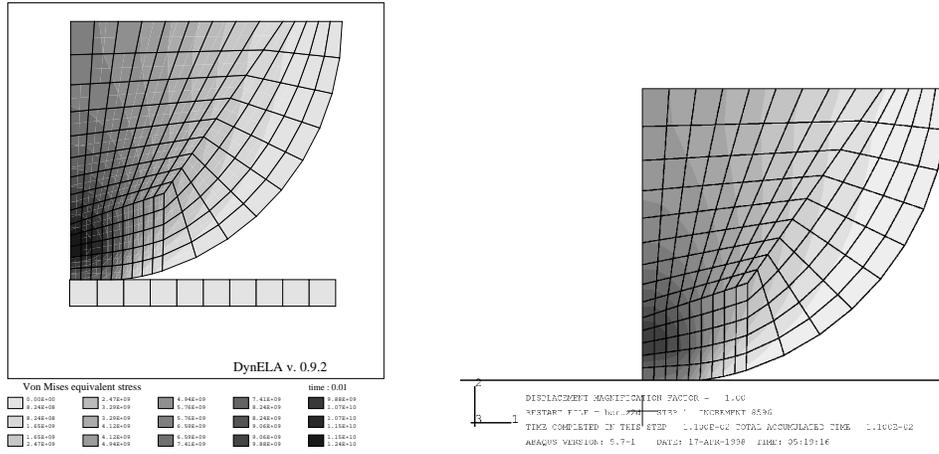


Figure 1: *Comparaison des contraintes de Von-Mises dans le cylindre*

existant entre le copeau et l’outil, et le décollement du copeau par rapport à l’outil à la fin de la zone de contact. On a donc utilisé dans un but de simplification une loi de comportement élasto-plastique ($\sigma = A + B\epsilon^n$) pour la modélisation du matériau (la loi de comportement adaptée à la coupe des métaux devant être thermo-élasto viscoplastique). Nous avons également introduit un critère géométrique de séparation des noeuds devant la pointe de l’outil afin de séparer le copeau de la pièce usinée. La vitesse de coupe a été fixée à $4m/s$ et la vitesse d’avance à $0,5mm/tr$ pour l’application présentée.

La figure 2 montre les contraintes de Von-Mises à deux instants du calcul. Le premier correspond au début du calcul, et dans le deuxième, on peut considérer que le régime permanent est atteint. Ces simulations montrent bien les limites d’un modèle de coupe Lagrangien par le fait que la zone du copeau située immédiatement en amont de l’outil ne peut pas être correctement modélisée du fait de l’utilisation d’un critère de séparation des noeuds.

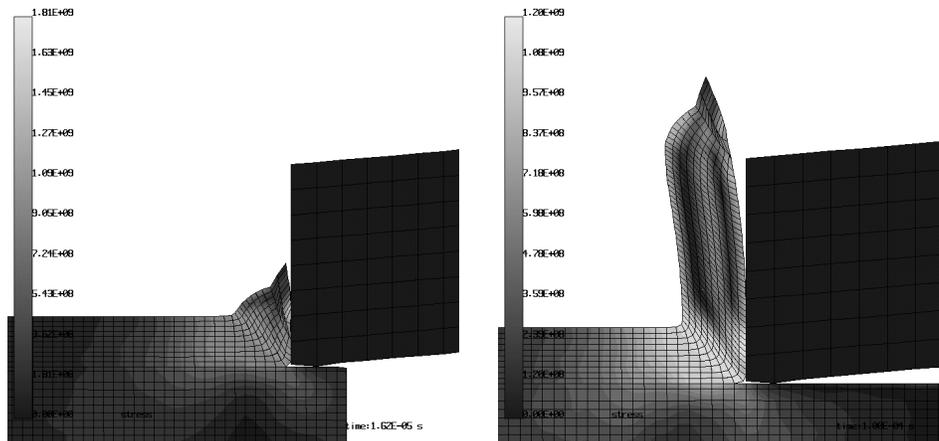


Figure 2: *Contraintes de Von-Mises au début et à la fin du calcul*

IV . CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté le fonctionnement et les premières applications du code de calcul DynELA qui dans sa version actuelle ne dispose pas encore de lois de comportement et de contact raffinées, la priorité étant de valider le “noyau” du code de calcul avant d’étendre ses

capacités en développant de nouveaux éléments ou de nouvelles lois. Les premières simulations effectuées avec ce nouveau code (contact de Hertz, test d'impact de Taylor) montrent que les résultats numériques présentent un bon niveau de corrélation avec des solutions de référence. Plusieurs développements sont actuellement en cours concernant les algorithmes de comportement et de contact, l'intégration des termes liés au formalisme ALE ou les éléments 3D. Les futures versions devraient alors permettre de mettre au point des modèles numériques performants, dédiés à nos principaux champs d'application: la coupe des métaux, le freinage et les impacts.

REFERENCES

- ABAQUS ; *Abaqus Explicit Example Problems Manual* version 5.8
- CHILDS T. H. C. ; 1997, Material property requirements for modelling metal machining - *Euro DYMAT 97*, pp. 21-36.
- JOYOT P., et al. ; 1998, A numerical simulation of steady state metal cutting - *Proc. of the Inst. of Mech. Eng. Part C, Jour. of Mech. Eng. Sc.*, vol 212, pp.331-341
- MARUSICH T. D. et al. ; 1995, Modeling and simulation of high-speed machining. *Int. Jour. for Num. Meth. Eng.*, vol 38 pp 3675-3694
- PANTALE O. ; 1996, Modélisation et simulation tridimensionnelles de la coupe des métaux - *Thèse Univ. Bordeaux I*
- PANTALE O. et al. ; 1999, Simulation of chip formation in machining - *Proc. of Plasticity'99*, 5-13 janvier 1999 Cancun - Mexico, pp. 397-400
- PONTHOT J. P. ; 1999, A unified radial return scheme for visco-plasticity and mixed hardening. *Proc. of Plasticity'99*, 5-13 janvier 1999 Cancun - Mexico, pp. 405-408
- SIMO J. C., HUGHES T. J. R ; 1998, Computational inelasticity - *Interdisciplinary Applied Mathematics* vol 7 ISBN 0-387-97520-9