



HAL
open science

Extensions d'une méthode par éléments discrets pour la modélisation de milieux divisés complexes

Frédéric Dubois, Mathieu Renouf, Michel Jean

► **To cite this version:**

Frédéric Dubois, Mathieu Renouf, Michel Jean. Extensions d'une méthode par éléments discrets pour la modélisation de milieux divisés complexes. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01493703

HAL Id: hal-01493703

<https://hal.science/hal-01493703v1>

Submitted on 22 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.

Public Domain

Extensions d'une méthode par éléments discrets pour la modélisation de milieux divisés complexes

Frédéric Dubois* — Mathieu Renouf** — Michel Jean***

* LMGC - UMR5508 (CNRS-UM2)

UM II - CC048 - place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier cedex 05

dubois@lmgc.univ-montp2.fr

** LaMCoS - UMR5514 (CNRS - INSA de Lyon)

Bâtiment Jean d'Alembert, 18 - 20 rue des sciences, F-69621 VILLEURBANNE cedex

Mathieu.Renouf@insa-lyon.fr

*** LMA - UPR7051

31, chemin Joseph Aiguier, F-13402 MARSEILLE cedex 20

e-mail: mjean.recherche@wanadoo.fr

RÉSUMÉ. Dans les milieux présentant un caractère divisé, les modélisations par éléments finis peuvent s'avérer inappropriées pour une description fine des mécanismes mis en jeu. Des stratégies issues des méthodes par éléments discrets permettent de surmonter les difficultés liées au caractère divisé du milieu et combinées aux méthodes de modélisation classiques ces approches hybrides offrent de nombreuses perspectives. Notre propos est de présenter un cadre de modélisation permettant la modélisation de systèmes divisés complexes, complexité provenant à la fois du comportement continu des éléments présents et des interactions entre ces éléments.

ABSTRACT. For divided media, classical finite element method are not well suited to obtain an accurate description of involved mechanisms. Strategies based on discrete element allow to face such difficulties related to the divided feature of the media and combined to classical modeling, these hybrid approaches offer numerous perspectives. Our purpose is to propose a modeling frame allowing the simulation of complex divided media, complexity related to both continuous behaviour of element and interaction between them.

MOTS-CLÉS : DEM, LMGC90, multi-corps, multi-contacts, multi-physiques

KEYWORDS: DEM, LMGC90, multi-bodies, multi-contacts, multi-physics

1. Introduction

Parmi les milieux qui nous entourent, un très grand nombre présente naturellement un caractère divisé : milieux granulaires, maçonneries, métal à l'échelle du grain, etc. D'autres présentent ce caractère divisé, parfois localement ou de façon évolutive, suite à des sollicitations : usure, fracture, fissuration, etc. A l'extrême le caractère divisé peut être une vue de l'esprit comme c'est le cas en décomposition de domaine.

Quoi qu'il en soit, la modélisation numérique de ces milieux par des méthodes telles que les éléments finis s'avère le plus souvent inappropriée. Que ce soit pour décrire leur évolution macroscopique présentant de grandes déformations ou microscopique présentant des localisations erratiques de la déformation, il faut être capable de décrire avec précision le caractère discontinu du milieu : géométrie, comportement des éléments composant le milieu, lois d'interaction entre éléments.

Des stratégies issues des méthodes par éléments discrets permettent de surmonter les difficultés liées au caractère divisé du milieu. Combinées aux méthodes de modélisation classiques, ces approches hybrides offrent de nombreuses perspectives. C'est avec les travaux précurseurs de Cundall (Cundall, 1971) que débute le développement des méthodes par éléments discrets (DEM) : la méthode des éléments distincts est utilisée pour des applications concernant la mécanique des roches. La méthode s'appuie sur un schéma temporel explicite et un traitement explicite régularisé du contact. Depuis de nombreuses méthodes s'appuyant sur cette démarche ont vu le jour, proposant aussi bien des améliorations de la méthode (Kishino, 1988) que de nouveau schéma d'intégration (Iordanoff *et al.*, 2002), tout en élargissant le spectre des applications : géophysique, milieux granulaire, tribologie, etc.

Classiquement, ces méthodes reposent sur des hypothèses dont découlent les modèles utilisés :

H1 - Les interactions sont binaires, i.e. elles dépendent uniquement des propriétés relatives des deux éléments en interaction ; la cinématique d'un élément dépend alors uniquement de ses chargements et des interactions avec les autres éléments.

H2 - la région de contact est petite devant la taille de l'élément ; les contacts sont considérés ainsi comme ponctuels.

H3 - La déformation reste confinée au voisinage du contact ; les éléments peuvent alors être considérés comme rigides.

H4 - les interactions sont indépendantes les unes des autres ; la force de contact peut être explicitement déterminée en fonction de la déformation au voisinage des contacts et donc de la cinématique des éléments d'après les hypothèses précédentes.

La dernière hypothèse, très restrictive, est sous-jacente aux approches (smooth) DEM classiques. Sa justification peut venir du fait qu'on se place à une échelle de temps suffisamment petite pour considérer un découplage total entre les interactions.

Parmi les évolutions des méthodes DEM, la méthode de dynamique des contacts (CD) développée par Moreau (Moreau, 1988) propose de s'affranchir de la dernière hypothèse évoquée précédemment et de travailler à une échelle de temps liée à la dynamique de corps rigide des éléments. Aussi un formalisme adapté est nécessaire

(inclusion de mesures différentielles) ; par ailleurs cette méthode diffère des méthodes précédentes par un traitement implicite des interactions de contact et un intégrateur temporel implicite. Cette approche permet de traiter simultanément toutes les interactions actives sur un pas de temps. Plus tard, Jean (Jean, 1999) propose une généralisation de la méthode aux corps déformables et donnera à la méthode le nom de Non Smooth Contact Dynamics (NSCD). Ceci permet de s'affranchir de la troisième hypothèse.

L'objectif de cette contribution est de présenter un cadre s'appuyant sur ces dernières démarches, et qui supporte une discrétisation spatiale hybride (DEM/FEM), la prise en compte de comportement multi-physiques (mécanique, thermique et électrique), des intégrateurs implicites ou explicites ainsi que des lois de comportement et d'interactions variées. La section 2 s'attachera à replacer le cadre théorique et ses extensions. La section 3 présentera les grandes lignes et l'architecture de la plate-forme tandis que la section 4 présentera différentes applications avec des milieux divisés complexes.

2. Cadre

La formulation d'un problème impliquant différents systèmes dynamiques en interaction repose sur plusieurs aspects distincts. Le premier concerne la description de chaque système, comprenant la description du modèle utilisé (par exemple, les équations de Lagrange pour la mécanique, l'équation de la chaleur instationnaire pour la thermique, etc.), le choix d'une loi de comportement (rigide, déformable avec ou sans couplages). Une fois le comportement volumique de chaque système décrit, les interactions entre ces différents systèmes doivent être précisées. Pour du contact, il faudra déterminer un repère local, des matrices de changements de passage entre inconnues globales et locales, le comportement de l'interaction ; pour une liaison l'équation régissant le mouvement relatif et pour un échange thermique le modèle relatif à cet échange entre les deux systèmes.

Une fois la description des systèmes et des interactions établie, il faut déterminer une stratégie de résolution : contrôle de la marche en temps (qu'on prendra ici de type pas à pas et non événementielle), intégrateur, résolution du problème en présence d'interactions, etc. Parmi les choix qui se présentent au modélisateur deux sont cruciaux : *un intégrateur des équations d'évolution* (implicite ou explicite) et *une technique de gestion des interactions* (explicite ou implicite). On peut noter que le plus souvent, et à tort, ces deux points sont présentés comme totalement liés. Le premier point, i.e. le choix d'un intégrateur en temps implicite ou explicite, est uniquement lié au problème d'évolution que l'on souhaite étudier. Les intégrateurs explicites impliquent que l'on tienne compte de la dynamique locale au travers de conditions de stabilité. Les intégrateurs implicites permettent de s'affranchir de la dynamique locale. Le second point concerne la gestion explicite ou implicite des interactions : dans le premier cas on considère que la force d'interaction dépend explicitement des variables cinématiques connues dans le second cas on calcule les deux simultanément. Différentes combinaisons se retrouvent à travers de nombreux

travaux : intégrateur explicite et gestion explicite du contact (Cundall, 1971, Iordanoff *et al.*, 2002), intégrateur explicite et gestion implicite (Carpenter *et al.*, 1991, Baillet *et al.*, 2005, Kishino, 1988) et intégrateur implicite et gestion implicite (Moreau, 1988, Saussine *et al.*, 2006). Ces différentes approches sont complémentaires.

Le cadre général, en terme de formulation et de stratégie de résolution, que nous avons adopté nous permet à la fois d'utiliser les méthodes DEM classiques, la méthode CD développée par Moreau pour les systèmes de corps rigides (Moreau, 1988) et NSCD son extension par Jean aux déformables (Jean, 1999). De plus, de nombreuses optimisations concernant aussi bien le calcul parallèle (Renouf *et al.*, 2004b) que le développement de nouveaux algorithmes de résolution (Renouf *et al.*, 2004a) ont été apportées afin de conserver des temps de calcul raisonnables.

3. Architecture

La plate-forme, libre et ouverte, LMGC90 (Dubois *et al.*, 2003) a pour objet de pouvoir implanter les approches évoquées dans ce papier. De plus amples détails peuvent être trouvés sur le site <http://www.lmgc.univ-montp2.fr/~dubois/LMGC90>.

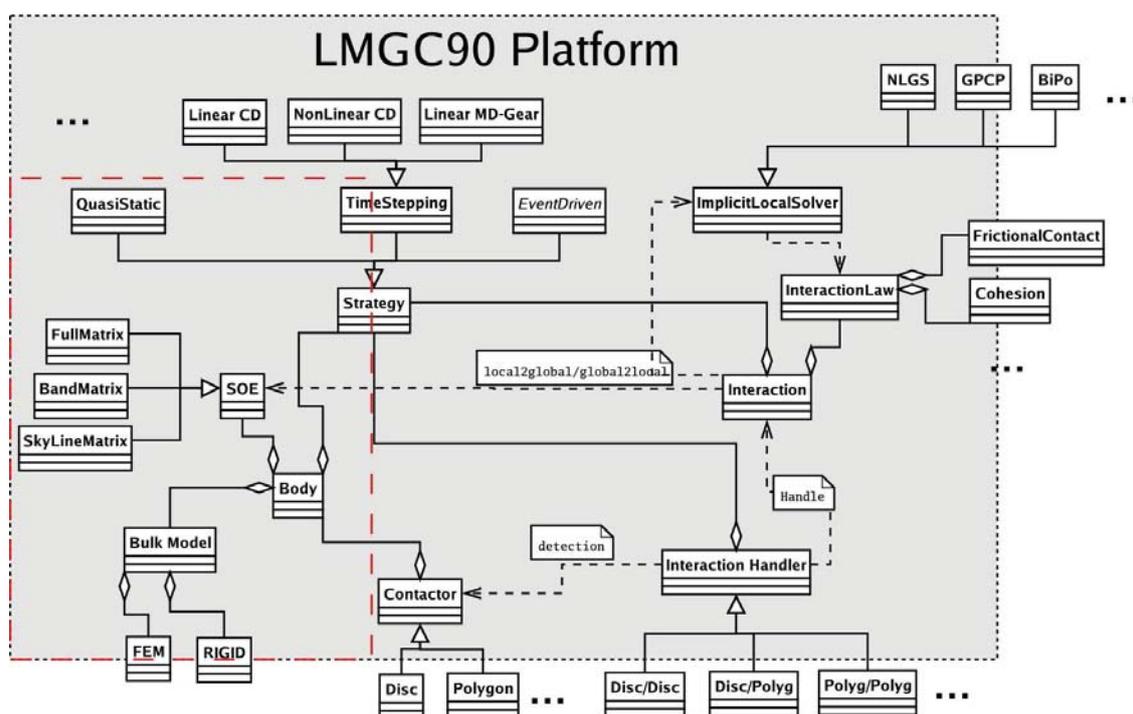


Figure 1. Diagramme de classe de plate-forme LMGC90

Son architecture est dédiée à la résolution des systèmes multi-corps en interaction et elle a été bâtie de façon à reproduire le cadre général évoqué précédemment notamment dans un souci d'extensibilité et de performance. La structure de la plate-forme (cf. figure 1) ne possède pas le découpage simple qu'on utilise pour les méthodes DEM

classiques et diffère de celle des codes éléments finis standard. La volonté de ne pas créer un code dédié à une application donnée, donne à la plate-forme une structure plus ouverte. Rapidement on peut noter que la partie formulation est découplée de la partie stratégie de résolution, ainsi que la partie volumique (Body - SystemOfEquation) est totalement découplée de la partie interaction.

4. Applications

De nombreuses d'applications rentre dans le cadre définie précédemment : l'étude des débits d'usure dans un contact roue-rail (Renouf *et al.*, 2006b), la modélisation multi-physiques (Descartes *et al.*, 2006), les problèmes géophysiques (Renouf *et al.*, 2006a), etc. Pour illustrer nos propos, considérons le cas d'un problème géophysique : l'évolution des plis. Ce type de problème induit de grandes déformations et de nombreuses localisations au sein même de la structure, ce qui rend sa description difficile avec les outils de la mécanique des milieux continus, et il est donc préférable de représenter la structure comme initialement divisée. La figure 2 fait référence à une

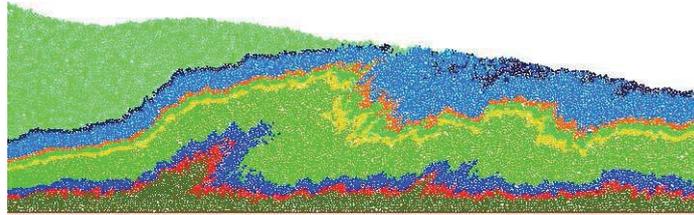


Figure 2. *Echantillon composé de 45 000 disques soumis à une compression latérale visant à réduire la taille de l'échantillon*

structure géologique composée de 45 000 disques dont les interactions répondent à des lois de contact cohésif frottant. L'échantillon initial, très élancé est soumis à un raccourcissement généré par l'avancée de la paroi verticale gauche. Le caractère discrets de la structure permet de voir sur la déformée, illustrée par la figure 2, de grandes déformations et de nombreux phénomènes de localisations. Le temps de calcul est de l'ordre de quatre jours sur un simple PC (processeur 3.6GHz).

5. Conclusion

Avec la plate-forme LMGC90, nous disposons aujourd'hui d'un outil opérationnel capable de répondre à de nombreux problèmes complexes. Celui-ci repose sur une description étendue du problème discret qui le rend ouvert et très différent des codes DEM et FEM classiques.

Les perspectives plus moins proches englobent la mise en place d'une description hybride évolutive (transition DEM/FEM au cours du processus de simulation), l'intégration de méthode de décomposition de domaines avec parallélisme par passage

de message et l'introduction d'éléments spectraux et de méthodes meshless, méthode très proche des méthodes DEM étendues.

6. Bibliographie

- Baillet L., D'Errico S., Laulagnet B., Berthier Y., « Finite Element Simulation of Dynamic Instabilities in Frictional Sliding Contact », *ASME J. Tribology*, vol. 127, p. 652-657, July, 2005.
- Carpenter N. J., Taylor R. L., Katona M. G., « Lagrange Constraints for transient finite element surface contact », *Int. J. Numer. Methods Engrg.*, vol. 32, p. 103-128, 1991.
- Cundall P. A., « A computer model for simulating progressive large scale movements of blocky rock systems », *Proceedings of the symposium of the international society of rock mechanics*, vol. 1, p. 132-150, 1971.
- Descartes S., Fillot N., Renouf M., Gautier B., Descamps A., Berthier Y., Demanche P., « A new mechanical-electrical approach to the wheel-rail contact », *7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, Brisbane, Australia, September, 2006.
- Dubois F., Jean M., « LMGC90 une plateforme de développement dédiée à la modélisation des problèmes d'interaction », *Actes du sixième colloque national en calcul des structures*, vol. 1, CSMA-AFM-LMS, p. 111-118, 2003.
- Iordanoff I., Sève B., Berthier Y., « Solid Third Body Analysis Using a Discrete Approach : Influence of Adhesion and Particle Size on the Macroscopic Behavior of the Contact », *ASME J. Tribol.*, vol. 124, p. 530-538, 2002.
- Jean M., « The Non Smooth Contact Dynamics Method », *Compt. Methods Appl. Math. Engrg.*, vol. 177, p. 235-257, 1999.
- Kishino Y., « Disk Model Analysis of Granular Media », *Micromechanics of Granular Materials*, p. 143-152, 1988. (eds. M. Satake and J.T. Jenkins), Elsevier.
- Moreau J. J., « Unilateral contact and dry friction in finite freedom dynamics », in , J. Moreau, , e. P.-D. Panagiotopoulos (eds), *Non Smooth Mechanics and Applications, CISM Courses and Lectures*, vol. 302 (Springer-Verlag, Wien, New York), p. 1-82, 1988.
- Renouf M., Alart P., « Conjugate gradient type algorithms for frictional multicontact problems : applications to granular materials », *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 194, n° 18-20, p. 2019-2041, 2004a.
- Renouf M., Dubois F., Alart P., « A parallel version of the Non Smooth Contact Dynamics Algorithm applied to the simulation of granular media », *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 168, p. 375-38, 2004b.
- Renouf M., Dubois F., Alart P., « Numerical investigations of fault propagation and forced-fold using a non smooth discrete element method », *Rev. Euro. Method. Num.*, vol. 15, p. 549-570, 2006a.
- Renouf M., Saulot A., Berthier Y., « Third body flow during a wheel-rail interaction », in , C. A. M. S. et.al. (ed.), *III European Conference on Computational Mechanics Solids*, 5D8 June, 2006b.
- Saussine G., Cholet C., Dubois F., Bohatier C., Gautier P., Moreau J., « Modelling ballast behaviour under dynamic loading. Part 1 : A 2D polygonal discrete element method approach », *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 195, n° 19-22, p. 2841-2859, April, 2006.