Une méthode MultiMaillages MultiPhysiques parallèle pour accélérer les calculs des procédés multiphysiques incrémentaux

Mohamad Ramadan, Sylvain Gavoille, Lionel Fourment, Hugues Digonnet

▶ **To cite this version:**

Mohamad Ramadan, Sylvain Gavoille, Lionel Fourment, Hugues Digonnet. Une méthode MultiMaillages MultiPhysiques parallèle pour accélérer les calculs des procédés multiphysiques incrémentaux. CMA 2011, May 2011, Presqu'île de Giens (Var), France. 8 p. ; Clé USB. hal-00592713

HAL Id: hal-00592713
https://hal.science/hal-00592713

Submitted on 3 May 2011

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.

CMA 2011
10e Colloque National en Calcul des Structures
9-13 mai 2011 Presqu'île de Giens (Var)

Une méthode MultiMaillages MultiPhysiques parallèle pour accélérer les calculs des procédés multiphysiques incrémentaux

M. Ramadan[1], S. Gavoille[1], L. Fourment [1] et H. Digonnet[1]

[1] *CEMEF, Mines ParisTech, France,ingenieur_ramadan@yahoo.fr, {sylvain.gavoille,lionel.fourment,hugues.digonnet}@mines-paritech.fr*

Résumé — L'objectif de ces travaux est de réduire le temps de calcul pour des procédés multiphysiques incrémentaux. Le principe de la méthode est d'utiliser un maillage adéquat pour chaque physique du problème. Un autre point important de l'approche est l'utilisation d'un maillage de stockage, lequel permet de conserver la précision malgré les remaillages. La stratégie proposée permet d'obtenir des accélérations importantes en temps de calcul. Enfin, on propose une extension de cette approche dans le cadre d'une description Arbitrairement Lagrangienne ou Eulérienne.
Mots clefs — Multimaillage, multiphysiques, ALE.

1. Introduction

L'utilisation de la simulation numérique pour le calcul de structure remonte aux années 70. Elle s'est depuis développée progressivement jusqu'à devenir un outil indispensable dans l'industrie mécanique en général et dans la mise en forme des matériaux en particulier. La simulation numérique offre de nombreux avantages :

1- Elle réduit le coût et le temps de fabrication en remplaçant les essais expérimentaux, tout particulièrement lorsque le matériau est un alliage au prix très élevé, ou que la pièce est de très grandes dimensions.

2- Elle fournit une large gamme qualitative et quantitative d'informations que l'on ne peut pas obtenir par d'autres outils, surtout au niveau de l'histoire de certaines variables comme la déformation généralisée $\bar{\varepsilon}$, qui sont indispensables pour l'étude microstructurale de la pièce fabriquée.

Cependant, un inconvénient de la simulation numérique est le temps de calcul élevé dans le cas des procédés incrémentaux.

Du point de vue de l'analyse numérique, la simulation des procédés incrémentaux (typiquement le procédé de martelage représenté sur la Figure 1) ne pose pas de difficultés particulières : à chaque incrément de temps, les déformations sont relativement simples et faciles à simuler avec tout logiciel adapté aux grandes transformations. La difficulté vient des temps de calcul qui résultent du très grand nombre d'opérations à simuler. Le temps de calcul d'une simulation de martelage ou d'un autre procédé incrémental similaire peut prendre des semaines voire des mois.

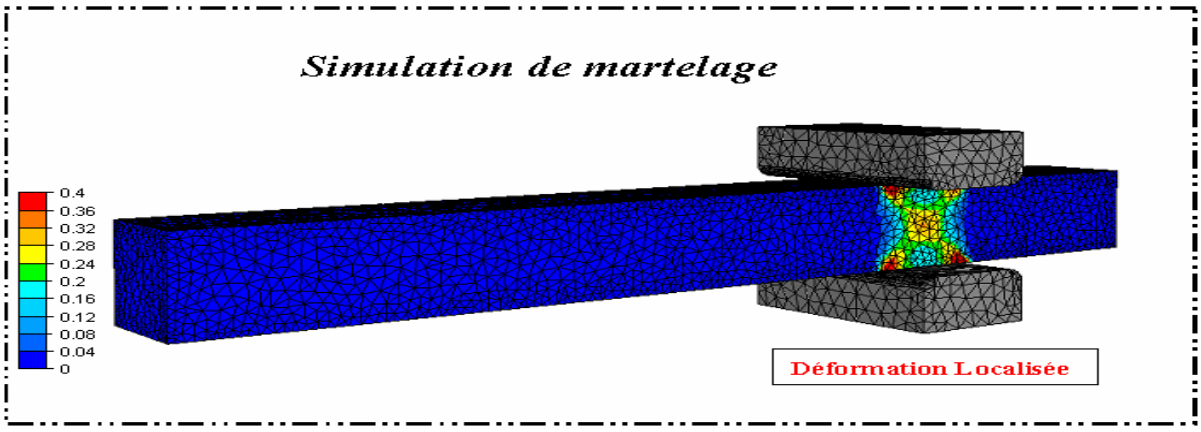

FIG. 1 – Simulation du procédé martelage d'une barre entre marteaux plats.

Il s'avère donc nécessaire de développer une méthode numérique pour réduire les temps de calcul. Dans ce papier, on présente la méthode MultiMaillages MultiPhysiques (MMMP) [1-2] comme solution pour accélérer les calculs MultiPhysiques coûteux. Dans la première partie, nous introduirons le principe de la méthode, son algorithme et ses paramètres. Dans une deuxième partie, nous présenterons les derniers résultats obtenus. Enfin, nous présenterons l'utilisation de la méthode MMMP dans le cadre d'une formulation Arbitrairement Lagrangienne ou Eulérienne (ALE).

2. La méthode MultiMaillages MultiPhysiques (MMMP)

2.1. Principe

Le principe de la méthode MMMP [1-4] consiste à ne pas utiliser le même maillage pour tous les problèmes physiques posés sur un domaine donné, mais à associer à chaque problème un maillage « optimal », appelé « Maillage de Calcul » et adapté aux caractéristiques propres de cette physique. Le nombre de Maillages de Calcul est donc égal au nombre de problèmes résolus simultanément sur le domaine en question. En plus de ces Maillages, nous utilisons un maillage de support, appelé « Maillage Référence ». Il a la propriété d'être plus fin ou aussi fin que tous les autres maillages, en tout point du domaine. Aucun calcul n'est effectué sur le Maillage Référence, trop imposant. En revanche, il est suffisamment raffiné pour recevoir les résultats des différents Maillages de Calcul sans perte d'information. Ce maillage peut être considéré comme la « banque » de données où les Maillages de Calcul déposent leurs résultats. Cette banque « finance » les Maillages de Calcul en leur fournissant les résultats dont ils ont besoin. Nous pouvons aussi considérer la méthode MMMP comme une technique d'accélération de la méthode de résolution sur le Maillage Référence, en recourant à des projections sur le maillage propre à chaque physique avant toute résolution, puis en procédant ensuite à une interpolation des résultats sur le Maillage Référence.

2.2. Application au procédé de martelage

Pour appliquer la méthode MMMP, on choisit le procédé de martelage. C'est un procède couplé thermomécaniquement,. La thermique est modélisée par l'équation de la chaleur et la mécanique par l'équation de mouvement et l'équation d'incompressibilité. Pour plus de détails sur ces modélisations, le lecteur peut se référer à [1].

Dans ce travail, on utilise seulement deux maillages [1-2]. En effet, le Maillage Thermique optimal étant un maillage uniformément raffiné sur l'ensemble du domaine, il peut être confondu avec le Maillage Référence, ($M_r = M_t$), ce qui permet de ne considérer qu'un seul nouveau maillage, le Maillage Mécanique M_m.

2.2.1. Algorithme

L'algorithme de la méthode MMMP adapté à au cas de martelage est donné sur la Figure 2. On commence par l'initialisation. Elle consiste à lire le Maillage Référence M_r, puis à générer le maillage Mécanique M_m et enfin à initialiser les variables. On effectue le transport des variables nécessaires au calcul mécanique de M_r sur M_m, puis le calcul mécanique sur M_m, avant d'interpoler les résultats mécanique de M_m sur M_r. Ensuite, on effectue le calcul thermique sur M_r. On termine en actualisant le Maillage Référence, la valeur des variables d'état qui lui sont associées et le Maillage Mécanique. Si nécessaire, en cas de remaillage du Maillage Référence ou de changement de type de conditions aux limites, on génère un nouveau maillage M_m.

- Initialisation
  - Lecture de M_r
  - Construction de M_m
  - Initialisation des variables

- Tant que Nb incrément $\leq$ Nb total d'incrément
  - Pré-Calcul Mécanique : Transport
    - Projection M_r vers M_m
  - Calcul Mécanique
    - Résolution mécanique sur M_m
  - Post-Calcul Mécanique : Transport
    - Interpolation des résultats mécanique de M_m vers M_r
  - Calcul Thermique
    - Résolution thermique sur M_r
  - Actualisation
    - Actualisation du maillage M_r
    - Actualisation du maillage M_m à partir de M_r ou génération d'un nouveau maillage M_m

---

FIG. 2 – Algorithme de la méthode MMMP

2.2.2. Adaptation du Maillage Mécanique

La particularité principale du procédé de martelage est la faible dimension de la zone déformée durant chaque étape du procédé. Comme le montre la Figure 1, la déformation est localisée dans la zone limitée par les outils, et elle est quasiment nulle à l'extérieur de cette zone. On considère alors que le maillage se divise en deux zones, une Zone de Déformation, que l'on note ZD, et une Zone de Faible Déformation que l'on note ZFD, et qui contient le reste du maillage. Dans la zone ZD, le maillage sera fin afin de capter les détails de la déformation. Dans la zone ZFD, le maillage sera déraffiné, sans affecter la qualité du résultat. La zone de déformation ZD étant relativement petite par rapport au volume total de la pièce, on garde cette zone dans le Maillage Mécanique M_m identique en tous

points à celle du Maillage Référence M_r. Ceci signifie que, dans la zone de déformation de M_m, on aura exactement les mêmes nœuds et les mêmes éléments que dans la zone de déformation de M_r. La zone ZFD est déraffinée par un déraffinement emboîté par nœuds qui consiste à déraffiner le maillage par élimination de nœuds sans ajouter de nouveaux nœuds ni les déplacer les nœuds existants. Cette construction particulière du Maillage Mécanique nous assure un transport exact dans la ZD..

2.2.3. Résultats

On considère un problème de martelage dont les paramètres de la simulation sont donnés dans le Tableau 1. Les caractéristiques de la pièce sont données dans le Tableau 2 et celles de l'outil dans le Tableau 3.

TAB. 1 – PARAMETRES DE LA SIMULATION

Matériau	Acier
Pas de temps : Δt	0,01 [s]
Nombre d'incréments	75
Masse volumique : ρ	7850 [Kg/ m^3]
Capacité thermique : *c*	778 [m^2/s^2k^{-1}]
Conductivité thermique : *k*	35 500 [$kg.m/s^3k^{-1}$]
Coefficient de frottement : α	0,3
Sensibilité à la température : β	0,00269
Sensibilité à la vitesse de déformation : *m*	0,14542

TAB. 2 – CARACTERISTIQUES DE LA PIECE

Largeur [y]	200 [mm]
Longueur [x]	2000 [mm]
auteur [z]	200 [mm]

TAB. 3 – CARACTERISTIQUES DE L'OUTIL

Largeur [y]	252 [mm]
Longueur [x]	442 [mm]
Hauteur [z]	125 [mm]
Vitesse outil [z]	40 [mm/s]

Étude de la précision de la méthode MMMP

Pour étudier la précision de la méthode MMMP, on compare les résultats d'un calcul MMMP à ceux d'un calcul MonoMaillage (calcul effectué sur le maillage le plus fin seulement). On calcule l'erreur suivant la norme Max sur la composante v_x de la vitesse, la déformation généralisée $\bar{\varepsilon}$ et l'abscisse *X*. Puis on compare l'erreur obtenue à l'erreur éléments finis que l'on obtient en considérant uniquement les valeurs maximales calculées, en comparant les résultats MonoMaillage (23 500 noeuds) à ceux calculés sur un maillage uniformément plus fin, avec 53 500 nœuds. Les résultats (Tableau 4) montrent que l'erreur du calcul MultiMaillages est du même ordre que celle du calcul

élément fini, et même inférieure. On peut donc considérer que la méthode MMMP donne des résultats objectivement identiques à ceux du calcul MonoMaillage.

TAB. 4 – COMPARAISON ERREUR MULTIMAILLAGES – ERREUR ELEMENT FINI

Variables	Erreur Max : MMMP	Erreur Max : Éléments finis
X	4.10^{-5}	10^{-4}
v_x	0,04	0,009
$\bar{\varepsilon}$	0,04	0,07

Etude de l'accélération MMMP

Pour étudier l'accélération MultiMaillages (temps de calcul par la méthode habituelle divisé par le temps de calcul par la méthode MMMP), on considère les 3 maillages (9 000 nœuds, 23 500 nœuds, 53 500 nœuds) dont les taux de déraffinement sont respectivement égaux à 3,6 , 3,7 , 3,9. La courbe de l'accélération MultiMaillages en fonction du nombre de nœuds est donnée sur la Figure 3. Les accélérations sont excellentes; elles montrent tout le potentiel de la méthode MMMP et ce de plusieurs points de vue. D'abord, on remarque que la méthode MMMP offre une accélération même pour un maillage qui a un faible nombre de degrés de liberté (9 000 nœuds). L'accélération obtenue est égale à 3,5, ce qui est rarement obtenu avec d'autres méthodes pour un aussi faible nombre de degrés de liberté. Ceci montre la robustesse de la MMMP. Sur le maillage de 53 500 nœuds, qui est une taille caractéristique des maillages utilisés dans la pratique industrielle, l'accélération est de 12,1. C'est une accélération excellente qui montre la capacité de la méthode MMMP dans les applications.

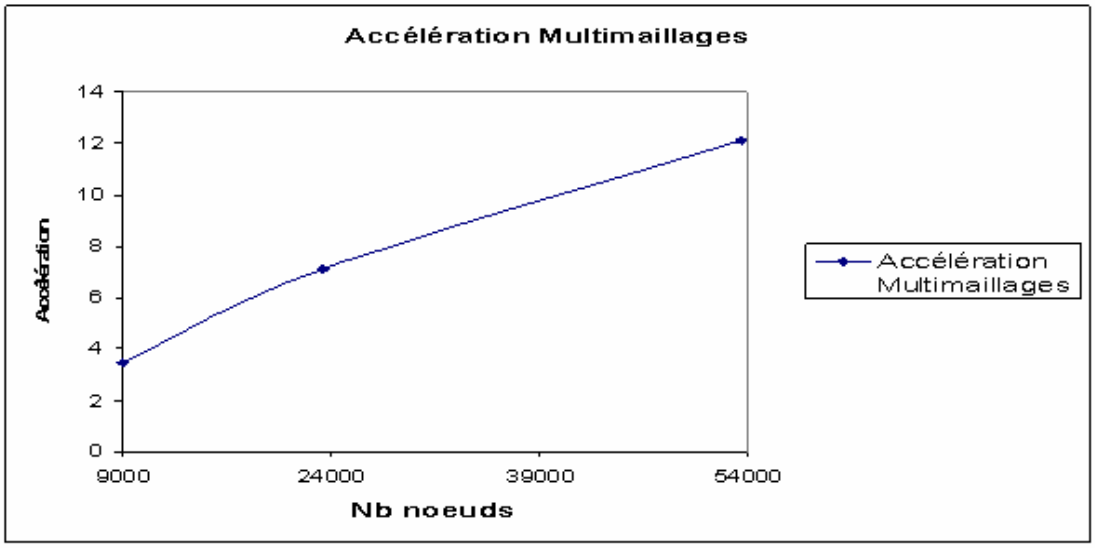

FIG. 3 – Accélération en fonction du nombre de nœuds

Accélération MMMP parallèle

On considère un maillage de 53 000 nœuds. On effectue 20 incréments de temps (jusqu'à la dégénérescence du maillage). Le calcul est lancé respectivement sur 2, 4, 8, 16, 32 et 64 processeurs. Sur la Figure 4, on voit l'évolution du temps de calcul entre 1 et 64 processeurs, et la Figure 5 offre un zoom de cette courbe entre 8 et 64 processeurs. On observe que l'écart entre les courbes MonoMaillage et MultiMaillages décroît avec l'augmentation du nombre de processeurs, traduisant une diminution de l'accélération MultiMaillages en parallèle, comme le montre la Figure 6. Entre 8 et 16 processeurs le temps de calcul de la méthode MMMP est pratiquement constant. Entre 32 et 64

processeurs, il croît. L'accélération MultiMaillages en parallèle varie entre 1,4 et 7,2. La chute de l'accélération s'explique par la différence du nombre de degrés de liberté des calculs mécaniques. Le calcul MonoMaillage est effectué sur un maillage de 53 500 nœuds alors que le calcul MultiMaillages est réalisé sur un maillage de 13 800 nœuds. Or l'efficacité de la parallélisation dépend du nombre de degrés de liberté, puisque le temps passé dans les communications entre les processeurs est d'autant plus important devant le temps total que le nombre de degrés de liberté est faible. Cependant, on remarque que même avec cette chute d'accélération, la méthode MultiMaillages offre une accélération sur un grand nombre de processeurs, d'une valeur de 1,4 sur 64 processeurs. La performance de la MMMP peut être considérée d'une autre manière en remarquant que le temps de calcul MultiMaillages sur 8 processeurs est inférieur à celui MonoMaillage sur 64, en d'autres termes, le calcul MultiMaillages sur 8 processeurs est 1,6 fois plus rapide que le calcul MonoMaillage sur 64 processeurs.

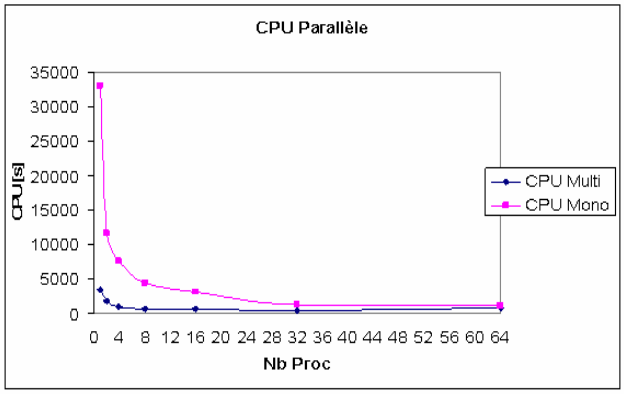

FIG. 4 – Cpu parallèle (MultiMaillages et MonoMaillage): 53 500 nœuds

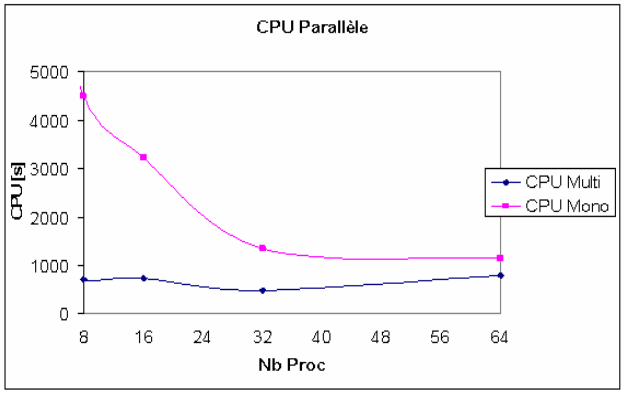

FIG. 5 – Cpu parallèle (MultiMaillages et MonoMaillage): 8-64 processeurs 53 500 nœuds

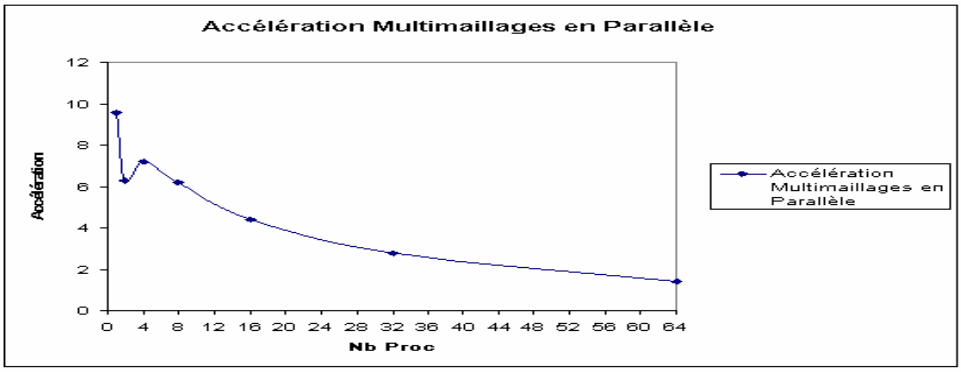

FIG. 6 – ACCELERATION MULTIMAILLAGES EN PARALLELE : 53 500 NŒUDS

3. Extension de la MMMP dans une formulation Arbitrairement Lagrangienne ou Eulérienne (ALE)

3.1. Principes

Etant donné que l'approche MMMP permet d'obtenir des accélérations de calculs importantes dans le cas de procédés multiphysiques incrémentaux, nous décidons d'appliquer cette stratégie pour d'autres types de procédés tels que le laminage ou encore le tréfilage. Pour ces procédés, la modélisation utilise une description Arbitrairement Lagrangienne ou Eulérienne (ALE) [Schreurs et al. 86] qui permet

d'éviter l'apparition de dégénérescences du maillage, mais aussi de diminuer considérablement la taille du domaine d'étude et par conséquent du nombre de degrés de libertés. En d'autres termes, elle permet d'utiliser un maillage optimal à chaque pas de temps.

Toutefois, il reste difficile d'obtenir une géométrie correcte sans engendrer un coût de calcul prohibitif. Pour ce faire, dans le cas d'une simulation de laminage ou tréfilage, le maillage n'est raffiné qu'au niveau de l'emprise, comme le montre la figure 7. Malheureusement, le déraffinement du maillage en dehors de l'emprise ne permet pas de calculer avec la précision requise l'évolution de la surface libre (élargissement et bombé) ni l'évolution des champs intégrés dans le temps (contraintes, déformations cumulées).

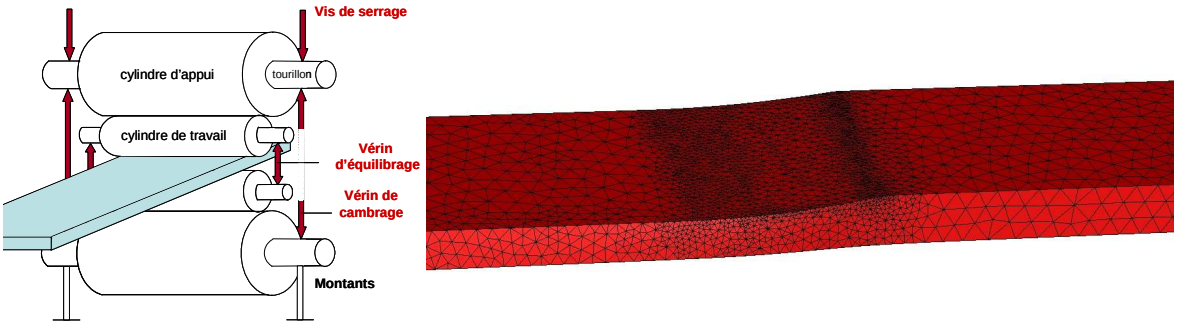

FIG. 7 – SCHEMA DE LAMINAGE – MAILLAGE CARACTERISTIQUE AVEC RAFFINEMENT SOUS EMPRISE

On retrouve la problématique énoncée précédemment sur les procédés incrémentaux. L'extension de la MMMP dans une formulation ALE permettrait d'obtenir, dans les zones déraffinées du maillage mécanique M_m, c'est-à-dire en dehors de l'emprise, une géométrie correcte calculée sur le maillage de référence M_r, ainsi qu'un transport beaucoup moins diffusif des champs. En effet, l'utilisation de la MMMP permet de conserver dans les zones déraffinées la précision obtenue au niveau de l'emprise, tant au niveau de la géométrie que des champs, tout en conservant un temps de calcul acceptable, puisque toujours effectué sur le maillage mécanique.

3.2. La description ALE

La formulation ALE permet d'allier les avantages des formulations Lagrangiennes et Eulériennes. Dans notre cas, nous avons adopté une approche découplée qui se décompose en trois étapes successives : une étape Lagrangienne, puis une étape de régularisation du maillage et enfin une étape de transport. Les deux premières étapes sont illustrées sur la figure 8. Utiliser une approche découplée permet d'insérer, avec peu d'efforts, la méthode ALE dans un code Lagrangien.

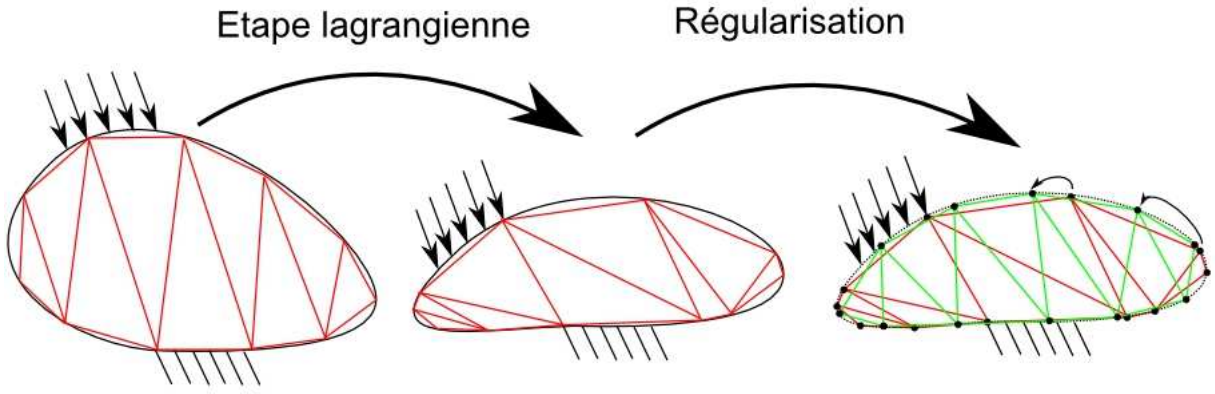

FIG. 8 – Formulation ALE découplée

L'étape Lagrangienne permet de calculer les différents champs inconnus sur le domaine, par un calcul mécanique (et éventuellement un calcul thermique). Quant à l'étape de régularisation, elle permet d'obtenir, par barycentrage, un maillage de meilleure qualité respectant la géométrie du domaine au pas de temps suivant. Enfin, l'étape de transport transfère les variables d'histoires sur ce maillage régularisé.

3.3. L'algorithme

L'algorithme de la méthode MMMP étendu à une description ALE est quasiment identique à celui présenté sur la figure 2, à l'exception de l'étape d'actualisation qui est différentes dans la formulation ALE :

- Régularisation du maillage M_r (à l'incrément de temps suivant) ou remaillage
- Régularisation du maillage M_m ou génération d'un nouveau maillage M_m
- Transport des variables sur le maillage régularisé

Afin d'obtenir la meilleure précision en terme de géométrie, notons que l'on régularise le maillage de référence M_r, plutôt que le maillage mécanique M_m. La régularisation de M_m est alors obtenue en déplaçant les nœuds avec l'amplitude calculée sur le maillage M_r, puisque tous les nœuds de M_m sont des noeuds de M_r. En résumé, la plupart des étapes de la formulation ALE sont effectuées sur le maillage de référence M_r, à l'exception de l'étape lagrangienne qui est effectuée sur le maillage mécanique M_m.

4. Conclusion

La méthode MMMP est un remède efficace pour les calculs multiphysiques coûteux. Elle offre des accélérations excellentes, par exemple sur un maillage de 53 500 nœuds, on a une accélération de 12. Un autre point fort de la méthode est sa capacité à fonctionner en parallèle; même sur un grand nombre de processeurs ; elle offre toujours une accélération par rapport à un calcul séquentiel, quelque soit le nombre de processeurs retenu..

Dans le cadre d'une formulation ALE, il est également possible d'utiliser la méthode MMMP. On s'attend à ce qu'elle offre des gains importants en terme de précision, tant sur la géométrie que sur le transport des champs, tout en conservant ses performances en termes de temps de calcul.

Références

[1] M. Ramadan, L. Fourment, H. Digonnet. A parallel two mesh method for speeding-up processes with localized deformations: application to cogging. International Journal of Material Forming, vol.2, no1, page581-page584, 2009.

[2] M.Ramadan. Une méthode MultiMaillages MultiPhysiques parallèle pour accélérer les calculs des procédés multiphysiques incrémentaux. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de paris, 2010.

[3] G. Hirt, R. Kopp, O. Hofmann, M. Frankze, G. Barton. Implementing a high accuracy Multi-Mesh Method for incremental Bulk Metal Forming. Cirp Annals-manufacturing Technology, vol. 56, n°1, pp. 313-316,2007.

[4] R. Li, On multi-mesh h-adaptive methods. Journal of Scientific Computing, vol. 24, n°3, pp. 321-341, 2005.

[5] P.J.G. Schreurs, F.E. Veldpaus, W.A.M. Brekelmans. Simulation of forming processes using the rbitrary Eulerian-Lagrangian formulation. Vol. 58, pp 227-245, 1986