HAL
open science

Méthode d'immersion de pièces mobiles dans des fours industriels

Jean-François Zaragoci, Elie Hachem, Ghina Jannoun, Jérémy Veysset, Thierry Coupez

To cite this version:

Jean-François Zaragoci, Elie Hachem, Ghina Jannoun, Jérémy Veysset, Thierry Coupez. Méthode d'immersion de pièces mobiles dans des fours industriels. CSMA 2013 - 11ème colloque national en calcul des structures, May 2013, Giens, France. hal-00861812

HAL Id: hal-00861812

https://minesparis-psl.hal.science/hal-00861812

Submitted on 13 Sep 2013

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.

CSMA 2013
11e Colloque National en Calcul des Structures
13-17 Mai 2013

Méthode d'immersion de pièces mobiles dans des fours industriels

Jean-François ZARAGOCI [1] , Elie HACHEM [2], Ghina JANNOUN [3], Jérémy VEYSSET [4], Thierry COUPEZ [5]

1 MINES ParisTech, CEMEF, jean-francois.zaragoci@mines-paristech.fr
2 MINES ParisTech, CEMEF, elie.hachem@mines-paristech.fr
3 MINES ParisTech, CEMEF, ghina.el_jannoun@mines-paristech.fr
4 MINES ParisTech, CEMEF, jeremy.veysset@mines-paristech.fr
5 MINES ParisTech, CEMEF, thierry.coupez@mines-paristech.fr

Résumé — Le traitement thermique des pièces dans un four industriel reste un grand défi pour la simulation numérique. Hormis la prise en compte de la convection forcée, du rayonnement et de l'écoulement turbulent, il reste à traiter l'interaction entre gaz et solide d'une manière fiable. Nous proposons ici une méthode d'immersion de volume avec des objets mobiles, en utilisant une méthode d'adaptation de maillage anisotrope prédictif.
Mots clés — Maillage anisotrope adaptatif, Eléments finis, Transfert thermique, Pièces mobiles.

1. Introduction

Lors du chauffage ou du refroidissement de pièces dans des fours industriels, les phénomènes physiques mis en jeu sont complexes. Les différents procédés sont alors bien souvent calibrés grâce à l'expérience des opérateurs. Cependant, avec la progression continue des ressources de calcul et des modèles numériques, la simulation est devenue une méthode de choix pour optimiser les procédés. Une approche prometteuse par éléments finis qui permet de calculer les transferts thermiques par conduction, convection et rayonnement ainsi que la vitesse des écoulements considérés avec un modèle de turbulence approprié a récemment été proposée dans [2, 3]. Cette approche s'appuie sur la méthode par immersion de volume, qui consiste à calculer une fonction distance signée entre les pièces et les nœuds du domaine de calcul. A l'aide de cette distance, un maillage anisotrope et raffiné à la frontière des pièces est obtenu [1], ce qui permet une très bonne définition des interfaces en présence. Par la suite, les propriétés physiques des pièces et du four sont mélangées afin de résoudre un seul système d'équations sur l'ensemble du domaine.

Dans [3], la simulation d'un procédé de chauffage à l'intérieur d'un four industriel dure 4 jours sur 32 processeurs pour une durée physique de 5 minutes, ce qui rend très difficile les calculs pour des durées de plusieurs heures. Cette simulation est aussi coûteuse car le maillage éléments finis et le pas de temps restent fixes, ce qui est loin d'être optimal. Ainsi, des améliorations consistant à adapter le maillage et le pas de temps en cours de simulation ont été proposées afin de réduire le temps de calcul [4]. Une autre limitation de [3] est l'immobilité des pièces. En pratique, les pièces considérées dans les fours industriels peuvent être entraînées par un mouvement de rotation ou de translation le long de tapis roulants. Nous proposons donc ici une extension du travail présenté dans [3] pour des pièces mobiles.

Dans le cas de pièces fixes, un seul maillage est calculé avant de commencer la simulation et le coût de calcul associé à la détermination de la fonction distance et à ce maillage est bien plus faible que celui nécessaire à la simulation elle-même. Ce n'est plus le cas avec des pièces mobiles. En outre, adapter le maillage à chaque incrément, en plus d'être coûteux en temps de calcul, entraîne une multiplication des erreurs d'interpolation dû aux transports des champs physiques entre l'ancien et le nouveau maillages. Pour ces raisons, nous proposons dans ce papier une technique permettant

d'immerger un objet dans un domaine de calcul plus rapidement ainsi qu'une méthode pour obtenir un maillage adapté pour plusieurs incréments dans le cas d'objets mobiles.

Ce papier est articulé de la manière suivante. Nous montrons dans un premier temps un exemple de maillage obtenu avec la méthode de remaillage anisotrope employée. Par la suite nous expliquons comment cette technique de remaillage peut être utilisée pour un certain nombre d'incréments dans le cas de pièces mobiles, avant de détailler la nouvelle méthode de calcul de la distance signée, utilisée pour immerger des objets mobiles au sein d'un domaine de calcul.

2. Remaillage anisotrope

Un estimateur d'erreur basé sur un tenseur de distribution des longueurs d'arêtes a été développé dans [1]. En travaillant avec une métrique évaluée aux nœuds, une technique d'adaptation de maillage anisotrope a été obtenue sous la contrainte d'un nombre de nœuds fixé. Tous les détails techniques de la méthode et les équations correspondantes étant décrites dans [1] et [4], nous ne revenons pas dessus dans ce document.

Nous souhaitons seulement ici nous placer au niveau de l'utilisateur en démontrant la capacité de la méthode pour obtenir des maillages extrêmement raffinés et anisotropes dans les zones d'intérêt. Ainsi nous considérons un rectangle immergé dans un domaine de calcul. Nous calculons la distance signée entre ce rectangle et les nœuds du domaine de calcul. L'isovaleur zéro de cette fonction représente l'interface entre le rectangle immergé et le domaine de calcul. Le remaillage développé prend en argument une fonction et calcule l'erreur associée afin de placer un grand nombre d'éléments dans les zones où l'erreur est importante et très peu d'éléments dans les zones où l'erreur est faible. Pour le moment, la seule fonction calculée, la distance signée, possède en théorie une norme de son gradient unitaire sur l'ensemble du domaine. L'erreur est donc répartie sur tout le domaine et le remaillage basée sur une estimation de l'erreur est alors inutile. Afin de pouvoir représenter le contour de l'objet avec précision, il est nécessaire de procéder à un lissage de la distance signée, en utilisant la formule suivante [1] :

$$\phi(\vec{x}) = E \tanh\left(\frac{\alpha(\vec{x})}{E}\right) \qquad \textbf{(1)}$$

avec ϕ la distance signée lissée, que nous appellerons level set par la suite. α est la distance signée, E une épaisseur de lissage et $\vec{x}$ le vecteur position.

Le paramètre E permet de contrôler la pente et l'épaisseur de variation de la fonction utilisée pour l'estimation de l'erreur. Les autres paramètres importants donnés par l'utilisateur sont la taille minimale, afin de ne pas obtenir des éléments trop petits dans les zones où l'erreur est importante, la taille maximale, afin de ne pas obtenir des éléments trop grands dans les zones où l'erreur est nulle, ainsi que le nombre de nœuds. La figure 1 montre le maillage obtenu pour notre rectangle immergé.

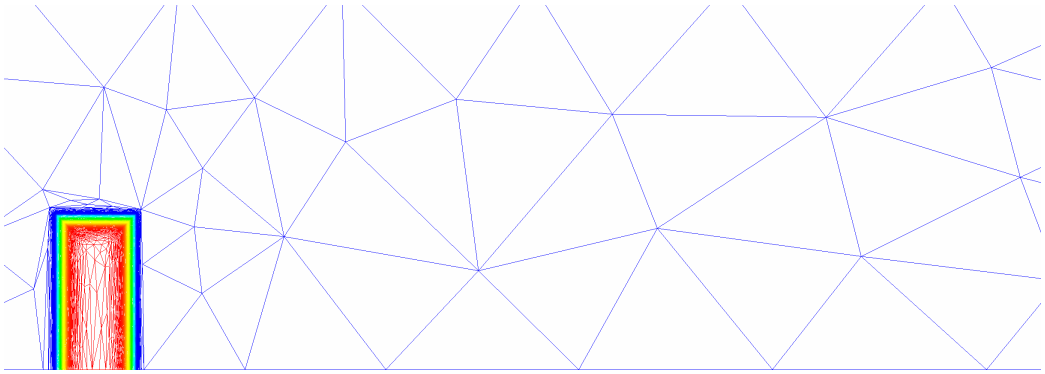

Fig. 1. Immersion d'un rectangle à l'intérieur d'un domaine de calcul.

La couleur représente la fonction level set. Celle-ci varie seulement dans un voisinage très proche de l'interface, ce qui nous permet d'avoir une très bonne représentation du contour de l'objet et une

différence importante de taille des éléments. Si nous désirons changer l'épaisseur de la zone finement remaillée, il nous faut modifier la valeur du paramètre E, comme cela a déjà été fait dans [1].

Il est difficile d'avoir une idée de l'anisotropie des éléments sur la figure 1. Pour cette raison, nous avons décidé de réaliser un agrandissement, montré sur la figure 2. Cette nouvelle figure nous montre, à gauche, le rectangle complet, au milieu, une partie du côté droit du rectangle et à droite, l'angle supérieur droit du rectangle. Sur le côté droit du rectangle, la fonction level set ne varie qu'en fonction de l'abscisse, son gradient est donc unidirectionnel et son erreur nulle suivant l'ordonnée. Par conséquent les éléments obtenus sont très étirés. Au contraire, près des angles, nous avons deux zones de maillage anisotropes d'orientation différentes qui se rejoignent et un gradient dans les deux directions, le maillage en devient donc isotrope, ce qui permet de représenter les angles avec précision.

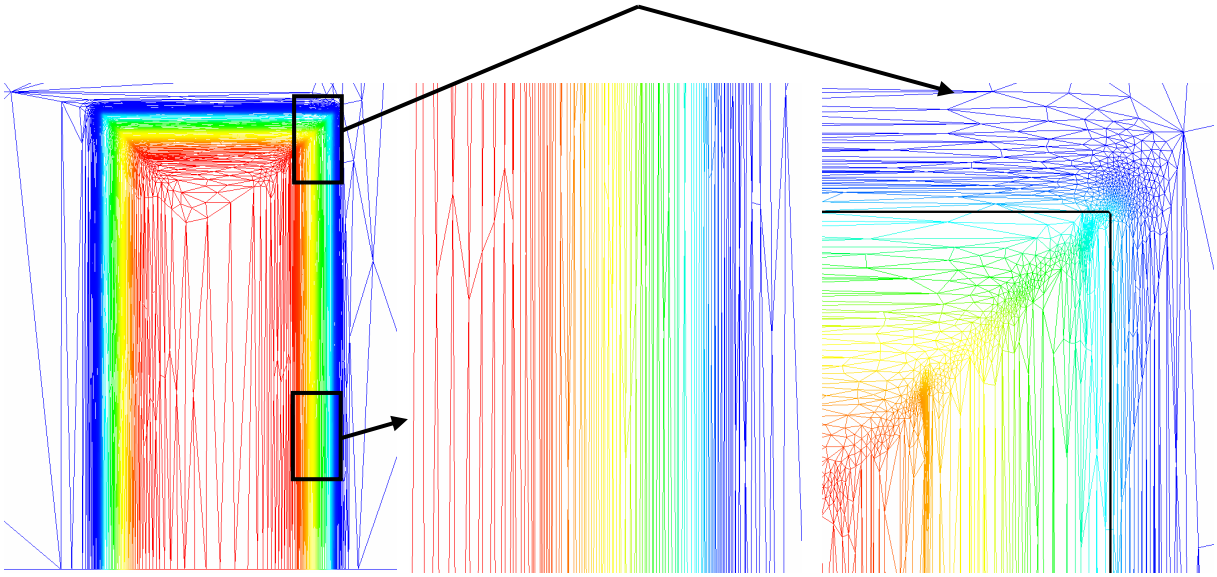

Fig. 3. Agrandissement de la figure 1 autour de l'interface.

3. Application à plusieurs fonctions level set

Dans les systèmes que nous souhaitons simuler, des fours industriels de grande dimension équipés de tapis roulants, la trajectoire et la vitesse des pièces est connue. Il est donc possible de connaître à l'avance les zones traversées par des interfaces. Nous avons alors le choix entre deux solutions extrêmes. La première consiste à utiliser un maillage raffiné sur une très faible épaisseur autour des pièces [2, 3]. Dans ce cas, il sera nécessaire de déterminer un nouveau maillage à chaque fois que les pièces sont déplacées. Chacune de ces étapes (remaillage et calcul de la nouvelle fonction level set) nécessite malheureusement un temps de calcul important. D'un autre côté, nous pouvons aussi considérer un seul maillage pour l'ensemble de la simulation. Cela permet d'éviter le coût de calcul associé aux remaillages. Pour obtenir une précision satisfaisante, il est cependant nécessaire d'avoir une faible taille de maille sur l'ensemble des zones successivement traversées par les interfaces entre les pièces et le four, ce qui peut impliquer un nombre de nœuds très important, en particulier si la position finale des pièces est très éloignée de leur position initiale. Cette deuxième solution n'est donc elle non plus pas optimale.

Jusqu'à présent, le remaillage anisotrope par estimation d'erreur n'a été appliqué que sur un seul champ. Il est pourtant nécessaire de pouvoir l'appliquer sur plusieurs grandeurs physiques. Par exemple dans [3], l'obtention d'un maillage satisfaisant pour obtenir un bon rapport entre la précision de la simulation et le temps de calcul pourrait s'appuyer sur des estimations de l'erreur associées à la température, aux différentes composantes de la vitesse et aux fonctions level set de chaque objet. Dans ce cas, un champ de métrique serait obtenu par fonction utilisée, et il faudrait procéder à l'intersection de ces métriques [5]. Une solution plus élégante, permettant d'éviter l'étape d'intersection des métriques, est introduite dans [4]. Elle consiste à regrouper les différentes fonctions nécessaires au remaillage dans un vecteur et à directement appliquer le calcul de l'erreur sur ce vecteur, en utilisant une norme pour obtenir une métrique, qui va prendre en compte toutes les fonctions. Un exemple est

donné dans [4] pour une application bidimensionnelle de cavité entraînée avec un remaillage par estimation de l'erreur associée aux deux composantes de la vitesse et à sa norme.

Afin de combiner les avantages des deux approches évoquées ci-dessus (un remaillage à chaque incrément et pas de remaillage du tout) et de limiter leurs inconvénients, nous proposons d'utiliser ici une solution intermédiaire, en remaillant de manière prédictive notre domaine de calcul. Nous utilisons ainsi un maillage raffiné permettant de décrire précisément les interfaces pour plusieurs incréments. Pour cela, nous construisons un vecteur constitué des fonctions level set associées aux positions successives occupées par l'objet. Lorsque cet objet arrive vers la fin de la zone maillée finement, un remaillage est alors appliqué. La figure 3 montre les trois types de maillages décrits pour considérer une pièce en mouvement. Cette pièce est un cercle de rayon 15 cm contenu dans un domaine carré de côté 1 m et tournant autour du centre du domaine. Ces maillages ont été obtenus grâce à l'estimateur d'erreur développé dans [1]. A gauche de la figure est représenté un maillage fixe adapté à l'ensemble du mouvement du cercle, tandis que le maillage de droite est seulement raffiné sur une très faible épaisseur autour de l'interface, ce qui nécessitera des remaillages très fréquents. Le milieu de la figure 3 montre quant à lui la solution adoptée, pour laquelle l'épaisseur de la zone remaillée finement et la fréquence de remaillage sont limitées. La position initiale du cercle est montrée en haut de la figure. Au milieu et en bas, le cercle est montré au cours de sa rotation, pour des temps croissant de haut en bas. Nous constatons que pour le temps intermédiaire, aucun remaillage n'a encore été effectué pour notre méthode prédictive.

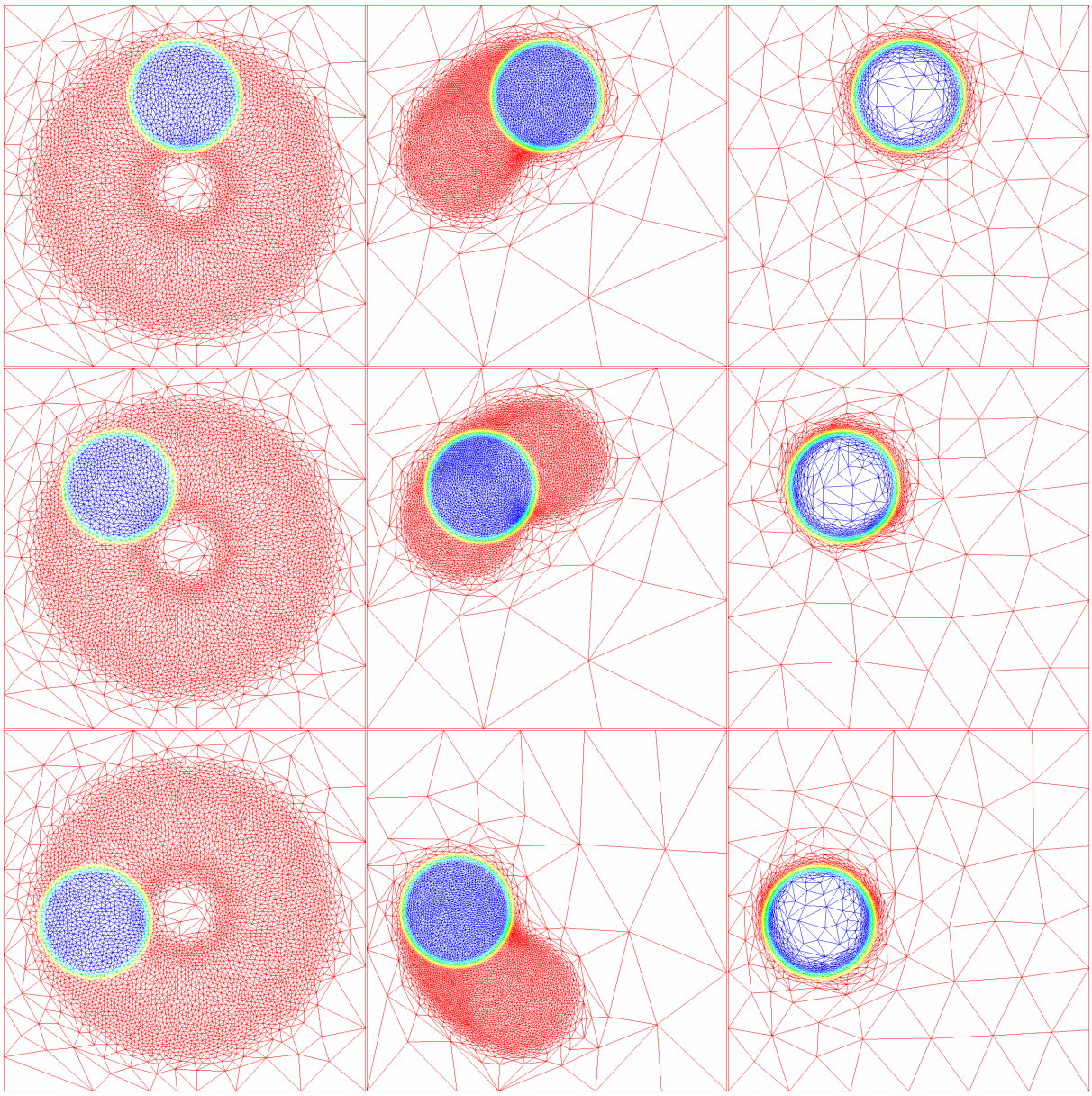

Fig. 3. Rotation d'un cercle pour différents temps et différentes méthodes de remaillage.

4. Calcul de la distance

De manière générale, nous souhaitons pouvoir immerger dans les fours industriels des objets de géométrie complexe et qui ne possèdent pas de forme analytique. Un tel objet est défini par un maillage surfacique constitué d'une suite de segments pour une application en deux dimensions et d'une suite de facettes triangulaires pour une application en trois dimensions. Pour résoudre les équations de conservation dans le contexte monolithique que nous utilisons, il nous faut déterminer la distance signée à cet objet sur les nœuds du domaine de calcul. La méthode utilisée pour ce faire est décrite dans [6] et nous l'expliquons succinctement ci-dessous.

Pour déterminer la distance entre l'objet à immerger et un nœud du domaine de calcul, nous pouvons calculer la distance entre le nœud et chaque facette du maillage surfacique. La valeur minimale correspond donc à la distance recherchée. Le signe de la fonction distance, qui permet de savoir si le nœud est situé à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet, est obtenu grâce à l'orientation de la facette la plus proche. Répétée pour chaque nœud, cette technique, que nous qualifions de linéaire, permet donc d'obtenir la distance signée sur l'ensemble du domaine de calcul. Elle est simple à utiliser mais nécessite un temps de calcul très important lorsque les maillages surfaciques et volumiques contiennent respectivement plusieurs millions de facettes triangulaires et de nœuds.

Afin d'éviter cet inconvénient majeur, l'algorithme employé utilise le constat selon lequel la distance entre un nœud et des facettes qui en sont très éloignées n'est pas nécessaire à calculer précisément par rapport à celle entre ce même nœud et des facettes qui en sont très proches. Pour éviter des calculs superflus, nous nous servons ainsi d'un système de boîtes hiérarchiques [6]. Nous utilisons une grande boîte englobant le domaine de calcul. Cette dernière est divisée en plusieurs sous-boîtes de taille identique (4 en deux dimensions et 8 en trois dimensions) qui vont chacune contenir un certain nombre de facettes du maillage surfacique. Ces boîtes sont elles-mêmes divisées en d'autres boîtes plus petites, et ainsi de suite, jusqu'à ce que les plus petites boîtes contiennent un nombre de facettes inférieur à une valeur fixée par l'utilisateur. Une fois toutes les boîtes créées et les facettes réparties à l'intérieur, une boucle est effectuée sur chaque nœud du maillage volumique considéré. Les boîtes étant un pavé en trois dimensions ou un rectangle en deux dimensions, les distances minimale et maximale entre un nœud et une boîte sont facilement calculées, ce qui permet d'éliminer du calcul un grand nombre de boîtes ne pouvant contenir la facette la plus proche. Comme pour la méthode linéaire, un calcul de distance est effectué entre le nœud et les facettes restantes.

La figure 4 nous montre la représentation hiérarchique associée à un maillage surfacique de 257 arêtes. A gauche, le nombre maximal d'arêtes est de 32 et il est de 16 à droite. Le temps de calcul associé au calcul de la distance signée sur un maillage de presque 10 000 nœuds est de 0,26 s avec 32 arêtes, de 0,25 s avec 16 arêtes et de 1,01 s avec la méthode linéaire. Nous constatons déjà une accélération appréciable sur ce cas simple en deux dimensions et elle devient beaucoup plus importante pour des cas en trois dimensions [7].

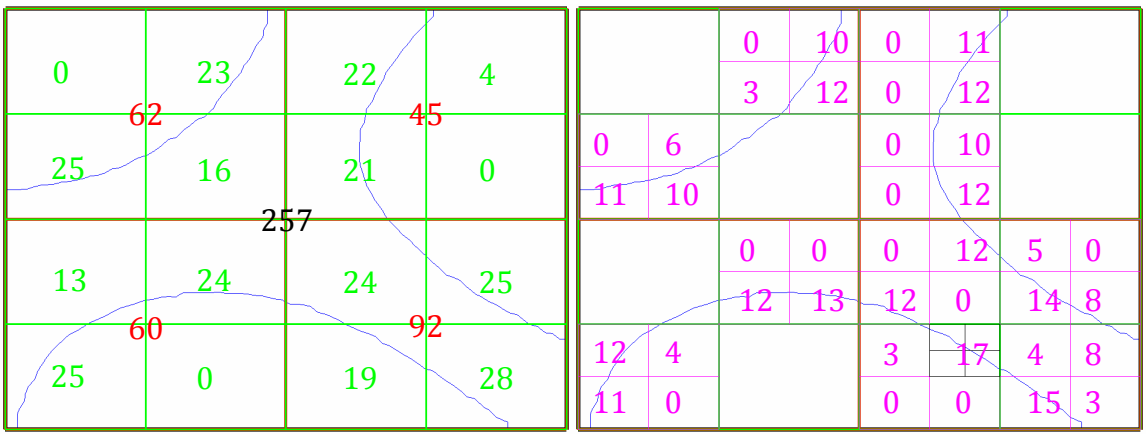

Fig 4. Représentation hiérarchique du maillage surfacique. Les chiffres indiqués correspondent au nombre de segments du maillage surfacique contenus dans chaque boîte. A gauche le nombre d'arêtes maximal est de 32 et il est de 16 à droite.

Dans [3], la level set associée à l'objet immergé est déterminée une seule fois au début de la simulation numérique. Ainsi le temps de calcul correspondant est négligeable en comparaison du temps total de simulation. Cependant, ce n'est plus le cas pour des applications avec des objets mobiles. En effet, même en utilisant la méthode de localisation hiérarchique décrite ci-dessus, recalculer la fonction level set à chaque déplacement de l'objet devient relativement coûteux. Nous avons donc mis au point une nouvelle méthode pour limiter le coup de calcul associé à la détermination de la fonction level set pour des objets mobiles.

Pour nos simulations et comme vu précédemment, la fonction utilisée est une fonction lissée (level set) [1] dont la valeur absolue maximale est atteinte dans un voisinage assez proche de l'interface de l'objet étudié. Il est ainsi inutile de calculer la distance signée loin de l'objet. Nous profitons de cet aspect pour utiliser un maillage volumique associé à l'objet, de dimension légèrement plus grande que l'objet considéré et sur lequel nous calculons pour chaque nœud la distance signée à l'objet. Le maillage, initialement isotrope et homogène est progressivement raffiné de manière anisotrope dans le voisinage du contour de l'objet. Une fois qu'il est jugé suffisamment fin à l'interface, nous avons obtenu le maillage de référence pour la forme associée, pour lequel la distance est calculée précisément au voisinage de l'interface. Sur la figure 5, nous avons représenté à gauche un maillage surfacique associée à un profil de type NACA, ainsi que le maillage de référence correspondant à droite, avec deux plans de coupe qui illustrent la finesse du maillage et l'étirement des éléments au niveau du contour de l'objet.

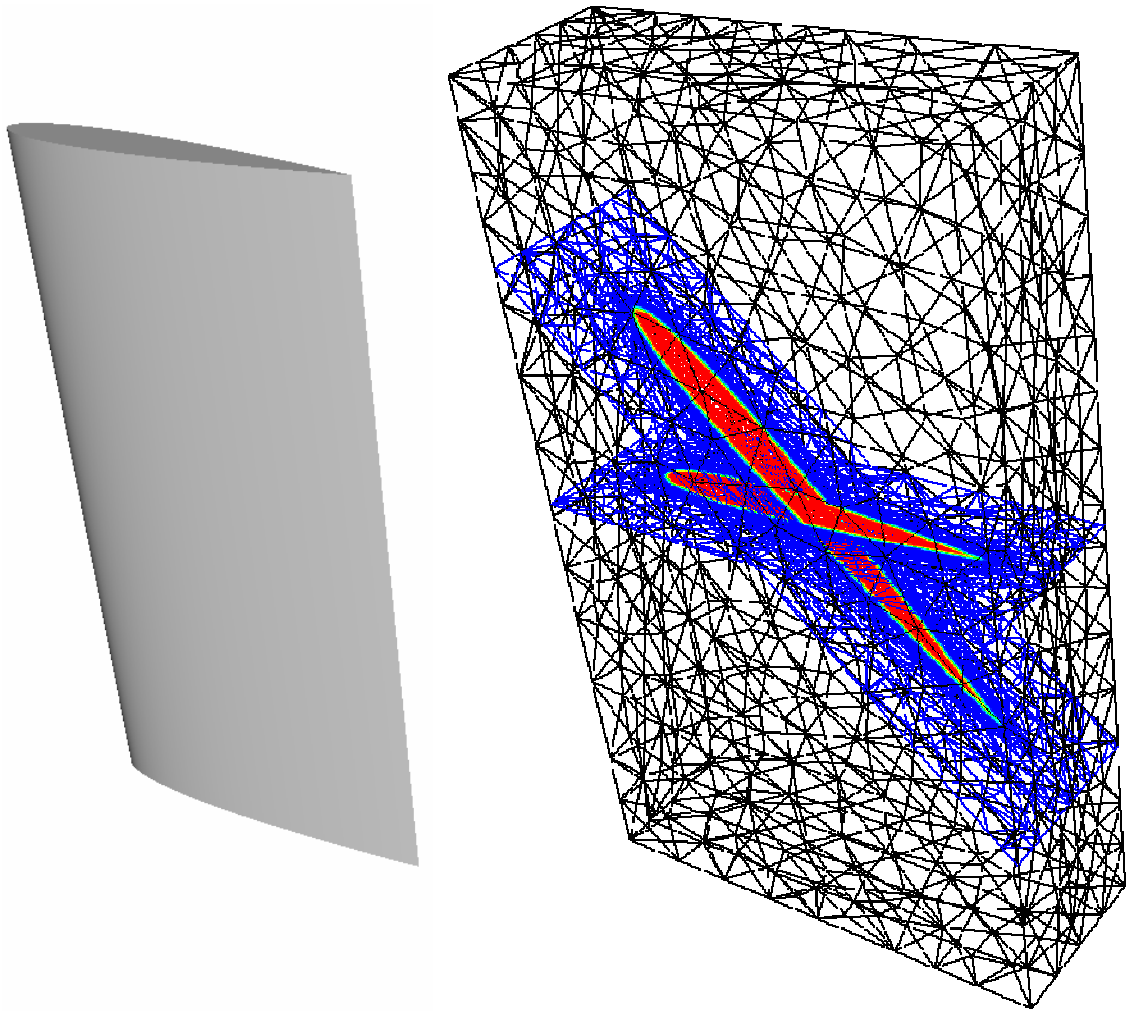

Fig 6. A gauche maillage surfacique associé à un profil de type NACA et maillage de référence correspondant à droite.

Nous souhaitons à présent calculer la fonction distance signée sur un domaine de calcul beaucoup plus grand que le maillage de référence associé à la forme. Grâce au maillage de référence, le maillage surfacique associé à l'objet ne présente plus d'intérêt. En effet, nous allons obtenir la valeur de la distance signée par une opération de transport. Les valeurs de distance signée déterminées pour le maillage de référence vont ainsi être interpolées sur notre domaine de calcul. Pour cela, il nous faut déterminer à quel élément du maillage de référence chaque nœud appartient. Comme pour le calcul de la distance par rapport au maillage surfacique, cette interpolation s'appuie sur l'utilisation d'un système de boîtes hiérarchiques permettant de localiser rapidement les éléments correspondants. Cette méthode prend beaucoup moins longtemps que le calcul de la distance au maillage surfacique et elle est également très précise, pour peu que le maillage de référence soit suffisamment fin à l'interface. Le domaine de calcul étant plus grand que le maillage de référence, un grand nombre de nœuds situé loin de l'objet ne reçoivent aucune valeur de distance signée et il est donc impossible d'y calculer une level set. Nous leur assignons donc la valeur absolue maximale, qui dépend de l'épaisseur de lissage donnée par l'utilisateur.

Un avantage important de cette méthode de transport est sa flexibilité. Il est ainsi très facile de déplacer l'objet, que ce soit par un mouvement de translation, de rotation ou par une combinaison des deux. Il suffit de modifier la position du maillage de référence par rapport au domaine de calcul. De la même façon, il est aussi extrêmement aisé de considérer plusieurs objets, en immergeant les maillages de référence associés aux emplacements voulus. En utilisant cette technique, nous avons pu obtenir la figure 7, qui illustre pour différents temps le contour de la forme NACA ayant un mouvement de translation à l'intérieur d'un domaine de calcul. La taille des éléments est assez grossière sur l'ensemble du domaine sauf dans le voisinage de l'interface, ce qui permet de représenter précisément l'objet immergé.

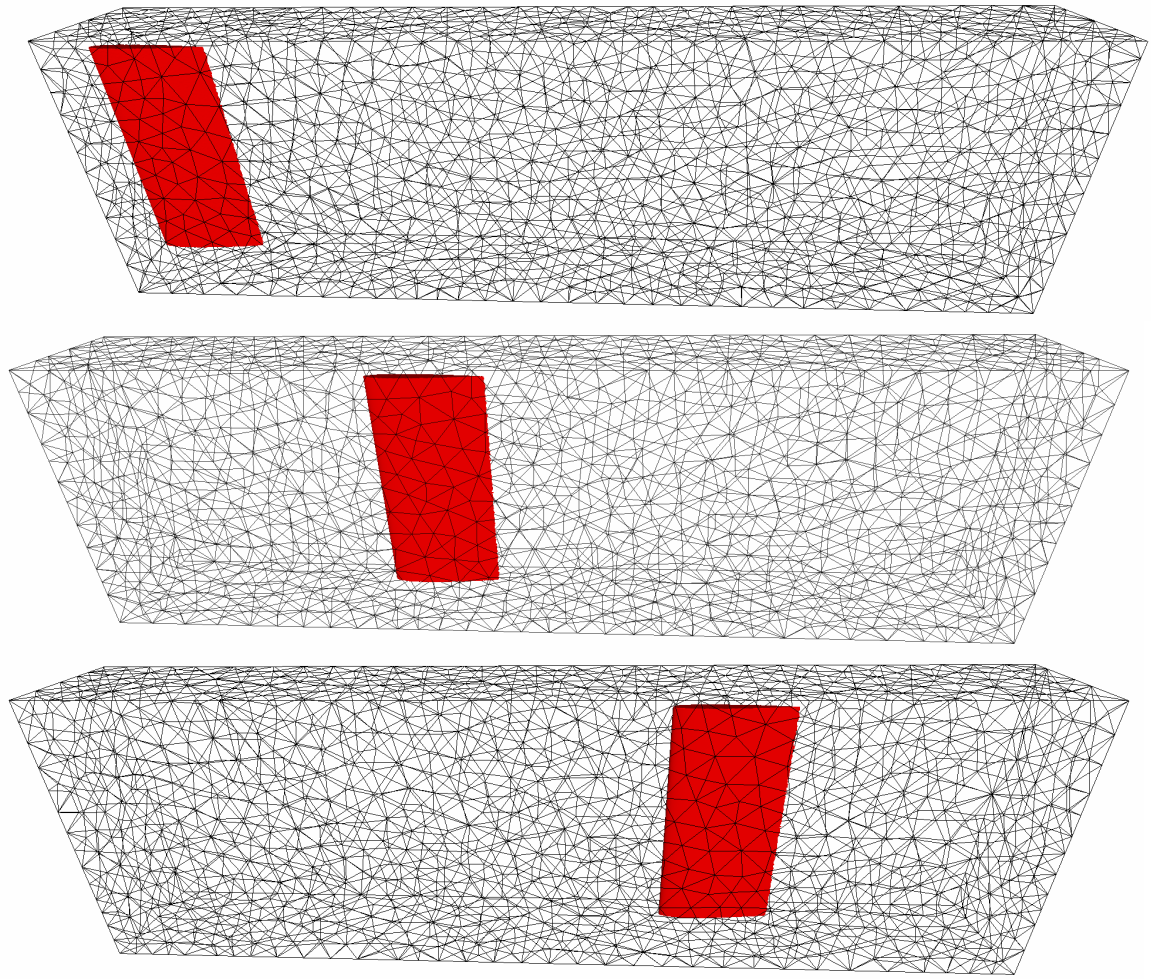

Fig 7. Translation d'un objet le long d'un domaine de calcul pour différents temps.

5. Conclusion

Dans ce papier, nous avons mis en place une méthode permettant d'effectuer des simulations de fours industriels avec des objets en mouvement. Cette méthode s'appuie sur un remaillage anisotrope par estimation de l'erreur associée à l'ensemble des distances calculées entre l'objet immergé et le domaine de calcul pour différents temps et positions de l'objet. Nous avons également expliqué comment raccourcir le calcul de la fonction distance par l'utilisation d'un maillage de référence associé à l'objet. Par la suite, nous présenterons des calculs éléments finis en utilisant notre méthode d'immersion de pièces mobiles dans des fours industriels.

Remerciements : Les auteurs remercient chaleureusement le support de l'Agence Nationale de la Recherche.

Références

[1] T. Coupez. Metric construction by length distribution tensor and edge based error for anisotropic adaptive meshing. Journal of Computational Physics, volume 230, page 2391 - page 2405, 2011.

[2] E. Hachem, H. Digonnet, E. Massoni, T. Coupez. Immersed volume method for solving natural convection, conduction and radiation of a hat-shaped disk inside a 3D enclosure. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, volume 22 (6), page 718 - page 741, 2012.

[3] E. Hachem, T. Kloczko, H. Digonnet, T. Coupez. Stabilized finite element solution to handle complex heat and fluid flows in industrial furnace using the immersed volume method. International Journal for Numerical Methods in Fluids, volume 68 (1), page 99 - page 121, 2012.

[4] T. Coupez, G. Jannoun, N. Nassif, H. C. Nguyen, H. Digonnet, E. Hachem, Adaptive Time-step with anisotropic Meshing for Incompressible Flows. Accepted in Journal of Computational Physics, 2013, http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2012.12.010.

[5] F. Alauzet, P. Frey, P.-L. George, B. Mohammadi. 3D transient fixed point mesh adaptation for time-dependent problems: Application to CFD simulations. Journal of Computational Physics, volume 222, page 592 – page 623, 2007.

[6] J. Bruchon, H. Digonnet, T. Coupez. Using a signed distance function for the simulation of metal forming processes: Formulation of the contact condition and mesh adaptation. From a Lagrangian approach to an Eulerian approach. International Journal for Numerical Methods in Engineering, volume 78, page 980 - page 1008.

[7] J.-F. Zaragoci. Simulation numérique multiphasique de la deformation d'un alliage AL-Cu à l'état pâteux – Comparaison avec des observations par tomographie aux rayons X in situ en temps réel. Thèse de Doctorat MINES ParisTech, 2012.