



HAL
open science

Simulation de procédés de mise en forme couplant éléments finis de domaine et de frontière

Dominique Bigot, Hocine Kebir, Jean-Marc Roëlandt

► **To cite this version:**

Dominique Bigot, Hocine Kebir, Jean-Marc Roëlandt. Simulation de procédés de mise en forme couplant éléments finis de domaine et de frontière. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812901

HAL Id: hal-01812901

<https://hal.science/hal-01812901v1>

Submitted on 11 Jun 2018

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.

Public Domain

Simulation de procédés de mise en forme couplant éléments finis de domaine et de frontière

Dominique Bigot, Hocine Kebir, Jean-Marc Roëlandt

*Laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne
BP 20529 - 60205 Compiègne cedex
dominique.bigot@utc.fr
hocine.kebir@utc.fr
jean-marc.roelandt@utc.fr*

RESUME : A l'heure actuelle, la simulation des procédés est, en général, assez bien intégrée dans les codes industriels. Toutefois, l'approche la plus courante consiste à considérer les outils du procédé comme rigides, ce qui ne permet pas de prévoir correctement leur fatigue et leur impact sur le produit fini. Afin de prendre en compte les éventuelles modifications de l'outil au cours des cadences de mise en forme, nous développons un outil numérique dédié qui utilise un couplage éléments finis / éléments frontières pour la modélisation respective de la pièce et de l'outil. Cet outil numérique permettra plus particulièrement l'identification des critères de fatigue de l'outil. Il sera alors possible de concevoir des formes d'outils optimales permettant d'augmenter leur durée de vie tout en assurant une qualité exigée des pièces ainsi fabriquées.

ABSTRACT : At present, the simulation of the processes, in general, is rather well integrated in the industrial codes. However, the most current approach consists in regarding the tools of the process as rigid, which don't allow to envisage correctly their tiredness and their impact on the finished product. In order to take into account the possible modifications of the tool, during rates of working, we develop a dedicated numerical tool which uses a coupling finite elements/elements borders for the respective modeling of the part and the tool. This numerical tool will more particularly allow the identification of the criteria of tiredness of the tool. It will be then possible to conceive the optimal shapes of tools making it possible to increase their lifespan while ensuring a quality required of the parts thus manufactured.

MOTS CLES : Couplage éléments finis / éléments frontières, pénalité, mise en forme, programmation orienté-objet.

KEYWORDS : Coupling finite elements/elements borders, penalty, formatted, programming direct-object.

1 Introduction

Dans le domaine industriel, la simulation des procédés de fabrication est maintenant largement utilisée. Elle est devenue un outil incontournable dans la conception du produit pour améliorer le rendement et la qualité des pièces.

La qualité des produits obtenus par différents procédés industriels (mise en forme, découpe, usinage,...) dépend de :

- La conception du procédé lui-même (géométrie des outils, nombre de passes,...) dont les paramètres dépendent en général du matériau et de la géométrie (épaisseur) de l'ébauche.
- L'usure des outils au cours des cycles d'application du procédé. En effet, celle-ci peut engendrer des défauts de fabrication (géométrie, état de surface, endommagement,...).

Désirant un outil numérique pertinent et couplant plusieurs modules indépendants, la programmation a donc été entièrement développée en langage Orienté Objet. Ceci nous permet de disposer des avantages de ce type de programmation (héritage, encapsulation,...).

En raison des particularités de chaque composants du procédés de fabrication, nous avons choisi d'orienter notre recherche sur un couplage éléments finis / éléments frontières :

- **Modélisation de la pièce en éléments finis** : la pièce étant soumise à de grandes transformations géométrique, ainsi qu'à des non-linéarité matérielles, nous avons utilisé et implémenté une famille d'éléments finis bidimensionnels ou axisymétrique linéaires.
- **Modélisation de l'outil en éléments frontières** ([KEB98]) : l'outil est soumis à de petites déformations et discrétisé par des éléments frontières quadratiques linéaires.
- **Mise en contact** ([HAM98], [FEN92]) et **couplage éléments finis / éléments frontières**.

2 Formulation :

2.1 *Eléments frontières*

Le principe de la méthode des éléments de frontière consiste à transformer des équations intégrales sur le contour. En élasticité linéaire, on ramène ainsi l'étude d'une pièce mécanique à l'étude de son comportement en surface. La discrétisation de celle-ci permet de transformer l'équation intégrale en un système d'équations linéaires et de déterminer les déplacements en contraintes à l'intérieur de la pièce à l'aide de relations intégrales simples.

Dans notre étude, on utilise la méthode directe des équations intégrales. La formulation de celle-ci en élastostatique est basée sur le théorème de réciprocité de Maxwell-Betti [BRE 89]. En l'absence des forces de volumes et pour un point P , l'équation intégrale en déplacement s'écrit:

$$C_{ij}(P)u_j(P) + \int_{\partial\Omega} T_{ij}(P,Q)u_j(Q)ds(Q) = \int_{\partial\Omega} u_{ij}(P,Q)t_j(Q)ds(Q) \quad (1)$$

où $u_{ij}(P, Q)$ et $T_{ij}(P, Q)$ sont les solutions fondamentales de Kelvin et $C_{ij}(P)$ un coefficient qui dépend de la discontinuité de la normale en P . $u_j(Q)$ et $t_j(Q)$, appelés déplacement et tension du point Q appartenant au contour $\partial\Omega$ du domaine, sont les inconnues du problème. Après discrétisation de l'équation intégrale (1) en déplacement, on obtient le système suivant :

$$[A]\{u\} = [B]\{t\} \quad (2)$$

où $\{u\}$ est le champ de déplacement et $\{t\}$ est le champ de tension.

Ce système (2) peut être organisé sous la forme $[K]\{x\} = \{y\}$ où $\{x\}$ (respectivement $\{y\}$) est le vecteur des déplacements et tensions inconnus, (respectivement connus). La matrice $[K]$ du système précédent est une matrice pleine, non symétrique et à diagonale dominante, ce qui est une différence notable par rapport aux méthodes des éléments finis, pour lesquelles la matrice de rigidité est symétrique et bande.

Nous avons donc implémentés l'élément S2N3, qui est un élément quadratique non conforme.

2.2 Eléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode de calcul numérique qui couvre de très larges domaines d'applications en calcul des structures et notamment en mécanique non linéaire.

Grâce au principe des travaux virtuel, l'équation intégrale en déplacement s'écrit:

$$\int_{V_i} \langle D^* \rangle \{ \sigma \} dV - \int_{V_i} \langle u^* \rangle \{ f_v \} dV - \int_{S_i} \langle u^* \rangle \{ f_s \} dS = 0 \quad \forall \{ u^* \} \quad (3)$$

où $\langle D^* \rangle$ est le taux de déformation virtuel.

Ce qui nous conduit à résoudre le système suivant à l'aide d'un processus itératif de Newton-Raphson :

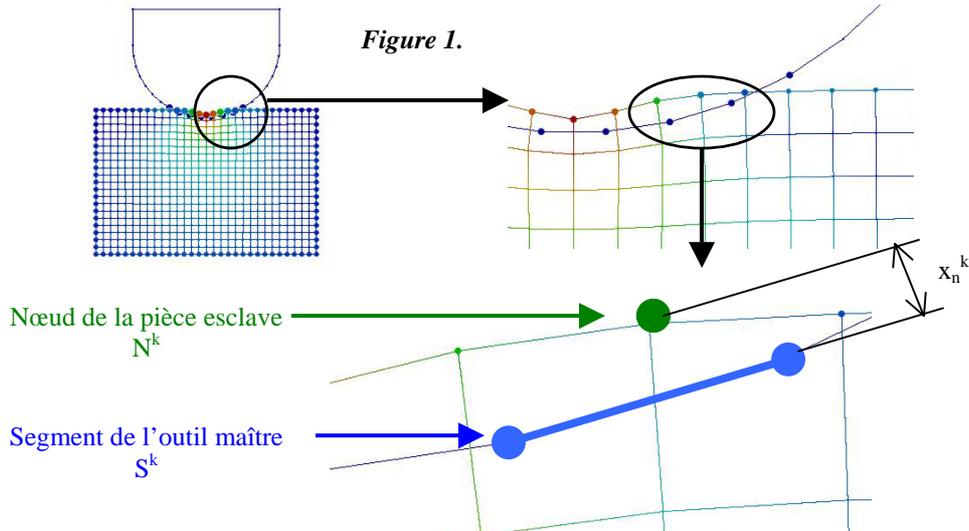
$$[K_T]\{\Delta u_n\} = \{F_{ext}\} - \{F_{int}\} \quad (4)$$

3 Couplage du contact éléments finis / éléments frontières

Dans notre exemple, nous avons choisi de modéliser la pièce à l'aide d'éléments Q4 et l'outil par des éléments S2. Nous avons considéré que l'outil est « maître » et que la pièce est « esclave ». Nous nous intéressons donc aux segments maîtres S_k de l'outil et aux nœuds esclaves N_k . [CHA02].

3.1 Méthode de couplage :

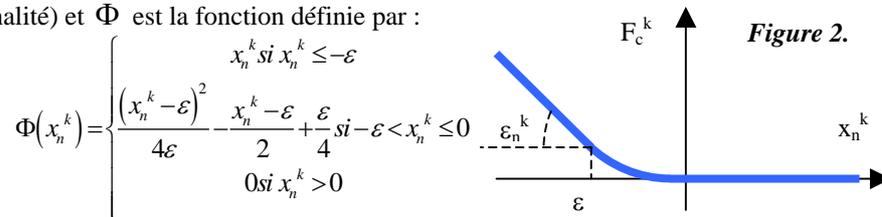
Après avoir identifié les couples « segments maître de l’outil » / « nœuds esclaves de la pièce » qui entrent en contact, nous appliquons un algorithme qui converge lorsque les conditions de contact sont vérifiées.



Après avoir identifié les couples Nœuds N^k /Segments S^k , nous calculons la distance de pénétration du nœud dans l’outil (Figure 1). Et grâce au calcul d’une rigidité normalisée ε_n^k par nœud de la pièce, nous en déduisons une force de contact que l’on impose aux nœuds, ainsi qu’aux segments (dans le cas d’un outil non-rigide).

Le déplacement de la pièce et de l’outil se fait indépendamment par la résolution de 2 systèmes différents : un calcul élément fini pour la pièce $[K_T]\{\Delta u_n\} = \{F_{ext}\} - \{F_{int}\} + \{F_{contact}\}$ et un calcul élément frontière pour l’outil $[A]\{u\} = [B](\{t\} + \{t_{contact}\})$.

Nous avons utilisé la méthode de pénalité [NOO86] afin d’estimer nos forces de contact associées au nœud N^k et au segment S^k : $F_c^k = -\Phi(x_n^k) \cdot \varepsilon_n^k$ où x_n^k est la distance entre N^k et S^k (appelée encore distance de pénétration du nœud N^k dans l’outil), ε_n^k est la rigidité normalisée pour le nœud N_k , (aussi appelé coefficient de pénalité) et Φ est la fonction définie par :



$$\Phi(x_n^k) = \begin{cases} x_n^k & \text{si } x_n^k \leq -\varepsilon \\ \frac{(x_n^k - \varepsilon)^2}{4\varepsilon} - \frac{x_n^k - \varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{4} & \text{si } -\varepsilon < x_n^k \leq 0 \\ 0 & \text{si } x_n^k > 0 \end{cases}$$

Φ est donc une fonction régularisant notre force de contact F_c (Figure 2). Un des intérêts d'un tel lissage revient à avoir la dérivée continue sur tout le domaine de définition, ce qui améliore le changement de statut de « non contact-contact ».

3.2 Ajustement automatique du paramètre de pénalité :

L'algorithme est basé sur l'ajustement du paramètre de pénalité en fonction de la précision exigée pour la pénétration [LEE93]. Si cette dernière est trop importante ($x_n^k < x_{\max}$), cela signifie que le paramètre de pénalité est trop petit, il faut donc l'augmenter. Par contre, si la pénétration est acceptable ($0 > x_n^k > x_{\max}$), le paramètre de pénalité peut être diminué ou bien gardé tel quel (Figure 3).

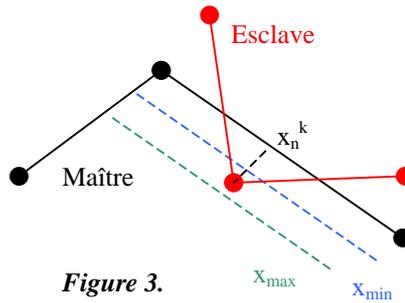


Figure 3.

Pour le nœud N_k , le paramètre de pénalité ${}^{t+\Delta t}\epsilon_n^k$ s'exprime comme suit :

$${}^{t+\Delta t}\epsilon_n^k = \Psi\left(|x_n^k|, x_{\min}, x_{\max}\right) \cdot {}^t\epsilon_n^k$$

$$\text{où : } \Psi\left(|x_n^k|, x_{\min}, x_{\max}\right) = \frac{|x_n^k|}{x_{\max}} \text{ si } |x_n^k| > x_{\max}, \frac{|x_n^k|}{x_{\min}} \text{ si } |x_n^k| < x_{\min}, 1$$

4 Résultats

Afin de valider le couplage éléments finis / éléments frontières, nous avons modélisé le contact d'une pièce avec un poçon cylindrique.

Dans un premier temps, nous nous sommes limités au ce cas en bidimensionnel représenté ci-dessous (Figure 4) :

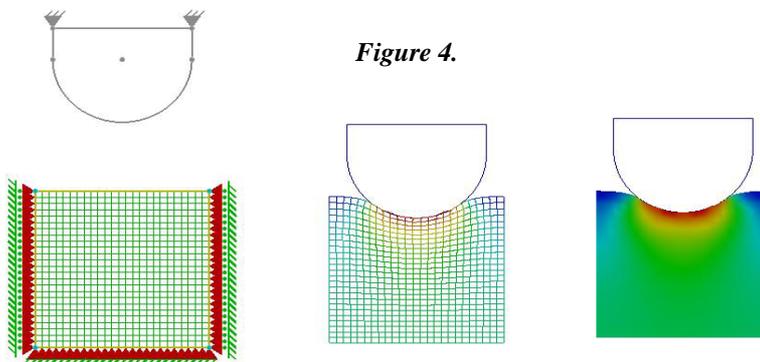


Figure 4.

Cependant, ce cas ne représente qu'une étape vers le 3D (axisymétrique) plus proche des applications industrielles. Par la suite, notre outil numérique permettra de simuler les procédés de fabrication (usinage, découpe, emboutissage, clinchage,...).

5 Conclusion et perspectives

Le couplage élément finis / éléments frontières offre de nouvelles perspectives de programmation. Dans notre cas, nous avons pu prendre en compte la déformation de l'outil dans le développement de notre logiciel, dont le but à long terme est l'optimisation de la géométrie de l'outil.

Après avoir développé le couplage en contact éléments finis / éléments frontières dans le cas 2D non linéarité matérielle, nos perspectives seront les suivantes :

- Développer l'optimisation de la géométrie de l'outil.
- On étudiera en relation avec des partenaires industriels l'évolution en fatigue des outils et son impact sur la mise en forme de la pièce.

6 Bibliographie

- [KEB98] Kebir H., Roelandt J.M., Foulquier J., « A new singular boundary element for crack problems », *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 62, No 6, p 497-510 (1998)
- [HAM98] Hamel V., Roelandt J.M., Gacel J.N., Schmit F., « F.E. modeling of clinch forming with automatic remeshing », *Comp. & Struct.*, France (1998)
- [FEN92] Feng K.-Q., De Saxcé G., Touzot G., « Numerical implementation of the implicit standard material approach for 2D or 3D frictional contact problem », *Int. J. Num. Meth. Eng.* (1992)
- [BRE 89] C.A.Brebbia and J.Dominguez. 'Boundary elements : an introductory course'. Mc Graw-Hill, 1nd edition, 1989.
- [CHA02] Chamoret D., Saillard P., Rassineux A., and Bergheau J-M., "A brief review of computational methods in contact mechanics ». In *Second International Conference on Advancer Computational Methods in Engineering*, Université de Liège, Belgium, May 28-31, 2002.
- [NOO86] Noor-Omid B., Wriggers P., "a note on the optimum choice for the penalty parameters". *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 3:581-585, 1986.
- [LEE93] Lee S.H., "Rudimentary consideration for adaptive gap/friction element based on the penalty method". *Computers & Structures*, 47(6):1243-1056, 1993.