



HAL
open science

Simulations lagrangienne et arbitraire lagrangienne eulérienne du procédé de profilage

Yanick Crutzen, Romain Boman, Luc Papeleux, Jean-Philippe Ponthot

► **To cite this version:**

Yanick Crutzen, Romain Boman, Luc Papeleux, Jean-Philippe Ponthot. Simulations lagrangienne et arbitraire lagrangienne eulérienne du procédé de profilage. 12e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01400455

HAL Id: hal-01400455

<https://hal.science/hal-01400455>

Submitted on 22 Nov 2016

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 Attribution 4.0 International License

Simulations lagrangienne et arbitraire lagrangienne eulérienne du procédé de profilage

Y. Crutzen¹, R. Boman¹, L. Papeleux¹, J.-P. Ponthot¹

¹ *LTAS-Computational Mechanics, University of Liège, 1 Chemin des chevreuils, Liège, B-4000, Belgium,
<http://www.ltas-mnl.ulg.ac.be/> {Y.Crutzen,R.Boman,L.Papeleux,JP.Ponthot}@ulg.ac.be*

Résumé — L'application du formalisme Arbitraire Lagrangien Eulérien (ALE) à la simulation numérique du procédé de profilage permet de calculer l'état espéré stationnaire du procédé de type continu en modélisant de manière efficace l'intégralité de la ligne grâce à un maillage quasi-Eulérien. Ce type de simulation sera comparée à l'approche classique en formalisme Lagrangien dans le cadre d'une application industrielle de profilage. Les performances de la parallélisation de l'algorithme ALE seront analysées dans l'état actuel des développements du code de calcul METAFOR.

Mots clés — Profilage, méthode éléments finis, formalisme ALE, calcul parallèle.

1 Introduction

Dans le secteur industriel, le profilage connaît un regain d'intérêt depuis la mise sur le marché de matériaux à haute limite d'élasticité. Le procédé s'affranchit de problèmes rencontrés avec les procédés classiques de la mise en forme avec ces nouveaux matériaux (déchirement de la tôle, formabilité limitée, retour élastique accru, puissance des machines, etc.). Le profilage est un procédé dispensant une bonne productivité de masse de produits à forme complexe.

Dans un procédé de profilage, le matériau est mis en forme dans des stations d'outillages successives jusqu'à ce que la section-droite désirée soit obtenue. La forme imposée au droit de chaque station est représentée par la fleur de profilage.

Les outils de simulation par éléments finis entendent jouer un rôle essentiel à la conception d'une ligne de profilage. Cependant, les simulations de profilage sont généralement coûteuses en temps de calcul, ce qui nuit à leur recours systématique pour la résolution de problèmes. De surcroît, ces simulations sont restreintes, dans la littérature scientifique, à de simples cas et à la mise en forme de type feuille-à-feuille.

Dans ce contexte, le formalisme Arbitraire Lagrangien Eulérien (ALE) permet la simulation du procédé de profilage de type continu en couvrant la ligne de profilage dans son intégralité — par opposition au procédé feuille-à-feuille simulé par une approche Lagrangienne — avec un coût CPU raisonnable grâce à un maillage quasi-stationnaire. Toutefois, la modélisation de la ligne entière reste conséquente. Le calcul parallèle permet dès lors de réduire drastiquement le coût de calcul des simulations.

Ces développements ont été implémentés dans METAFOR [7], le code implicite par éléments finis du service MN2L du département d'Aérospatiale & Mécanique de l'Université de Liège en Belgique, en vue de simuler le procédé pour des lignes de profilage de taille industrielle.

2 Modèle de profilage en formalisme Lagrangien

Une simulation en formalisme Lagrangien correspond au passage d'une tôle initialement plate de longueur donnée au travers de chacune des stations d'outillages de la ligne de profilage. Le déroulement est représenté à la Figure 1 pour la mise en forme d'un bavolet (un exemple de Copra RF [4]). Vu la longueur de tôle limitée par comparaison à la dimension de la ligne de profilage, cette simulation se veut représentative d'un procédé de type feuille-à-feuille mais pas nécessairement de type continu puisque la tôle n'est pas en prise dans toutes les stations. Par ailleurs, plusieurs difficultés peuvent être énoncées :

- Un maillage fin et uniforme tout au long de la direction de profilage est nécessaire pour obtenir à

la fois des résultats précis sur la section de mesures à mi-longueur de la bande et de bonnes prises de contact avec les outillages. La taille du modèle croît ainsi rapidement avec la longueur de tôle, menant à des temps CPU importants.

- Des conditions aux limites artificielles sont nécessaires pour permettre l’engagement de la bande dans la première tête et le désengagement du profilé de la dernière tête de la machine.
- Des conditions de contact sévères peuvent être rencontrés lors de chaque passe de mise à forme. La tôle peut parfois percuter sévèrement des outillages sans parvenir à s’engager dans la station suivante si la ligne n’est pas originellement conçue pour un procédé de type feuille-à-feuille.
- Le premier contact de la bande initialement plate avec les outillages peut conduire à des vibrations en raison de sa faible raideur structurale. Le calcul inutile de ces vibrations s’accompagne d’une réduction parfois sévère de la taille du pas de temps, occasionnant des temps CPU conséquents.
- Tous les nœuds de la surface de la tôle peuvent être en contact avec n’importe quel outil, conduisant à une coûteuse détection du contact.
- Le choix de la longueur de tôle ainsi que les jeux d’outillages conditionnent le glissement de la tôle au cours du procédé et, partant, la vitesse de profilage si elle résulte de la seule action du frottement avec les outillages tournants. Le désengagement de la tôle hors de la profileuse peut de ce fait poser problèmes.

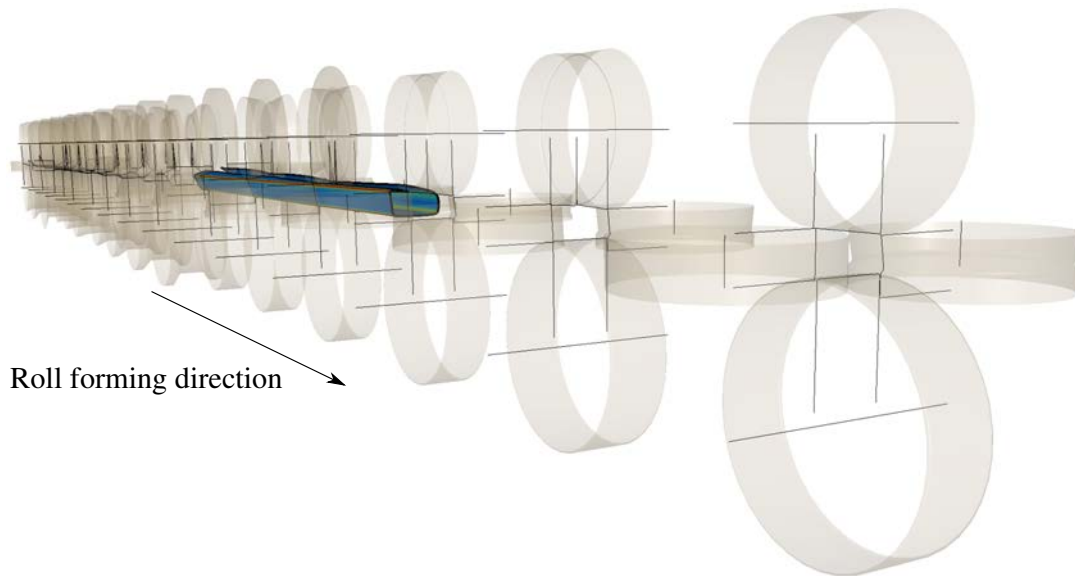


FIGURE 1 – Déroulement d’une simulation Lagrangienne de profilage pour la mise en forme d’un bavolet (comme proposé dans [4]) avec la méthode de type feuille-à-feuille en utilisant METAFOR

3 Modèle de profilage en formalisme Arbitraire Lagrangien Eulérien (ALE)

Le principe du formalisme ALE [5] consiste à découpler le mouvement du maillage de celui de la matière. Dans METAFOR, le schéma de résolution ALE repose sur une méthode de “split” d’opérateurs. En d’autres termes, un pas de temps se divise en deux sous-pas successifs : un pas classique Lagrangien où matière et maillage avancent de manière liée, suivi, une fois l’équilibre vérifié, par un pas Eulérien. Ce pas Eulérien se décompose en une opération de remaillage à topologie fixe (Rezoning) suivi du transfert des données entre les deux maillages (Convection). Les méthodes de Rezoning et de Convection implémentées dans METAFOR sont détaillées dans les références [2, 3].

Dans le cadre du procédé de profilage, le formalisme ALE permet la recherche de l’état stationnaire d’un procédé continu. Le maillage est globalement fixe dans la direction de profilage mais libre dans les directions transverses (voir Figure 2). Le domaine ALE est délimité par des frontières Eulériennes en amont et en aval de la profileuse où le flux de matière est imposé.

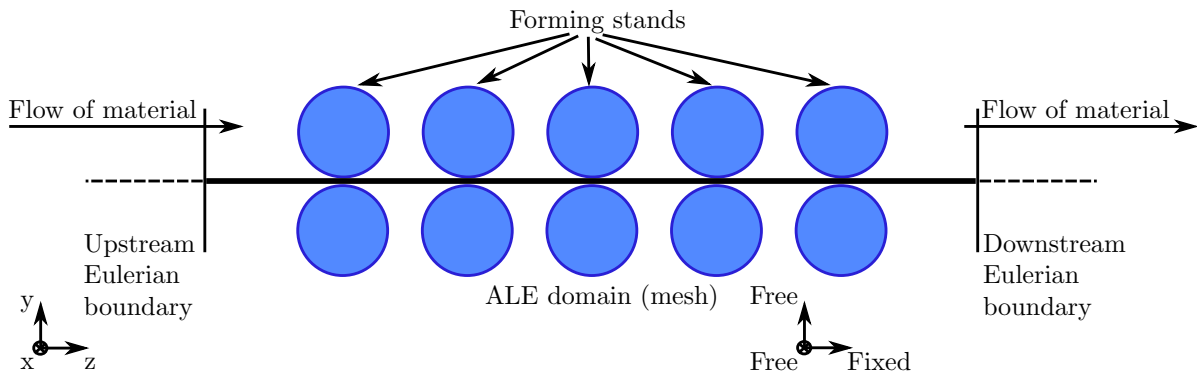


FIGURE 2 – Gestion du maillage dans le modèle de profilage en formalisme ALE

La configuration initiale du maillage, en prise dans les outillages, est un élément décisif pour un modèle ALE efficace et général. Un exemple est représenté à la Figure 3. Ce maillage est construit automatiquement par une “interpolation” transfinie entre les différents profils, issus de la fleur de profilage, placés à hauteur de la station d’outillages correspondante. Le maillage 3D est interpolé entre les sections via des splines cubiques.

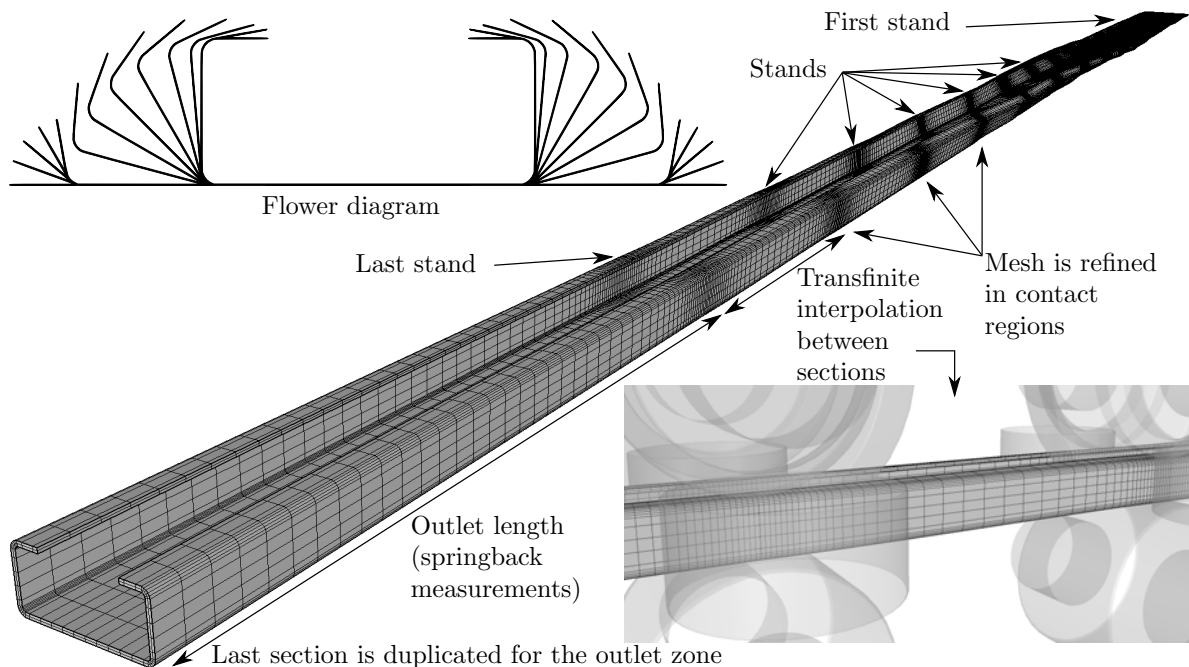


FIGURE 3 – Construction du maillage ALE initial à partir d’une fleur de profilage donnée — Cas-test *Channel* (un exemple de Copra RF [4])

L’état stationnaire d’un bavolet (un exemple de Copra RF [4]) est représenté à la Figure 4. Cette solution est obtenue suite à un déplacement convectif total de la matière égal à 1.2 fois la longueur de bande du maillage.

Les avantages du formalisme ALE pour la simulation d’un procédé de profilage sont multiples :

- Il est représentatif d’un procédé de profilage de type continu : le maillage de la bande s’étend sur l’intégralité de la ligne de profilage et est ainsi en prise simultanément dans tous les outillages de la ligne complète (voir Figure 4).
- Le modèle s’affranchit de tout pilotage de tôle par un système complexe de conditions aux limites, comme développé pour le modèle de profilage Lagrangien.
- Les chocs de la tôle Lagrangienne en entrée de chaque station d’outillages, responsables d’une détérioration des performances en temps de calcul, voire d’un échec de convergence, sont éliminés dans l’approche ALE.

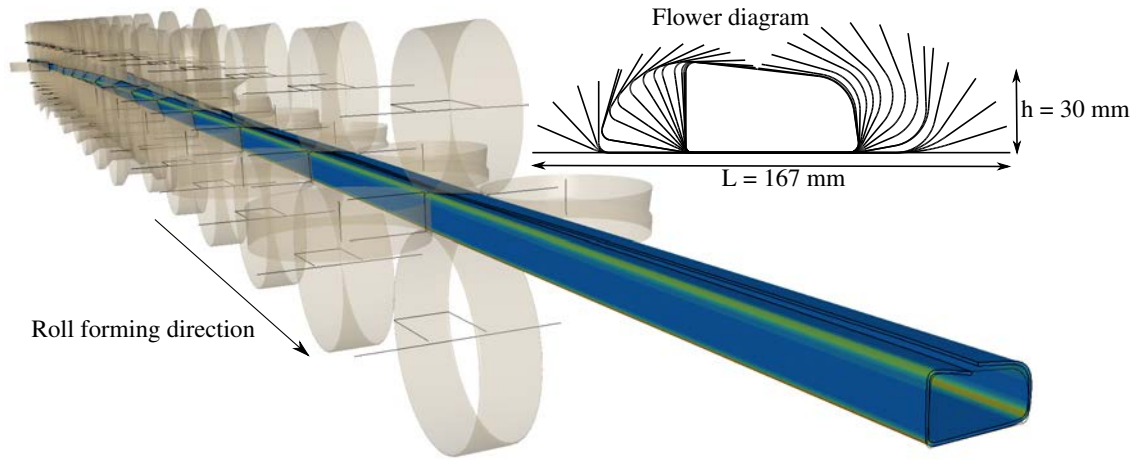


FIGURE 4 – Etat final stationnaire en formalisme ALE d’un bavolet (comme proposé dans [4]) avec la méthode de type continu en utilisant METAFOR

- Le maillage étant quasi-stationnaire, seul un maillage raffiné limité aux zones sensibles est nécessaire, tel que les zones de contact de la tôle avec les outils clairement délimitées dans un procédé de profilage, pour améliorer la qualité de la solution (voir Figure 3).
- Chaque nœud de la tôle maillée n’est potentiellement en contact qu’avec un seul outil, épargnant du temps de calcul dans le coûteux algorithme de détection du contact.

4 Exemple numérique

Pour la présente application, un bavolet non-symétrique est mis à forme dans 16 stations d’outillages distantes chacune de 350 mm, portant la longueur totale de la machine à 5600 mm. Nous avons précédemment démontré dans la référence [1] la faisabilité de simuler cette application industrielle en utilisant le formalisme ALE. En revanche, nous avons fait état de sévères problèmes de contact rencontrés avec le formalisme Lagrangien, empêchant d’obtenir les résultats finaux désirés. Désormais, une stratégie d’introduction de la tôle dans les outillages problématiques est mise au point. Dans un premier temps, les outillages pour lesquels des soucis d’engagement ont été observés sont ouverts de manière à permettre l’engagement de la bande dans la station (voir Figure 5b). Dans un second temps, ces outillages sont ramenés à leur position initiale de manière à mettre en forme la bande conformément à nos attentes (voir Figure 5c). Dès lors, dans le présent article, une comparaison de résultats Lagrangien et ALE est présentée.

4.1 Paramètres des modèles

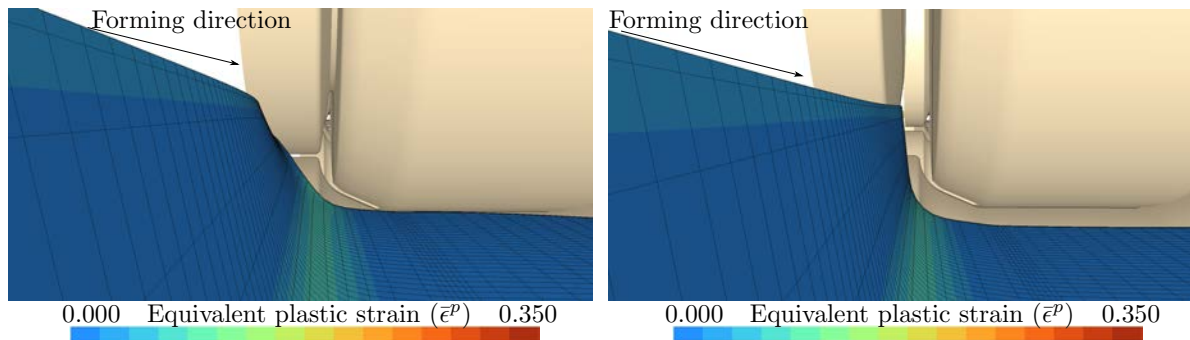
Le matériau est un acier DP980, avec un module de Young $E = 210$ GPa et un coefficient de Poisson $\nu = 0.3$, caractérisé par une loi d’érouissage isotrope de type Swift selon l’équation (1).

$$\sigma_y = 1626(0.00487 + \bar{\epsilon}^p)^{0.17} \quad (1)$$

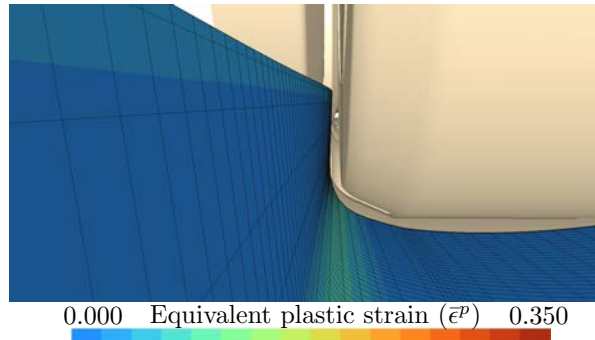
Pour le modèle ALE, le frottement de la bande avec les outillages tournants est pris en compte avec un coefficient de Coulomb $\mu = 0.2$ et la longueur de la bande est de 6150 mm.

Concernant le modèle Lagrangien, un contact sans frottement est supposé par simplicité. Les outillages sont déplacés le long de la bande (longueur = 1060 mm $\approx 3x$ distance inter-tête) et un déplacement nul est imposé en ses extrémités amont et aval dans la direction de profilage.

Les paramètres de maillage sont repris au Tableau 1. Des paramètres de densité de maillage consistants entre les deux modèles sont adoptés. Le modèle Lagrangien comporte 35280 éléments finis et le modèle ALE 73226. Il est à noter que, dans le cadre du présent travail, aucune analyse de sensibilité aux paramètres numériques n’a été menée. Seule une qualité espérée suffisante des résultats en des temps de calcul acceptables a été privilégiée.



(A) Problème : l'extrémité du flanc gauche percute sévèrement (B) Solution : dans un premier temps, l'outil supérieur est l'outil supérieur, ne mettant pas en forme la tôle conformément écarté selon son axe de rotation, permettant un engagement plus aisé de la bande.



(C) Solution : dans un second temps, l'outil supérieur revient à sa position originelle, en emboutissant la bande conformément à nos attentes.

FIGURE 5 – Conditions de contact complexes à la station #7 – Mise à forme d'un bavolet (modèle Lagrangien)

TABLE 1 – Paramètres des maillages Lagrangien et ALE

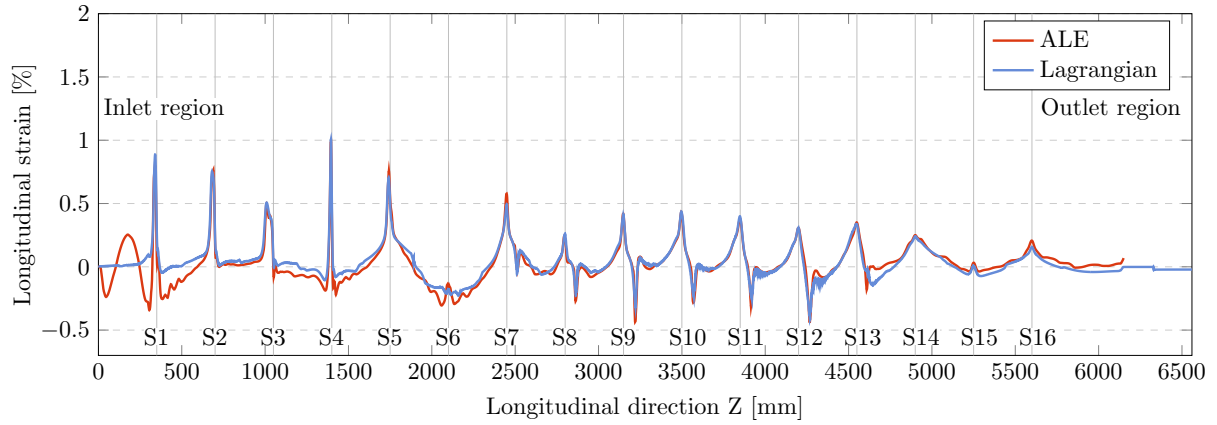
		Lagrangien	ALE
Nombre d'éléments dans l'épaisseur		2	2
Maillage dans la direction de profilage :			
Taille des mailles loin des outils	[mm]	3	15
Taille des mailles près des outils	[mm]	(3)	3
Maillage dans la direction transverse :			
Taille des mailles de fond	[mm]	6	6
Nombre d'éléments dans les plis		5	5
Longueur de bande		$0.19L_{\text{machine}}$	$1.10L_{\text{machine}}$

En ce qui concerne les paramètres numériques des modèles, nous pouvons citer une intégration dynamique implicite de type Chung-Hulbert, un algorithme de contact de type pénalité et des éléments finis de type EAS (Enhanced Assumed Strain).

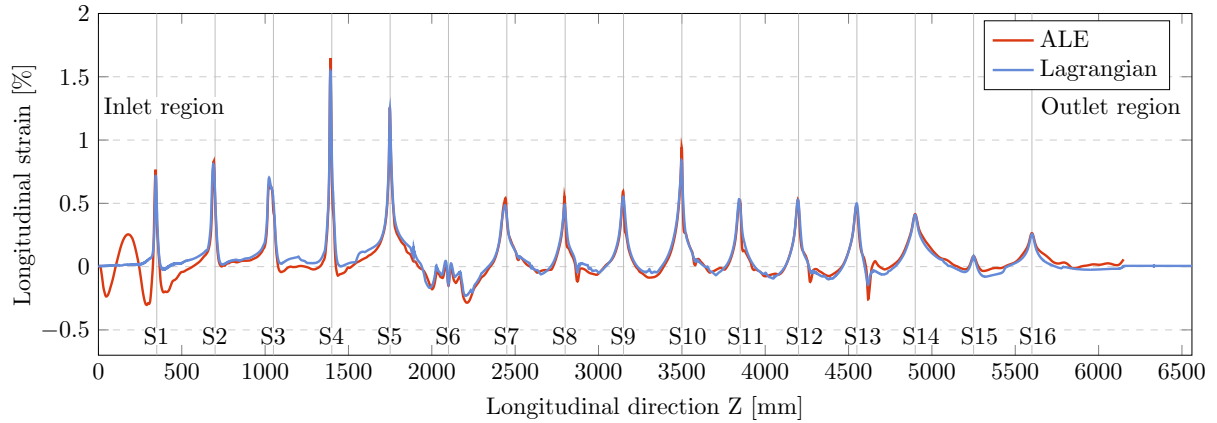
4.2 Résultats et discussion

La déformation longitudinale de Green-Lagrange des deux rives selon la direction de profilage est représentée à la Figure 6. Les résultats Lagrangien et ALE sont très similaires. Les pics Lagrangien et ALE sont reproduits avec une acuité et une amplitude très proches.

En ce qui concerne la forme finale de section droite après retour élastique (voir Figure 7), les modèles numériques fournissent des différences légères entre eux. Les sections droites se superposent, à l'exception du flanc gauche. En comparaison de la forme désirée, la forme finale affiche un retour élastique notable puisque la soudure fermant le profil n'est pas modélisée. Les rayons des plis inférieurs sont similaires mais plus grands que ceux désirés.



(A) Rive gauche



(B) Rive droite

FIGURE 6 – Déformation longitudinale ϵ_{ZZ}^{GL} (face supérieure) selon la direction de profilage

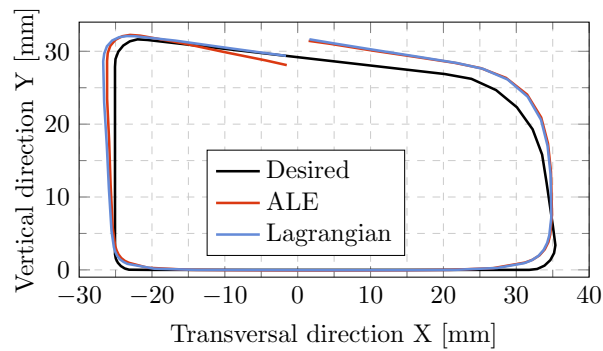


FIGURE 7 – Forme finale de la section droite après retour élastique

5 Calcul parallèle

5.1 Implantation du parallélisme dans METAFOR

Le parallélisme implanté dans METAFOR est de type SMP (Shared-Memory Parallelism). La Figure 8 montre schématiquement l'algorithme d'une intégration temporelle implicite en formalisme ALE dans METAFOR. Celui-ci comporte 7 parties principales consommant du temps de calcul (preprocessing, détection du contact, calcul des forces, calcul de la matrice de raideur tangente, résolution du système linéaire, repositionnement des nœuds et convection ALE). Le calcul des forces internes, externes et d'inertie, le calcul de la matrice de raideur tangente et la convection ALE sont parallélisés avec la bibliothèque Intel Threading Building Blocks (Intel TBB) [8]. Le solveur linéaire utilisé est le solveur

direct Pardiso [6, 9] pour son efficacité. Il est interfacé dans METAFOR au travers des bibliothèques Intel MKL/BLAS et est aussi parallélisé. Enfin, il est important de noter que les routines de preprocessing, de détection du contact et de repositionnement des nœuds sont purement séquentielles et donc les temps de calcul associés sont, à ce stade, incompressibles.

5.2 Résultats et discussion des performances numériques

L'évolution du speedup en fonction du nombre de threads est représentée à la Figure 9 pour une simulation ALE de profilage représentative d'une machine de taille industrielle. La distribution du temps d'horloge parmi les différentes sections du code est représentée, en particulier pour 1 et 12 threads, sur les diagrammes à la Figure 10. Les remarques suivantes peuvent être formulées :

- Le speedup ne croît pas de manière monotone avec le nombre de threads. Au-delà de 6 threads, une chute sévère suivie par une recroissance des courbes peut être remarquée, dégradant nettement l'efficacité parallèle. Elle s'explique par l'architecture NUMA du nœud de calcul.
- La valeur maximale du speedup global est de 4.5. Les performances ne sont donc pas remarquables mais l'ensemble de l'algorithme n'étant pas à ce stade parallèle, elles sont déjà appréciables.
- Le pas eulérien pèse lourdement sur le bilan, en raison notamment de la phase de repositionnement des nœuds exécutée de manière purement séquentielle. Cette phase de repositionnement des nœuds limite sévèrement l'efficacité globale. D'autre part, malgré une efficacité raisonnable obtenue pour la convection ALE, son coût reste important. Le temps de calcul se chiffre en effet à 41.3% pour une simulation réalisée sur 12 threads, contre 65.8% avec un seul thread, et occupe ainsi la partie la plus dominante.
- On peut se féliciter de l'efficacité tenue jusqu'à 6 threads pour le calcul des forces internes et de la matrice de raideur tangente puisque le speedup pour 6 threads a respectivement une valeur de 5.42 et 5.47. Le speedup maximal atteint pour sa part respectivement une valeur de 9.66 et 10.53. La résolution du système et la convection ALE affichent des performances plus en retrait en termes d'efficacité parallèle. Le speedup maximum se chiffre respectivement à 7.50 et 7.16. En revanche,

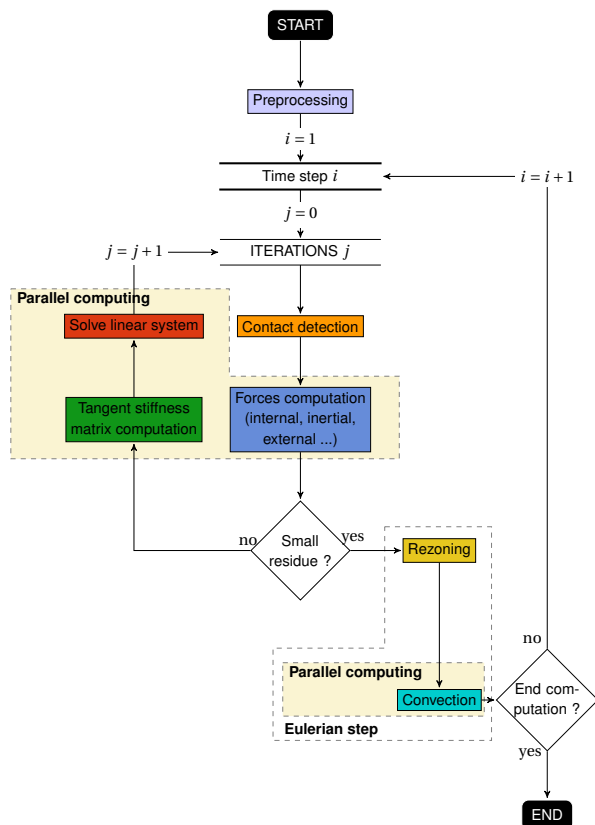


FIGURE 8 – Diagramme d'intégration temporelle impli- cite en formalisme ALE

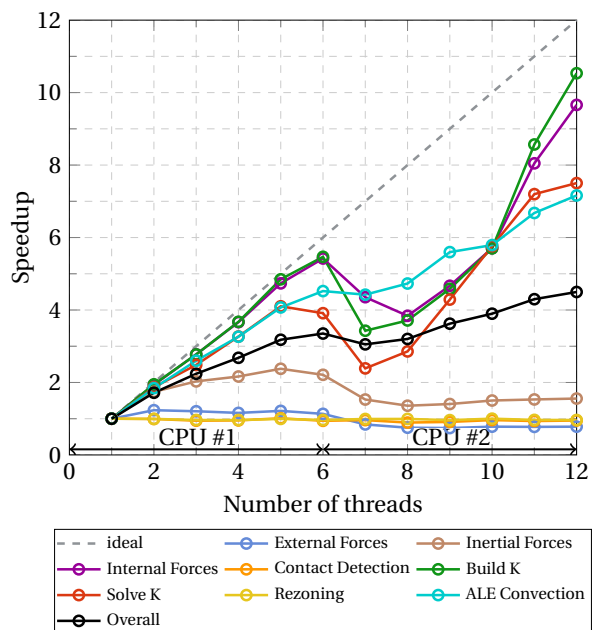


FIGURE 9 – Performances du parallélisme en forma- lisme ALE : évolution du speedup en fonction du nombre de threads

les résultats de speedup concernant le calcul des forces externes et d’inertie sont insatisfaisants. Le speedup atteint en effet rapidement un plateau — même un ralentissement avec un nombre de threads supérieur à 6 pour le calcul des forces externes. Les temps de calcul de ces deux phases de l’algorithme étant marginaux (0.85% et 0.76% du temps global pour 12 threads), les faibles performances en parallélisme associées n’abaissent pas significativement le speedup global. Enfin, grâce à la forte réduction du nombre d’éléments de contact permise par le maillage quasi-Eulérien, la détection du contact opérée à ce jour séquentiellement dans METAFOR ne pénalise pas sévèrement les temps de calcul puisqu’elle en occupe seulement 1.35% en utilisant 12 threads.

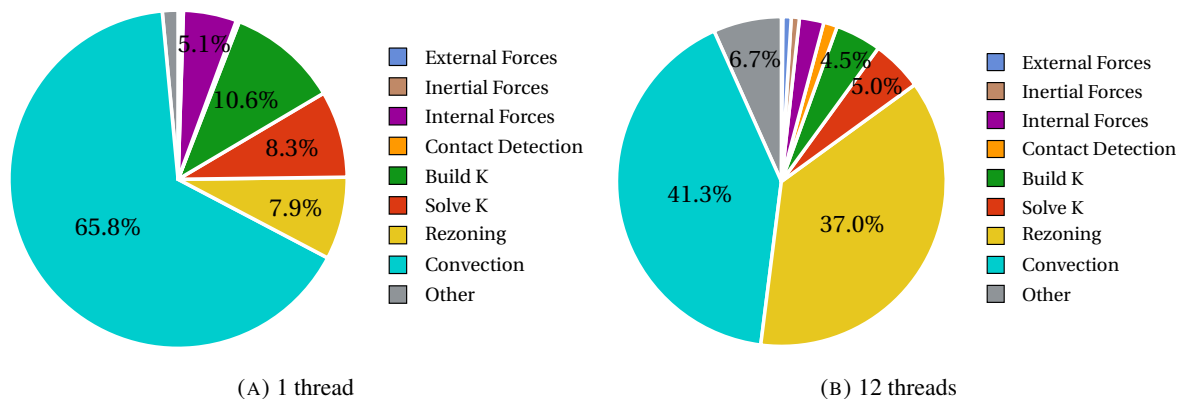


FIGURE 10 – Distribution du temps d’horloge pour un modèle ALE de profilage en fonction du nombre de threads utilisés

6 Conclusions et perspectives

Les avantages et inconvénients inhérents aux approches Lagrangienne et ALE dans le cadre de la simulation du procédé de profilage ont été discutés. L’application du formalisme ALE à la simulation numérique du procédé de profilage de type continu permet le calcul efficace et relativement aisé de l’état final espéré stationnaire du procédé en couvrant la ligne de profilage dans son intégralité. Par ailleurs, le parallélisme implanté à ce stade dans METAFOR permet une réduction notable des coûts de calcul. En perspectives, nous poursuivrons le travail de parallélisation puisque des progrès importants sont de toute évidence encore possibles.

Références

- [1] R. Boman, J.-P. Ponthot. *Continuous roll forming simulation using arbitrary Lagrangian Eulerian formalism*, Key Engineering Materials, 473 :564–571, 2011.
- [2] R. Boman, J.-P. Ponthot. *Efficient ALE mesh management for 3D quasi-Eulerian problems*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 92(10) :857–890, 2012.
- [3] R. Boman, J.-P. Ponthot. *Enhanced ALE data transfer strategy for explicit and implicit thermomechanical simulations of high-speed processes*, International Journal of Impact Engineering, 53(0) :62–73, 2013, Special issue based on contributions at the 3rd International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures.
- [4] data M Sheet Metal Solutions GmbH, COPRA RF. <http://www.datam.de/en/products-solutions/roll-forming/>
- [5] J. Donea, A. Huerta, J.-P. Ponthot, A. Rodríguez-Ferran. *Encyclopedia of Computational Mechanics, Volume 1*, chapter 14, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [6] A. Kuzmin, M. Luisier, O. Schenk. *Fast methods for computing selected elements of the green’s function in massively parallel nanoelectronic device simulations*, Euro-Par 2013 Parallel Processing, Springer, 533–544, 2013.
- [7] METAFOR. <http://metafor.ltas.ulg.ac.be>
- [8] J. Reinders, *Intel threading building blocks : outfitting C++ for multi-core processor parallelism*, O’Reilly Media, Inc., 2007.
- [9] O. Schenk, K. Gärtner. *Solving unsymmetric sparse systems of linear equations with PARDISO*, Future Generation Computer Systems, Elsevier, 20(3) :475–487, 2004.