



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Project-Team Gamma

*Génération Automatique de Maillages et
Méthodes d'Adaptation*

Rocquencourt

THEME NUM

Activity
R *eport*

2006

Table of contents

1. Team	1
2. Overall Objectives	1
2.1. Overall Objectives	1
3. Scientific Foundations	2
3.1. Introduction	2
3.2. Méthodes de génération maillage	2
3.2.1. Méthode de type Delaunay	2
3.2.2. Méthode frontale	3
3.2.3. Autres méthodes	3
3.2.4. Géométrie algorithmique	3
3.3. Méthodes d'adaptation de maillage	3
3.4. Définition géométrique	4
3.4.1. Surfaces analytiques et discrètes	4
3.4.2. Analyse d'une géométrie	4
3.4.3. Structures de données	4
4. Application Domains	4
4.1. Panorama	4
4.2. E.D.P. et éléments ou volumes finis	5
4.3. E.D.P. et adaptation	5
4.4. Maillage des surfaces	5
5. Software	5
5.1. Introduction	5
5.2. Logiciel BL2D-V2	5
5.3. Logiciel BLSURF-V2	6
5.4. Logiciel BLMOL	6
5.5. Logiciel Medit	6
5.6. Logiciel GAMHIC3D	6
5.7. Logiciel GHS3D-V3	7
5.8. Logiciel YAMS	7
6. New Results	7
6.1. Métrique continue et adaptation de maillages anisotropes	7
6.2. Adaptation de maillage par minimisation de fonctionnelles. Application à la prédiction du bang sonique.	8
6.3. Interpolation conservative pour l'adaptation de maillages non structurés	8
6.4. Capture précise des discontinuités dans un calcul CFD par adaptation de maillage	10
6.5. Combiner efficacement techniques d'adaptation de maillages et méthodes de lignes de niveaux	11
6.6. Écoulements avec interfaces et adaptation de maillage	11
6.7. Reconstruction de surface à partir d'un nuage de points	12
6.8. Site de données et comparateur de formes 3D	13
6.9. Génération de maillages surfaciques avec prise en compte des lignes caractéristiques géométriques et physiques	14
6.10. Maillage et calcul par la méthode des éléments finis pour la simulation des procédés et du comportement des nanomatériaux	15
6.11. Reconstruction de la topologie et génération de maillages de surfaces composées de carreaux paramétrés	15
7. Contracts and Grants with Industry	16
7.1. ARC LNM	16
7.2. HISAC	17
7.3. Contrat de partenariat INRIA/EPFL/Dassault Aviation	17

7.4. Pôle de compétitivité IOLS : projet Hexotic (hexaèdres)	18
7.5. Pôle de compétitivité IOLS : maillage surfacique	18
7.6. Contrat de partenariat Dassault Aviation	19
7.7. Design Opti	20
7.8. Snecma Moteurs - Division Moteurs Fusée (Vernon)	20
7.9. Nippon Steel (Japon)	21
8. Dissemination	21
8.1. Participation à des colloques, séminaires, invitations	21
8.2. Enseignement	21
9. Bibliography	21

1. Team

Responsable scientifique

Paul Louis George [DR]

Responsable permanent

Patrick Laug [CR, HdR]

Assistante de Projet

Maryse Desnous [TR (en commun avec Macs, Bang et Cosivie)]

Personnel Inria

Frédéric Alauzet [CR]

Éric Saltel [DR]

Conseiller scientifique

Olivier Pironneau [Professeur, Université Paris 6, HdR]

Collaborateurs extérieurs

Houman Borouchaki [Professeur, Université de Technologie de Troyes, HdR]

Pascal Frey [Professeur, Université Paris 6, HdR]

Frédéric Hecht [Professeur, Université Paris 6, HdR]

Loïc Maréchal [Ingénieur Expert]

Bijan Mohammadi [Professeur, Université Montpellier, HdR]

Chercheur post-doctorant

Lahcen Boulaajine

Michel Mehrenberger

Nicolas Nemitz

Chercheurs doctorants

Azeddine Benabbou [UTT]

Boris Cléménçon [UTT]

Adrien Loseille [Université Paris 6]

Erwan Renaut [UTT]

Stagiaires

Florine Boudin [Université de Grenoble]

2. Overall Objectives

2.1. Overall Objectives

Une branche importante des sciences de l'ingénieur s'intéresse aux calculs des solutions d'équations aux dérivées partielles très variées (en mécanique du solide, en mécanique des fluides, en modélisation de problèmes thermiques, ...) par la méthode des éléments ou des volumes finis. Ces méthodes utilisent comme support spatial des calculs un maillage du domaine sur lequel les équations sont formulées. Par suite, les algorithmes (de construction) de maillages occupent un rôle important dans toute simulation par la méthode des éléments ou des volumes finis d'un problème modélisé en équations aux dérivées partielles. En particulier, la précision, voire la validité, des solutions calculées est liée aux propriétés du maillage utilisé comme support [11].

Le projet GAMMA a été créé en 1996. Les thèmes du projet regroupent un ensemble d'activités concernant les points indiqués ci-dessus, en particulier, l'aspect génération automatique de maillages afin de construire les supports utilisés par la méthode des éléments ou des volumes finis. Sont également étudiés les aspects post-traitement et visualisation des résultats issus de tels calculs [12].

L'évolution de la demande en termes de génération automatique de maillages implique une évolution des méthodes classiques de création de maillages vers des méthodes permettant de construire des maillages contrôlés. Les maillages doivent donc être soit isotropes, le contrôle portant sur des tailles souhaitées, soit anisotropes, le contrôle portant à la fois sur des directions et des tailles selon ces dernières.

Le développement d'algorithmes de maillages gouvernés sert de support naturel à la conception de boucles de maillages adaptatifs qui, via un estimateur d'erreurs *a posteriori*, permettent de contrôler la qualité des solutions.

Ces préoccupations amènent à considérer le problème du maillage des domaines de calculs en eux-mêmes tout comme celui du maillage ou du remaillage des courbes et surfaces, frontières de ces domaines.

La taille, en termes de nombre de nœuds, des maillages nécessaires pour certaines simulations, amène à travailler sur la parallélisation des processus de calculs. Cette problématique conduit à s'intéresser à l'aspect parallélisation au niveau des processus de génération des maillages plutôt qu'au niveau des algorithmes de maillages proprement dits.

Simultanément, le volume des résultats obtenus dans de telles simulations, nécessite d'envisager le post-traitement de ces résultats en parallèle ou par des méthodes appropriées.

Par ailleurs, de nombreux problèmes partent de saisies scanner (ou autre système discret) des géométries à traiter et demandent d'en déduire des maillages de surfaces aptes à être, par la suite, traités par les méthodes classiques (de remaillage, d'optimisation, de calculs).

Enfin, la maturité de certaines méthodes (victimes de leur succès) conduit les utilisateurs à demander plus et à considérer des problèmes de maillage ou des conditions d'utilisations extrêmes qui induisent des algorithmes *a priori* inattendus.

Les objectifs du projet Gamma consistent à étudier l'ensemble des points mentionnés ci-dessus afin de rendre automatique le calcul de la solution d'un problème donné avec une précision imposée au départ. Par ailleurs, certaines des techniques utilisées dans les problématiques de maillage sont utilisables dans d'autres disciplines (compression d'images, etc.).

3. Scientific Foundations

3.1. Introduction

La construction d'algorithmes de maillages fait appel à un ensemble de disciplines scientifiques incluant notamment la géométrie euclidienne, différentielle, discrète ou, dans une certaine mesure, algorithmique. Par ailleurs, les aspects de complexité d'algorithme, minimisation des ressources mémoire et les problèmes de précision numérique sont pris en compte.

3.2. Méthodes de génération maillage

3.2.1. Méthode de type Delaunay

Une partie de la base théorique des méthodes de maillage de type Delaunay est fournie par l'ensemble des résultats relatifs aux méthodes de triangulation de Delaunay, étendues et revues dans le cadre du maillage, l'aspect triangulation (de l'enveloppe convexe d'un nuage de points) ne représentant qu'une faible part de l'algorithmique à mettre en place. De nouveaux problèmes se posent en effet qui concernent les triangulations *contraintes* (bien résolus en deux dimensions, moins clairs en trois dimensions), la façon de construire les points internes aux domaines (non convexes) considérés, les méthodes d'optimisation et, plus généralement, la définition de ce qu'est un maillage acceptable pour une application de type éléments ou volumes finis [13].

Par ailleurs, l'approche développée en deux dimensions et en trois dimensions se prête à une extension *anisotrope*. Un maillieur de type Delaunay anisotrope en trois dimensions a des applications dans les problèmes où des directions sont à privilégier (mécanique des fluides avec présence de chocs, de couches limites, ...). En deux dimensions, on retrouve le même type d'applications et, de plus, une méthode qui s'applique à la construction de maillages pour les surfaces paramétrées. En effet, par définition, la géométrie d'une surface est intrinsèquement de nature anisotrope (rayons de courbure).

3.2.2. Méthode frontale

En deux dimensions, la méthode frontale est une méthode bien connue et utilisée depuis longtemps [14]. Un front initial est formé par les arêtes composant la discrétisation des frontières du domaine considéré. Partant d'une de ces arêtes, un point est choisi ou construit puis connecté avec celle-ci pour former un triangle. Le front est alors mis à jour et le même processus est poursuivi tant que le front n'est pas vide. En trois dimensions [15], cette méthode pose un certain nombre de difficultés liées en particulier au fait qu'il n'existe pas de théorie permettant de définir à coup sûr un algorithme efficace et convergent.

Les problèmes de convergence de l'algorithme, de validité et de qualité des maillages générés sont résolus de manière satisfaisante en se basant sur un maillage de fond et en utilisant des structures de données géométriques adaptées.

3.2.3. Autres méthodes

D'autres méthodes de génération de maillages existent. Une méthode importante est basée sur une utilisation "détournée" des structures de données en arbre, telle que le PR-quadtrees. Le domaine est immergé dans une boîte. Celle-ci est divisée de manière récursive en cellules selon une structure d'arbre de façon à vérifier un certain critère (ou test d'arrêt). Les cellules terminales servent alors de support à la création des éléments du maillage [17].

3.2.4. Géométrie algorithmique

La géométrie algorithmique est apparue, en tant que discipline, vers le milieu des années 80, [16], puis s'est développée au fil des ans, voir par exemple [10]. Par certains de ses aspects elle semble traiter de sujets assez voisins de ceux rencontrés en maillage, pensons ici aux triangulations. Avec un peu de recul, force est de nuancer le propos. En effet ses apports ne sont pas si évidents que cela au sens où les problématiques envisagées sont assez éloignées des problèmes rencontrés dans les cas concrets. Il n'en demeure pas moins vrai que l'on continue à regarder ce que cette discipline peut (pourrait) apporter aux méthodes et techniques qui nous préoccupent.

3.3. Méthodes d'adaptation de maillage

Dans une simulation numérique par des méthodes d'éléments ou de volumes finis, la qualité en forme et en taille des éléments du maillage support est importante, en raison de son effet sur la précision des solutions numériques et sur la convergence du schéma numérique utilisé lors du calcul [11], [18]. L'adaptation des maillages au comportement physique du phénomène étudié est un moyen de réduire les temps de calcul et d'améliorer la précision des résultats numériques¹. La génération du maillage est alors gouvernée par ces résultats pour obtenir un nouveau maillage mieux adapté au phénomène physique modélisé.

Le principe de base pour gouverner un algorithme de construction de maillage est la notion de *longueur unité*, qui permet de piloter la méthode de façon à construire des arêtes de cette longueur. Cette longueur unité est mesurée dans le champ de métriques correspondant au problème étudié. Ce champ se traduit par une carte de spécifications de tailles ou de directions et de tailles liées, d'une part, à l'analyse des solutions du problème traité via un estimateur d'erreurs approprié et, d'autre part, à des contraintes de nature géométrique.

¹Le critère d'adaptation est basé sur un estimateur d'erreurs *a posteriori* et le résultat de l'analyse est traduit en termes de métriques associées aux noeuds du maillage support du calcul.

L'idée pour l'adaptation est alors d'utiliser des algorithmes de maillage gouvernés en les insérant dans une boucle de calculs. Chaque pas de la boucle comprend une phase de génération de maillage, une phase de résolution pour trouver la solution correspondante, une phase d'analyse de cette solution et, si besoin est, le processus complet est répété jusqu'à obtention d'une solution de précision donnée (au sens de l'estimateur d'erreur).

3.4. Définition géométrique

3.4.1. Surfaces analytiques et discrètes

En trois dimensions, les domaines à mailler sont généralement des volumes définis via leurs frontières (surfaces), elles-mêmes définies de façon analytique ou discrète.

Dans le premier cas (analytique), une équation de la surface est en général disponible sous forme explicite (parfois issue d'une forme implicite). Un premier exemple est fourni par les surfaces moléculaires, composées de portions de sphères et de tores modélisables par des équations explicites. Un autre exemple est fourni par les systèmes de CAO, qui proposent généralement deux types de représentation pour une surface donnée, implicite (CSG) ou explicite (B-Rep).

Dans le second cas (discret), on peut citer les reconstitutions 3D à partir de données volumétriques ou de points, ou encore les maillages dont les déformations géométriques proviennent d'un calcul mettant en œuvre la méthode des éléments finis par exemple.

Un cas intermédiaire est celui des surfaces définies par une grille structurée de points, dont une représentation analytique peut être obtenue par interpolation.

3.4.2. Analyse d'une géométrie

Les problèmes de maillage de surfaces nécessitent l'analyse de la qualité, en un sens à préciser, des maillages construits. L'analyse des surfaces paramétrées (définies via un espace paramétrique) ou discrètes (définies via un maillage) conduit à chercher des estimateurs fiables quantifiant les écarts de ces surfaces aux maillages censés les approcher.

3.4.3. Structures de données

Les maillages sont construits en vue d'applications de type éléments ou volumes finis (bien que d'autres applications soient envisageables, visualisation et réalité virtuelle en particulier). Par suite, il est nécessaire de définir des structures de données appropriées permettant la communication entre le maillager et les autres étapes d'un processus de calcul.

Réaliser une boucle de calculs adaptatifs ou encore mener ce type de travail en parallèle (pour pouvoir traiter des maillages de plusieurs dizaines ou centaines de millions d'éléments) implique que la définition de ces structures de données permette l'accès aux différentes informations utiles (communication entre processeur, transfert de données, liens avec la géométrie, etc.).

4. Application Domains

4.1. Panorama

Keywords: *adaptation et contrôle d'erreurs, réalité virtuelle, résolution d'EDP, volumes finis, éléments finis.*

Tout calcul par éléments ou par volumes finis, dans une certaine mesure, utilise comme support spatial un maillage. Ce dernier sert à discrétiser le domaine où le problème est formulé en l'approchant par l'union des éléments formant son maillage. Par suite, toute simulation numérique via ces méthodes nécessite la construction d'un maillage. Par ailleurs, les maillages de surfaces ont des applications autres, en particulier, en visualisation et en réalité virtuelle (animation, compression d'image, etc.).

4.2. E.D.P. et éléments ou volumes finis

Les applications sont ici les applications classiques indiquées ci-dessus. On trouve donc naturellement des applications en mécanique du solide, en mécanique des fluides, en électromagnétisme, en modélisation de transferts thermiques, en micro-electronique, en chimie, etc.

4.3. E.D.P. et adaptation

L'adaptation de maillage couplée aux estimateurs d'erreurs permet d'envisager de faire, au niveau industriel, des calculs avec un contrôle automatique d'erreurs. On trouve déjà, en statique pour la mécanique du solide, des produits basés sur ce type de techniques. Le but est évidemment d'étoffer les plages d'utilisation en abordant les cas dynamiques et des problèmes physiques plus compliqués (non-linéaires, en particulier).

4.4. Maillage des surfaces

Mailler les surfaces est un pré-requis fondamental pour aborder le maillage des domaines tridimensionnels. En effet, les mailleurs automatiques de tels volumes utilisent, en général, le maillage de leur frontière comme donnée. De plus, la qualité de ce maillage de surface conditionne, dans une large mesure, la qualité du maillage tridimensionnel construit.

5. Software

5.1. Introduction

La diffusion des logiciels issus des travaux de recherche du projet Gamma est effectuée, à ce jour, de deux façons. La plupart des logiciels en deux dimensions sont accessibles à tous (sauf pour usage commercial) tandis que les autres logiciels, pour le cas des surfaces et en trois dimensions en particulier, font l'objet de diffusion ou de transfert au travers d'accords précis de nature scientifique ou de type commercial.

Pour la diffusion des autres logiciels (non présents sur ce site), existants ou à venir, l'Inria et Distene, en collaboration étroite, proposent différentes solutions permettant des mises à disposition, des évaluations, des transferts de technologie ou des ventes (sous des formes adaptées).

Les différents logiciels (ensemble de programmes autonomes) ou modules (ensemble de programmes à intégrer dans un logiciel) sont présentés par ordre alphabétique dans le tableau 1 et dans la description rapide qui suit. Pour plus de détails, voir :

<http://www-rocq1.inria.fr/gamma/cdrom/projs/gamma/logiciel-fra.htm>

Table 1. Tableau des logiciels et des modules.

Nom	Dimension	Disponibilité
BL2D-V2	2D	transfert
BLSURF-V2	3D surfacique	transfert
BLMOL	3D surfacique	transfert
Medit	toutes dim.	domaine public
GAMANIC3D	3D volumique	transfert
GAMHIC3D	3D volumique	transfert
GHS3D	3D volumique	transfert
YAMS	3D surfacique	transfert

5.2. Logiciel BL2D-V2

Keywords: *adaptation de maillage, anisotrope, géométrie variable, isotrope, maillage, quadrilatère, triangle, élément P 1 , élément P 2 , élément Q 1 , élément Q 2 .*

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Le logiciel BL2D-V2 génère des maillages dans le plan, isotropes ou anisotropes, et peut être intégré dans un schéma adaptatif de calcul (notamment par éléments finis). Par rapport à la version V1, il offre de nombreuses possibilités nouvelles : méthode frontale, triangles quadratiques courbes, quadrilatères de degré 1 ou 2, frontières déformables, allocation dynamique de mémoire, etc.

La méthode de maillage est de type Delaunay ou frontale. Dans ce dernier cas, la génération des points internes suit une logique frontale, tandis que leur connexion est réalisée comme dans une approche Delaunay classique. L'obtention de quadrilatères est faite par appariement. La construction directe d'éléments de degré 2 est rendue possible via le contrôle du maillage des frontières du domaine, de façon à assurer la compatibilité désirée. Les nœuds milieux frontières sont placés en fonction de l'abscisse curviligne. Les nœuds milieux internes sont obtenus par un processus d'optimisation.

5.3. Logiciel BLSURF-V2

Keywords: *adaptation de maillage, anisotrope, isotrope, maillage de surface, quadrilatère, triangle, élément P 1, élément P 2, élément Q 1, élément Q 2.*

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Le logiciel BLSURF-V2 permet le maillage de surfaces composées de carreaux paramétrés. Plusieurs types de carreaux ont été prédéfinis (sphériques, cylindriques, toriques, de Bézier, B-spline et NURBS). Ce mailleur surfacique est basé sur une méthode indirecte. On maille les domaines des paramètres puis on reporte ces maillages sur la surface en assurant la compatibilité au niveau des interfaces. Les maillages dans \mathbf{R}^2 sont gouvernés par les propriétés géométriques des carreaux et sont, en général, anisotropes. Les techniques utilisées sont les mêmes que dans le logiciel BL2D-V2 (que ce code utilise en partie). La différence essentielle entre les versions V1 et V2 est un module permettant de construire des maillages trans-carreaux (*patch independent*) ou de simplifier les maillages tout en augmentant leur qualité.

5.4. Logiciel BLMOL

Keywords: *maillage, surface moléculaire.*

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Une part grandissante de la chimie quantique est consacrée aux surfaces moléculaires. Pour modéliser une telle surface, chaque atome est idéalisé par une simple sphère. Il est alors possible de définir différents types de surfaces moléculaires, notamment la *surface de Van der Waals* (VWS), la *surface accessible au solvant* (SAS) et la *surface exclue au solvant* (SES), encore appelée surface de Connolly. Le but du logiciel BLMOL est de mailler ces surfaces en se conformant à certains critères de qualité. En particulier, des spécifications de tailles doivent être respectées et les éléments doivent être aussi réguliers que possible.

5.5. Logiciel Medit

Keywords: *visualisation de maillages, visualisation scientifique.*

Participants: Pascal Frey [correspondant, UPMC], Eric Saltel.

Medit est un environnement graphique (sous OpenGL) permettant de visualiser de manière interactive des maillages de grandes tailles (2D, 3D et surfaces) et des informations associées (champs de solutions, entités spécifiques). Les développements récents ont principalement concernés la visualisation stéréoscopique des maillages et des solutions ainsi que l'animation de particules sur des champs vectoriels.

5.6. Logiciel GAMHIC3D

Keywords: *maillage isotrope contrôlé, triangulation automatique, tétraèdre.*

Participants: Houman Borouchaki, Paul Louis George [correspondant], Frédéric Hecht, Éric Saltel.

GAMHIC3D est un module de maillage automatique en tétraèdres d'un domaine défini par une discrétisation (en principe en triangles) de sa surface. Ce module est une extension du module GHS3D au cas d'un problème de maillage contrôlé. On se donne en effet une *carte de métriques isotrope* (des tailles) définie de manière discrète aux sommets d'un *maillage de fond*. Le but est alors, partant d'un maillage de la frontière du domaine réputé conforme vis-à-vis de la carte spécifiée, de construire un maillage volumique correspondant conforme à cette même carte.

GAMANIC3D est le pendant *anisotrope* de GAMHIC3D.

5.7. Logiciel GHS3D-V3

Keywords: *maillage, triangulation automatique, tétraèdre.*

Participants: Paul Louis George [correspondant], Frédéric Hecht, Éric Saltel, Houman Borouchaki.

GHS3D, alias TetMesh-GHS3D, est un module de maillage automatique en tétraèdres d'un domaine défini par une discrétisation (en principe en triangles) de sa surface.

Notons que ce module est déjà intégré dans la plupart des codes commerciaux existants proposés par les éditeurs de logiciels en CFAO.

5.8. Logiciel YAMS

Keywords: *décimation, maillage de surface, optimisation, simplification.*

Participant: Pascal Frey [correspondant, UPMC].

YAMS est un logiciel destiné au remaillage adapté des maillages de surfaces. La donnée est une triangulation de surface, sur laquelle sont appliquées des modifications topologiques (basculs d'arêtes) et géométriques (bougé de points, création/suppression de sommets). Le but est d'obtenir un maillage simplifié (ou enrichi) correspondant à une carte de tailles donnée (de nature géométrique et/ou physique). Ce module a été diffusé, à ce jour, dans plusieurs codes commerciaux. Il est, par ailleurs, accessible en ligne.

6. New Results

6.1. Métrique continue et adaptation de maillages anisotropes

Keywords: *adaptation de maillage, maillage anisotrope, métrique continue.*

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Alain Dervieux [Projet Smash, INRIA-Sophia-Antipolis], Adrien Loseille.

Nos premières expériences sur l'adaptation de maillage anisotropes en trois dimensions ont mis en évidence l'importance de chaque étape du processus d'adaptation afin d'obtenir des maillages "réellement" anisotropes et permettant aux meilleurs adaptatifs d'obtenir des maillages de bonne qualité respectant la carte de tailles prescrite.

La notion de métrique qui permet de contrôler la génération de maillage a ici une importance capitale, ce qui ouvre la voie à plusieurs axes de recherches permettant de mieux les construire afin que le meilleur adaptatif soit plus efficace. Les axes sont les suivants :

- les fondements théoriques basés sur les métriques continues afin de traiter des solutions d'ordre P^k avec $k \geq 1$ et de contrôler des erreurs en norme L^p pour $p \geq 1$ ou $p = \infty$,
- au niveau numérique, développer des reconstructions d'ordre élevé des dérivées de solution discrète,
- mettre en place une méthode anisotrope de gradation des métriques (*i.e.*, contrôler le choc de prescription de tailles),
- traiter de manière satisfaisante les singularités de la solution.

La théorie des métriques continues anisotropes a été développée en toutes dimensions en norme L^p , en utilisant un modèle d'erreur basée sur l'erreur d'interpolation. De cette théorie découle deux résultats fondamentaux :

- la métrique obtenue donne une majoration optimale de l'erreur d'interpolation en norme L^p ,
- une convergence en maillage asymptotique à l'ordre 2 est obtenue pour l'erreur d'interpolation avec cette métrique optimale.

Le choix de la norme L^p revêt une importance crucial dans les simulations numériques. En effet, dans le cas de simulation avec discontinuités, un contrôle de la norme L^∞ (qui été celle employée précédemment) n'est pas du tout adéquate. Pour contrôler la norme L^∞ de l'erreur d'interpolation, la métrique spécifique de mettre tous les points dans les discontinuités. Les normes L^1 et L^2 sont beaucoup plus appropriées.

Les résultats obtenus avec cette nouvelle approche sont très satisfaisants. Elle a été appliquée avec succès pour des écoulements supersonique autour d'un avion. Elle a permis, entre autre, de propager le signal acoustique (*i.e.*, la signature de pression) dans tout le domaine de calcul alors que précédemment on était restreint à un voisinage autour de l'avion, Figure 1.

6.2. Adaptation de maillage par minimisation de fonctionnelles. Application à la prédiction du bang sonique.

Keywords: *adaptation de maillage "goal-oriented", bang sonique, maillage anisotrope, minimisation de fonctionnelles.*

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Alain Dervieux [Projet Smash, INRIA-Sophia-Antipolis], Adrien Loseille.

Ce nouveau travail (dans le cadre de la thèse d'Adrien Loseille) en collaboration avec le projet Tropics de l'INRIA Sophia-Antipolis est motivé par la mise au point et l'implémentation de nouvelles idées sur l'adaptation de maillage, basées sur une approche par fonctionnelle continue, et leurs applications à la Mécanique des Fluides. Il s'agit de définir une fonctionnelle d'erreur continue à minimiser à l'aide d'un adjoint. À partir de cette minimisation, on est alors capable d'exhiber une métrique en chaque sommet de la discrétisation qui servira à adapter le maillage. Le nouveau maillage adapté ainsi obtenu est tel qu'on évalue au mieux cette fonctionnelle continue.

Premièrement, on définit un problème adjoint donné par le problème que l'on résoud et la fonctionnelle que l'on cherche à minimiser. La résolution de ce problème permet d'obtenir la sensibilité de chaque sommet du maillage sur la fonction coût. Et par conséquent, en déduire la densité locale du maillage afin de contrôler au mieux cette fonctionnelle. On utilisera les états adjoints calculés par les méthodes de Différentiation Automatique du projet Tropics.

Dans un deuxième temps, comme l'on cherche à générer des maillages anisotropes, il nous s'écifier les directions optimales et les rapports d'anisotropie pour contrôler au mieux cette erreur. Pour cela, on extraira cette information des métriques continues appliquées sur une variable convenablement choisie.

Cette approche sera analysé en trois dimensions sur des fonctionnelles constantes (*i.e.*, des variables globales du problème) telles que la traînée ou bien la portance d'un avion. Le but étant, par exemple, d'obtenir le meilleur maillage pour calculer la traînée d'un avion à une précision fixée.

Ensuite, cette approche sera appliquée, dans le contexte des problèmes stationnaires, à l'étude du bang sonique dans le cadre du contrat Européen HISAC. Cette approche semble particulièrement adaptée compte tenu du fait que seules les équations d'Euler sont à résoudre.

6.3. Interpolation conservative pour l'adaptation de maillages non structurés

Keywords: *interpolation conservative, interpolation de solution, intersection de maillage.*

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Michel Mehrenberger.

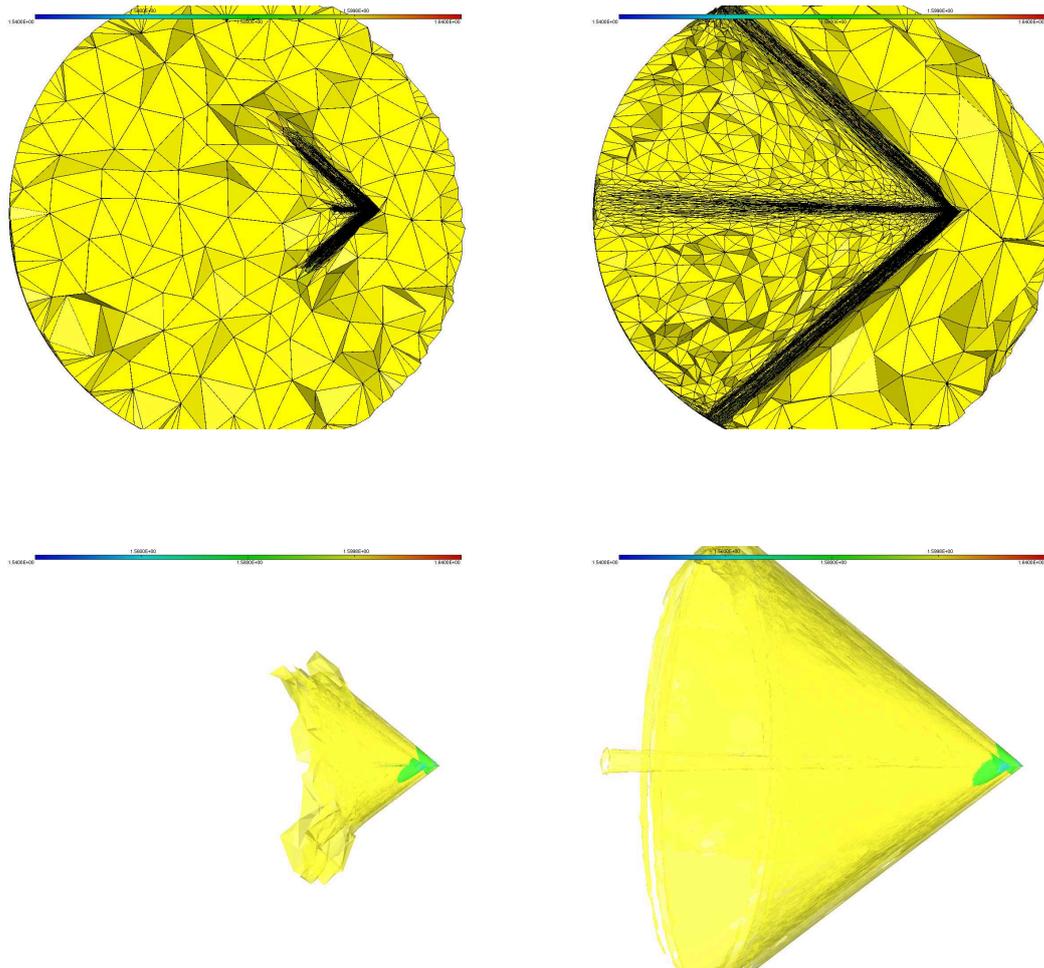


Figure 1. Écoulement supersonique autour d'un avion. À gauche, maillage final adapté (haut) et les cônes de Mach associés (bas) obtenus avec les méthodes précédentes de construction de métriques. À droite, maillage final adapté (haut) et les cônes de Mach associé (bas) obtenus avec les métriques continues en norme \mathbf{L}^2 .

Dans un schéma classique d'adaptation de maillage, il est nécessaire d'interpoler les solutions après chaque remaillage du domaine de calcul. Cette opération introduit en principe une erreur numérique qui peut s'avérer pénalisante dans le cas de problèmes instationnaires pour les lois de conservation (équations d'Euler). Celle-ci se traduit par une dissipation de la solution qui induit une perte de détails de la solution.

Dans cette étude on a proposé et implémenté un schéma d'interpolation conservatif en dimension deux. L'approche proposée est basée sur des techniques d'intersections de maillages et sur le remaillage du polygone d'intersection de deux triangles. Une attention particulière a été portée sur le traitement des erreurs numériques dans le cas d'éléments dégénérés et sur l'algorithme d'intersection afin d'obtenir un code efficace en terme de temps de calcul. Grâce à l'intersection de maillage, on a pu proposer un opérateur de projection P^1 conservatif par le biais de reconstruction locale.

On a analysé son impact sur la solution adaptée dans le cas des problèmes instationnaires. Premièrement, on préserve bien la masse tout au long du calcul. Deuxièmement, cette projection est nettement moins dissipative que l'interpolation classique P^1 , comme on peut le voir sur la Figure 2.

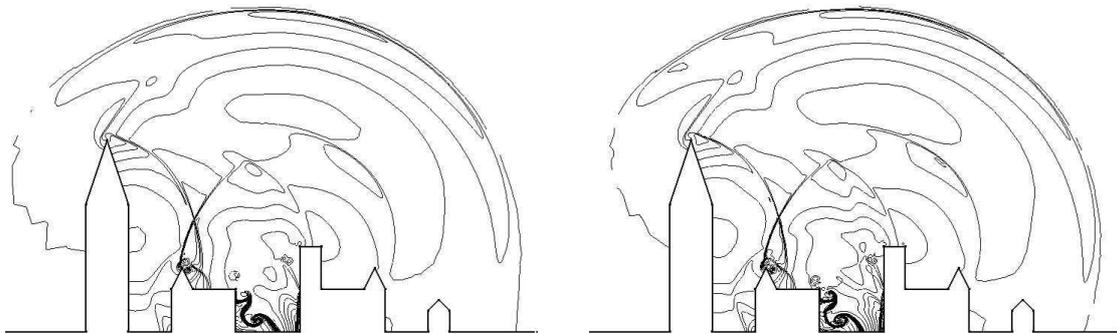


Figure 2. Simulation d'une explosion dans une ville. À gauche, solution finale en utilisant l'interpolation P^1 après chaque remaillage. À droite, solution finale en utilisant l'interpolation P^1 conservative après chaque remaillage.

6.4. Capture précise des discontinuités dans un calcul CFD par adaptation de maillage

Keywords: "discontinuity fitting, CFD, détecteur de discontinuités.

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Lahcen Boulaajine.

Dans les calculs eulériens, il a été montré que le placement optimal des sommets du maillage au voisinage des discontinuités de la solution impacte grandement la qualité et la précision de la solution numérique. Il est donc important de détecter précisément les discontinuités de l'écoulement étudié. Une fois celles-ci détectées, il devient possible de déplacer les sommets du maillage sur des lignes d'isovaleurs les représentant, spécifiquement les chocs. Le but de ce travail (dans le cadre du post-doctorat de Lahcen Boulaajine) est d'analyser et de mettre en place un tel algorithme et de le coupler à des méthodes d'adaptation de maillages déjà opérationnelles dans le projet. En particulier, on mesurera l'impact d'une telle approche sur la construction de métriques anisotropes.

On a analysé dans un premier temps plusieurs algorithmes de détection de discontinuités basés sur la physique du problème, les techniques de traitement du signal ou des mesures de distances entre des maillages. Ces approches sont actuellement testées sur des cas concrets en Mécanique des Fluides où apparaissent des discontinuités.

Une fois cette analyse effectuée, on s'attachera à développer un algorithme permettant de bouger les sommets du maillage de manière à les réaligner sur ces discontinuités. On analysera ensuite l'impact du couplage d'une telle approche sur les algorithmes d'adaptation anisotrope de maillages non structurés, et en particulier sur la précision des solutions numériques.

6.5. Combiner efficacement techniques d'adaptation de maillages et méthodes de lignes de niveaux

Keywords: *adaptation de maillage, lignes de niveaux.*

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Pascal Frey [UMPC, Paris VI], Nicolas Nemitz.

On s'intéresse dans ce travail, dans le cadre de l'ARC LNM et du post-doctorat de Nicolas Nemitz, à la définition et à la gestion numériques des interfaces entre différents fluides incompressibles, au niveau desquelles les propriétés telles que la densité et la viscosité sont discontinues et induisent des sauts de la pression et du gradient de vitesse.

Les phénomènes qui nous intéressent dans ce travail conduisent à des grandes transformations de l'interface voire à des changements de topologies (apparition de bulles, par exemple) qui rendent difficiles la gestion de cette dernière par une méthode lagrangienne. Une méthode eulérienne et topologiquement robuste, la méthode des lignes de niveaux proposée par Osher et Sethian à la fin des années 80, est particulièrement indiquée dans ce cas.

D'un autre côté les méthodes numériques d'adaptation de maillages anisotropes non structurés permettent une réduction substantielle de la complexité des systèmes à résoudre et une précision numérique accrue. Ce travail propose donc de combiner l'adaptation de maillage et les méthodes des lignes de niveaux afin d'obtenir des simulations numériques par éléments finis des écoulements multi-fluides.

La première piste que ce travail tente de suivre porte sur la prise en compte des discontinuités dans le calcul par la méthode des éléments finis. Nous envisageons deux approches que nous nous proposons de comparer. L'approche traditionnelle consiste à faire intervenir l'interface de manière explicite, cette dernière est alors une frontière sur laquelle doit s'appuyer le maillage du domaine. Une autre solution est d'autoriser l'interface à traverser les éléments. Dans ce cas, la faible régularité de la solution à l'intérieur des éléments « multi-fluides » ne permet pas d'envisager la résolution par une méthode aux éléments finis classique. Nous proposons alors d'adapter le maillage à la courbure de l'interface. Ainsi, il est raisonnable de penser que chaque élément intersecté ne comporte qu'un arc simple de l'interface et qu'on peut alors envisager de prendre en compte les sauts de pression et de gradient de vitesse par des méthodes aux éléments finis étendus.

6.6. Écoulements avec interfaces et adaptation de maillage

Keywords: *adaptation de maillage, problème d'interface.*

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Alain Dervieux [Projet Smash, INRIA-Sophia-Antipolis], Damien Guégan [Projet Smash, INRIA-Sophia-Antipolis].

Dans le cadre de l'ARC Ligne de Niveaux et Maillage, on a analysé le comportement des méthodes d'adaptation de maillage pour des calculs multifluides instationnaires en utilisant l'expérience du projet Smash pour ce type de simulation.

Les équations de Naviers-Stokes incompressible bi-fluides ont été utilisées pour modéliser le mouvement de deux fluides non miscibles. Les équations de Navier-Stokes sont résolues par une méthode de projection adaptée à l'utilisation d'éléments P^1 non-structurés.

L'interface entre les deux fluides est traitée par la méthode des lignes de niveaux. Elle est advectée par une méthode de volumes finis d'ordre élevé (de type MUSCL). La re-distanciation de la ligne de niveaux est réalisée de manière géométrique.

Le traitement en maillage fixe des interfaces est un problème numériquement difficile dans la mesure où le milieu continu à analyser présente une forte discontinuité de propriétés sur ces interfaces. Les méthodes ligne de niveaux, couplées avec les techniques de maillage adaptatif, apportent une réponse élégante à l'advection haute précision de l'interface. On a mis en évidence les senseurs nécessaires pour l'adaptation de maillage. Ensuite, on a analysé la sensibilité de la méthode sur des maillage fortement anisotrope.

On a obtenus des premiers résultats encourageant sur un cas test assez connu, la chute d'une colonne d'eau en deux dimensions, Figure 3.

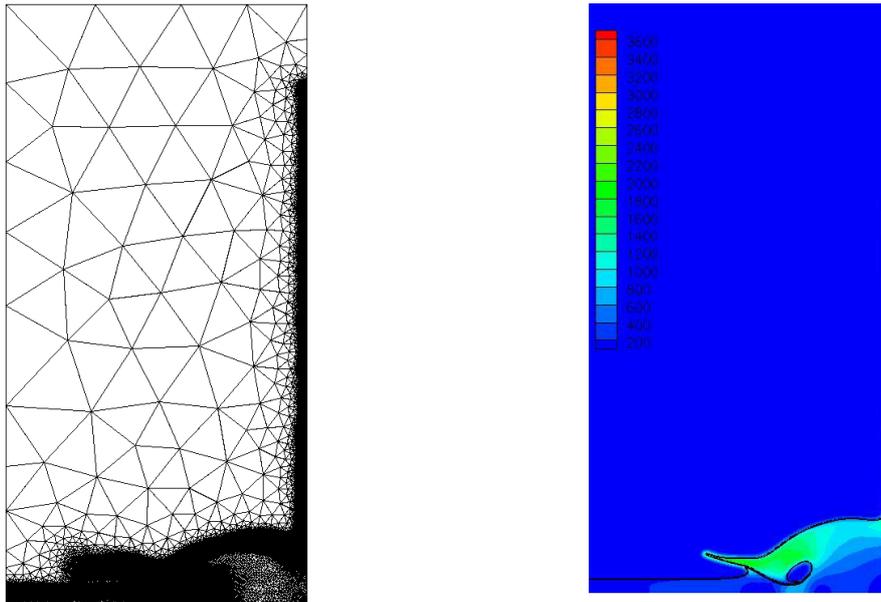


Figure 3. Chute d'une colonne d'eau en deux dimensions. À gauche, le maillage final adapté. À droite, la solution finale.

6.7. Reconstruction de surface à partir d'un nuage de points

Keywords: *maillage de surface, nuage de points, reverse engineering.*

Participants: Houman Borouchaki, Paul Louis George [correspondant], Éric Saltel.

La construction d'un maillage de surface à partir de la donnée d'un nuage de points obtenus par un processus de saisie (scanner, ...) est un problème délicat déjà traité en vue d'autres applications. Les méthodes utilisées, en général, ne conduisent pas à un résultat satisfaisant dans notre cas justifiant cette étude.

Le but est de construire une surface apte à être traitée par les outils "standards" de remaillage et d'optimisation de surfaces et, de ce fait, apte à être le support de calculs. Ces demandes induisent la recherche de propriétés particulières liées, en particulier, aux Éléments Finis. Cette étude poursuit le travail de l'an dernier.

Les méthodes existantes, développées en vue d'autres applications (graphique par exemple), ne nous semblent pas satisfaisantes justifiant de revoir les approches proposées.

La méthode, sur laquelle nous travaillons, débute par la construction d'une triangulation de Delaunay exacte au sens de son dual (le diagramme de Voronoï). Ensuite, une construction simulée de la surface moyenne correspondant à l'objet volumique construit permet de sélectionner, parmi les faces des tétraèdres de la triangulation actuelle, une liste de faces candidates.

Le résultat est une surface le plus souvent trouée (des faces manquent), à variété non uniforme (des faces sont en trop et des arêtes sont communes à plus de deux faces), de mauvais genre, voire non orientable (en un sens local, un ruban de Moebius ne posant pas de problème), telle que des sommets sont sur-connectés, ..., et surtout, ne présentant pas les propriétés minimales nécessaires.

La dernière étape de la méthode consiste donc à résoudre tous ces cas afin de construire une surface à la fois régulière, présentant les “bonnes” singularités (coins et arêtes vives, pour des pièces mécaniques en particulier), à variété uniforme (chaque arête appartient au plus à deux faces) et, au final, telle que les outils standards de traitement des surfaces s’appliquent sans problèmes particuliers.

Les diverses étapes de cette enchaînement nous ont conduit à :

- réécrire un noyau de Delaunay 3D robuste et rapide (12 millions de tétraèdres à la minute sur un PC, 40 millions sur un Mac G5, 60 millions sur des cas simples),
- écrire des procédures de traitement de plis (entre face),
- exploiter différents critères permettant soit de sélectionner une face, soit de la supprimer, afin de constituer l’ensemble des faces formant la surface cherchée.

Le logiciel, dans son état actuel, reconstruit correctement, et rapidement, une surface appuyée sur les points donnés dans de nombreux cas de difficultés variées. Par contre, certains exemples ne sont pas traités correctement (il reste des trous et, plus préoccupant, l’orientabilité (locale) n’est pas assurée).

Cette année, notre effort a porté sur, d’une part la vitesse de reconstruction significativement réduite par rapport à l’an dernier et sur la récupération (correction plausible) d’un nuage “visiblement” non correct. À ce titre, le classique *happy* peut être reconstruit sans trous ! en quelques 25 secondes. Cette étape de récupération se donne la possibilité de détruire des points du nuage dont la pertinence semble plus que suspecte. Il est à noter que nous avons montré qu’aucuns critères de pertinence n’est définitifs et que certains ne sont que purement académiques. Par ailleurs, on a également montré que la pertinence des critères les plus raisonnables n’est que statistique.

La suite logique est, l’orientabilité (locale) étant assurée et une éventuelle correction étant effectuée, d’utiliser une méthode “brute force” afin d’obtenir un résultat satisfaisant (on bouche les trous sans utiliser les faces de la triangulation 3D). Le but est de repousser le plus tard possible cette ultime étape.

6.8. Site de données et comparateur de formes 3D

Keywords: *maillage de surface, site de données.*

Participant: Eric Saltel [correspondant].

Nous avons créé un site pour mettre à disposition les maillages de surface que nous utilisons à des fins de mise au point et de validation de nos logiciels. Par ailleurs, il est possible de construire des scénarios de calculs en combinant des objets sélectionnés dans ce site.

L’adresse du site est :

<http://www-rocq1.inria.fr/gamma/gamma.php>

Nous avons créé ce site pour mettre à disposition les maillages que nous utilisons soit à des fins de mise au point ou de validation de nos propres outils soit pour construire des scènes de calcul.

Par ailleurs, les objets du site sont marqués en indiquant si ils sont maillables par GHS3D, si ils sont remaillables par un de nos maillages de surface, si ils sont passés dans un intersecteur de surfaces (correction de surfaces “fausses”), si ils sont correctement reconstruit à partir du nuage de points correspondant.

Les maillages sont dans leur format initial (.3ds, .obj, .wrl,...) et afin de faciliter leur lecture, ils sont toujours présents dans le format interne .mesh en vogue à GAMMA.

Plus de 65000 objets sont accessibles directement ou indirectement si le site de provenance n’autorise pas la rediffusion. En 1 an et 1/2 il a eu 400000 downloads ce qui fait une moyenne de 700 downloads par jour.

Le site de données de maillage ayant atteint cette taille (plus de 65000 objets), il n'était plus possible de garantir le classement des objets (cela était fait à la main). Nous avons donc créé un programme de comparaison de formes en 3D. Différentes méthodes ont été essayées. Toutes ces méthodes partent d'un maillage en 3D sur lequel nous faisons les opérations suivantes:

- normalisation de l'objet dans un cube unité (pour avoir un h absolu),
- échantillonnage des objets dans une matrice (256**3) avec un h donné,
- positionnement du nuage de points ainsi obtenu selon ses axes d'inertie principaux et traitement de l'invariance de réflexion.

Sur les données ainsi obtenues nous avons essayé plusieurs méthodes qui sont de 2 types:

- 1 création d'une matrice sous-échantillonnée du nuage (32**3) et comparaison des matrices de points des objets.
- 2 différentes transformées de Fourier sur le nuage de points et comparaison des transformées des objets.

La première méthode consiste à compter les points communs à 2 objets (O1 et O2) Pour cela nous essayons plusieurs rotations de l'objet O2 autour de son centre de gravité avec une renormalisation à chaque essai. Ceci permet de calculer 2 valeurs de ressemblance $D(O1,O2)$ et $D(O2,O1)$, $D(O1,O2)$ est le nombre de voxels communs rapporté au nombre total de voxels de O1, $D(O2,O1)$ est ce nombre rapporté au nombre total de voxels de O2. Nous prenons la plus grande ressemblance.

Pour la seconde méthode, nous avons fait 4 essais:

- Transformée de Fourier directement sur la matrice de voxels en x, y, z
- Transformée de Fourier sur les coordonnées sphériques des voxels en ρ, θ, φ
- Transformée de Fourier sur θ et φ mais sur ρ avec $\rho * \cos(\rho)$
- Transformée de Fourier-Mellin sur ρ, θ, φ

Pour toutes ces méthodes nous sauvegardons le vecteur des valeurs absolues des coefficients de Fourier. La comparaison entre 2 objets se fait en prenant le produit scalaire de ces vecteurs (en norme L2) Ceci permet de calculer 2 valeurs de ressemblance $D(O1,O2)$ et $D(O2,O1)$, $D(O1, O2) = 1 - \frac{\|v1 - v2\|}{\|v1\|}$ rapporté à $\|v1\|$ $D(O2, O1) = 1 - \frac{\|v1 - v2\|}{\|v2\|}$ rapporté à $\|v2\|$ Nous choisissons la plus grande ressemblance.

Ce programme nous a permis de trouver de nombreuses erreurs de classement dans la base d'objets. De nombreux doublons ont aussi été détectés car les objets pris dans différents sites WEB sont souvent renommés à l'insu du créateur original.

Les résultats du programme de comparaison sont en ligne sur le site, pour chaque objet nous affichons les objets de sa classe les plus similaires selon chacune des méthodes. Ceci permet de se faire une idée juste de la pertinence de ces méthodes.

6.9. Génération de maillages surfaciques avec prise en compte des lignes caractéristiques géométriques et physiques

Participants: Patrick Laug [correspondant], Homan Borouchaki, Boris Cléménçon.

Dans le cadre de cette thèse Cifre débutée en septembre 2004, notre objectif est de détecter certaines lignes et points caractéristiques des surfaces de nature géométrique (en particulier les lignes de crête) et physique (en particulier les lignes de courant), et de les intégrer dans les maillages surfaciques pour améliorer la qualité de l'approximation géométrique et des résultats physiques. Ces travaux s'inscrivent dans un projet ambitieux : automatiser entièrement la chaîne de design-simulation-optimisation utilisée chez Dassault Aviation. Courant 2006, cette deuxième année de thèse s'est articulée sur cinq points :

1. Constitution d'une bibliographie.

2. Identification, définition et formulation précise des différents problèmes.
3. Élaboration de méthodes d'extraction des lignes.
4. Codage des algorithmes.
5. Validation en milieu industriel.

Une présentation de ces études a eu lieu au *7th World Congress on Computational Mechanics* (Los Angeles, CA, July 2006) et un article sera publié dans la revue *Engineering with Computers*.

6.10. Maillage et calcul par la méthode des éléments finis pour la simulation des procédés et du comportement des nanomatériaux

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki, Jian Lu [Université de Hong Kong], Azeddine Benabbou.

Cette thèse commencée en septembre 2005 a pour objectif la simulation du comportement des nanomatériaux par la méthode des éléments finis. Nous considérons ici les nanomatériaux issus d'une gamme de procédés SMAT (*Surface Mechanical Attrition Treatment*). Les procédés SMAT permettent de générer des nanostructures en surface, par des déformations plastiques. Ces déformations sont introduites par des impacts de billes en acier (ou autres matériaux comme le verre ou le céramique) sur la surface du matériau traité, à une vitesse et une fréquence données. Outre les modèles de comportements, les résultats de nos calculs (par éléments finis) dépendront fortement de la fidélité avec laquelle nous reproduisons la géométrie donnée par l'expérience. Le terme de « géométrie » recouvre à la fois les positions des grains sur la surface du matériau (positions aléatoires) et la distribution des tailles des grains (tailles de quelques nanomètres), comme l'illustre la figure 4.

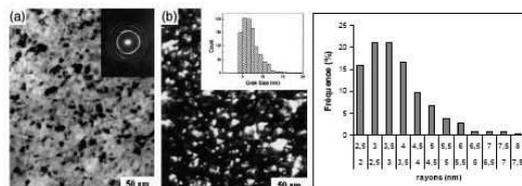


Figure 4. Images (a) et (b) : structure observée par microscopie d'un échantillon de fer pur nanostructuré. À droite, histogramme représentant la distribution (fréquences en fonction des rayons) pour cet exemple.

Cette année, nous nous sommes intéressés au modèle géométrique de l'étude. Les grains sont idéalisés par des cercles (en 2D) ou des sphères (en 3D). À partir de cette approximation et de la distribution donnée par l'expérience, nous avons développé un algorithme de remplissage basé sur la méthode frontale. Cet algorithme a l'avantage d'être rapide et de générer des structures à forte densité (dans le respect de la distribution). Après l'algorithme de remplissage, nous appliquons un procédé de bougé de points pour équirépartir le vide entre les grains (qui se traduit physiquement par des *joints de grains*) sur toute la structure. Le résultat est maillé en vue de calculs par éléments finis. La figure 5 montre un tel maillage.

6.11. Reconstruction de la topologie et génération de maillages de surfaces composées de carreaux paramétrés

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki, Erwan Renaut.

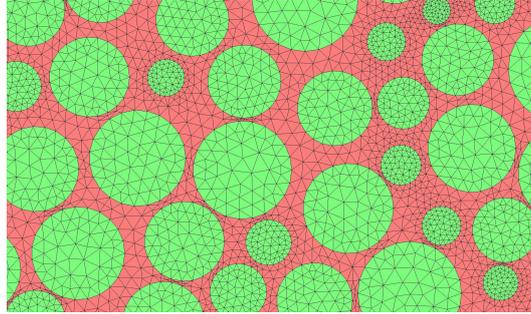


Figure 5. Remplissage par des grains respectant une distribution donnée de rayons et maillage des sous-domaines obtenus.

La génération de maillages de surfaces conçues via un système CAO (conception assistée par ordinateur) exige une définition propre de la topologie des différents carreaux constituant une surface. Ainsi, une surface est composée d'un assemblage conforme de carreaux, chaque carreau est constitué d'un assemblage conforme de segments courbes, et chaque segment courbe est délimité par ses deux extrémités. Ces segments courbes et ces points extrémités constituent le squelette de la surface, et la conformité topologique exige que les relations d'adjacence entre les carreaux soient exprimées en termes de ces entités élémentaires. Ces informations topologiques étant souvent absentes du système CAO, notre objectif est la reconstruction de ce squelette à partir de considérations géométriques, après avoir déterminé la possibilité ou non de cette reconstruction.

Ces recherches constituent la première phase d'une thèse (démarrée en septembre 2006). Après une étude bibliographique sur ce sujet, une présentation a eu lieu à l'INRIA en décembre 2006.

7. Contracts and Grants with Industry

7.1. ARC LNM

Participants: F. Alauzet, P. Frey, A. Loseille, N. Nemitz.

Début 2006 a débuté l'Action de Recherche Coopérative Ligne de Niveaux et Maillage (ARC LNM) coordonnée par le projet Gamma. L'objectif de cette action est de combiner efficacement techniques d'adaptation de maillages et méthodes de lignes de niveaux. L'ARC LNM implique les partenaires suivants:

- INRIA Rocquencourt, projet Gamma,
- INRIA Sophia-Antipolis, projet Smash,
- UMPC Paris VI, Laboratoire Jacques Louis Lions,
- Université d'Orsay
- CNAM Paris

On s'intéresse dans ce projet à la définition et à la gestion des interfaces entre différents fluides incompressibles, au niveau desquelles les propriétés telles que la densité ou la viscosité sont discontinues. Ainsi, la tension superficielle entre deux surfaces est modélisée au moyen d'une condition de saut du champ de pression. Dans ce type de problème, le challenge consiste à simuler de manière réaliste les détails à petite échelle et les effets visqueux des fluides incompressibles multiphasiques. Autrement dit, il s'agit de se focaliser sur les variables d'état exprimant ces propriétés et de considérer notamment les discontinuités du champ de gradient de vitesse, dictées par les différences de viscosité entre fluides. Partant du constat que les techniques de lignes de niveaux,

bien adaptées au suivi des interfaces entre fluides, sont bien analysées par différentes équipes de recherche, et que les méthodes numériques d'adaptation de maillages anisotropes non structurés, qui permettent une réduction substantielle de la complexité des systèmes à résoudre et une précision numérique accrue, deviennent également matures, il nous a semblé pertinent d'aborder ces simulations numériques en combinant ces deux approches.

Dans cette proposition, on envisage donc de coupler des techniques de lignes de niveaux à des méthodes d'adaptation de maillages non structurés basées sur des estimateurs d'erreur pour, correctement et de la manière la plus précise possible, rendre compte de la variabilité des interfaces entre les fluides au cours du temps. Dans le cadre de cet ARC, nous avons choisi de nous intéresser à la simulation numérique de deux fluides incompressibles en contact.

7.2. HISAC

Participants: F. Alauzet, A. Loseille.

Le contrat européen HISAC (highspeed aircraft) vise à analyser la faisabilité par Dassault Aviation d'un avion supersonique de transport de petite taille économiquement viable vérifiant les contraintes environnementales (notamment les nuisances sonores). Notre contribution dans ce projet est :

- de modéliser et de simuler précisément le bang sonique émis par le jet supersonique,
- de modifier le profil aérodynamique afin de réduire le bang tout en préservant les autres coefficients aérodynamiques (dont la traînée).

Pour cela, on cherchera à obtenir une signature du bang sonique avec une forme spéciale contenant plusieurs petits pics au lieu d'un seul grand pic de pression. Des travaux préliminaires ont déjà été effectués dans le cadre du programme national français COS.

Pour la modélisation du bang sonique, l'objectif est d'améliorer la simulation du champ proche de l'avion donné par le solveur volumes finis `Wolf`, qui sert de condition initiale pour le code de propagation `SonicBoom`, par le biais d'une stratégie d'adaptation de maillage développé à l'INRIA au projet Gamma. L'algorithme d'adaptation de maillage est basé sur :

- les nouveaux générateurs de maillage adapté anisotrope (`Yams` pour la peau et `GAMANIC3D` pour le volume),
- et une prescription du champ de métriques, *via* `Matrix`, issue des propriétés locales de la surface et de senseurs CFD.

En particulier, un nouveau senseur CFD sera construit à partir d'une formulation basée sur l'adjoint prenant en compte la précision désirée dans la région de couplage entre le champ proche et le champ lointain.

Cet algorithme d'adaptation de maillage sera alors intégré dans la boucle optimisation développé à l'INRIA dans le projet Tropics afin de minimiser une fonctionnelle de la signature du bang sonique.

La boucle d'adaptation modifiera la métrique dans le but de minimiser l'erreur sur la fonction coût. Cette minimisation utilisera un gradient et un état adjoint calculés avec un outil développé par l'équipe Tropics, `TAPENADE`.

7.3. Contrat de partenariat INRIA/EPFL/Dassault Aviation

Participant: F. Alauzet.

Ce contrat se déroule dans le cadre d'une collaboration entre Dassault Aviation, l'EPFL et l'INRIA. L'objectif est d'analyser le comportement des algorithmes de maillage adaptatif anisotrope pour des écoulements transsoniques autour d'un avion. Deux géométries devraient être fournies par Dassault Aviation: une aile ONERA M6 et un avion d'affaire Falcon.

Pour cela on comparera, sur des configurations de vol définis par Dassault Aviation, les calculs Navier-Stokes réalisés sur deux types de maillages. Les premiers, fournis par Dassault Aviation, sont des maillages de type Navier-Stokes où la couche limite est finement maillée de manière structurée et le reste du domaine est maillé pseudo-uniformement. Ces maillages sont couramment utilisés par Dassault Aviation pour réaliser leurs calculs Navier-Stokes. Les seconds sont des maillages adaptés où cette fois la couche limite et le reste du domaine sont maillés de manière automatique par le processus d'adaptation. On analysera entre autres les estimateurs d'erreur proposés afin de voir s'ils permettent à la fois de bien capturer la couche limite et les autres phénomènes physiques tels que les ondes de chocs ou bien les tourbillons.

Le schéma d'adaptation de maillage utilise :

- Wolf le solveur Navier-Stokes compressible basé sur la méthode Mixte-Element-Volume développé dans le projet Gamma,
- Felib qui construit la métrique à partir de la solution développé à l'EPFL,
- Mmg3d le remaillieur local anisotrope adaptatif développé à l'UMPC Paris VI,
- Meshinter qui interpole le champ de solution d'un maillage sur un autre développé dans le projet Gamma.

7.4. Pôle de compétitivité IOLS : projet Hexotic (hexaèdres)

Keywords: *hexaèdres, maillage, octree.*

Participant: Loïc Maréchal [correspondant].

Le projet Hexotic vise à mettre au point un algorithme et un logiciel de génération automatique de maillages hexaédriques. Comme le projet butait depuis plusieurs années sur le problème des angles vifs, trop complexes à mailler uniquement à l'aide d'hexaèdres, il a été décidé d'ajouter un petit nombre de pyramides et de prismes. L'objectif est aujourd'hui la génération de maillages dit hex-dominants (contenant plus de 90 % d'hexaèdres).

De nombreuses modifications ont été apportées à la méthode cette année, toutes n'ont pas été retenues comme le problème de maillage des ridges :

- Passage de l'octree au maillage dual conforme sans passer par un intermédiaire en polyèdres quelconques. Cela permet une économie de mémoire et de temps de calcul.
- Gestion des géométries dites "non-manifolds".
- Premiers essais de régularisation anisotrope : le respect d'une carte de tailles (ou métrique) fonctionne bien mais l'obtention de cette carte est un gros problème. (définition, lissage, interpolation, etc...)
- Algorithme de maillage des ridges uniquement en hexaèdres à l'aide d'une couche tampon spécifique : donne de très bons résultats dans certains cas mais ne fonctionne pas de manière générique. A été abandonnée pour manque de robustesse.

Tout ceci amène les projets suivants pour l'année 2007 :

- Maillage des ridges : utilisation de patterns en hexaèdres comme tentée dans le projet de 2004 par tranchage mais en utilisant le croisement de ces patterns comme dans le prototype de couches tampons de 2006.
- Travail sur la génération de cartes de tailles anisotropes.
- Et toujours la gestion des géométries minces et des angles aigus.

7.5. Pôle de compétitivité IOLS : maillage surfacique

Participant: Patrick Laug [correspondant].

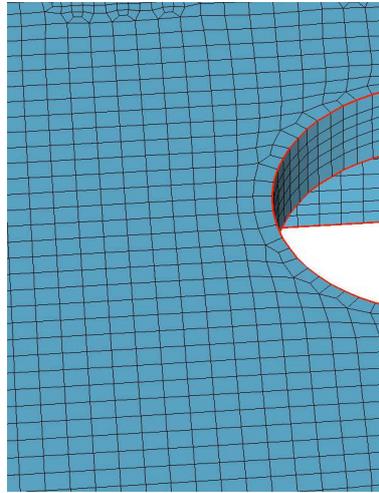


Figure 6. Zoom sur une pièce mécanique : une couche tampon entoure les lignes de ridges afin d'éviter que certains éléments aient deux arêtes alignées sur une même droite.

On considère ici le cas du maillage d'une surface, voire d'un volume défini par sa frontière surfacique. Dans un contexte de CAO, toute surface est généralement représentée par un assemblage de carreaux paramétrés. Notre objectif est de générer automatiquement un maillage de qualité (pour des calculs par éléments finis) à partir d'une surface ainsi représentée. Les maillages surfaciques ainsi générés peuvent être, au choix, « carreaux-dépendants » (*patch dependent*) ou « transcarreaux » (*patch independent*). Dans les maillages carreaux-dépendants, les frontières partagées par plusieurs carreaux sont imposées dans le maillage final de la surface. En d'autres termes, toute arête de la discrétisation d'une courbe interface est aussi une arête du maillage de la surface. Cette propriété peut être recherchée lorsque la courbe interface traduit une singularité géométrique (typiquement une ligne vive) ou lorsque la présence de ces carreaux a un sens physique particulier. En revanche, ce respect des contours des carreaux peut aboutir à la création de petites arêtes (par rapport à la taille spécifiée) ou d'éléments de qualité médiocre. Pour y remédier, une méthode consiste à construire dans un premier temps un maillage carreaux-dépendant, et d'utiliser dans un second temps des techniques de simplification de maillage pour produire un maillage transcarreaux.

Pour atteindre notre objectif de génération automatique de maillages de surfaces multicarreaux, l'approche retenue est basée sur le mailleur surfacique BLSURF. Pour prendre en compte la définition de la surface à mailler, ce logiciel doit pouvoir communiquer avec un système de CAO. Dans notre contexte, nous avons intégré BLSURF dans les plateformes OPEN CASCADE et SALOMÉ (voir figure 7). Ainsi, une API spécifique `cad_occ.cxx` a été développée (environ 900 lignes en langage C++). En outre, le logiciel BLSURF où cohabitaient deux langages de programmation (Fortran 90 et C) est à présent entièrement écrit en C pour améliorer la portabilité (après conversion d'environ 15 000 lignes de Fortran 90 en un nombre équivalent de lignes de C). Par cette approche, la première version de l'outil développé permet de générer automatiquement des maillages triangulaires carreaux-dépendants ou transcarreaux à partir d'une surface définie sous OPEN CASCADE. Dans une deuxième version en cours de développement, cet outil pourra également générer des maillages de quadrilatères obtenus par appariement de triangles.

7.6. Contrat de partenariat Dassault Aviation

Participants: Patrick Laug [correspondant], Hومان Borouchaki.

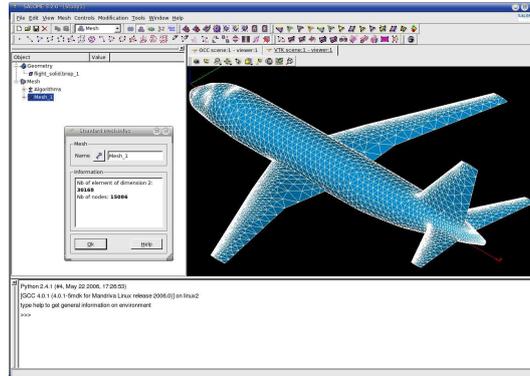


Figure 7. Maillage surfacique d'un Airbus : surface définie sous OPEN CASCADE, maillage réalisé par BLSURF et stocké en mémoire via SALOMÉ.

Dassault Aviation, souhaitant améliorer son processus de génération de maillage de surface, a évalué le logiciel BLSURF. Ce benchmark a permis, d'une part, de prouver les potentialités de ce mailleur, et d'autre part d'identifier différents sujets de recherche pouvant donner lieu à de nouveaux développements de logiciel. Ces sujets ont été classés en quatre thèmes : intégration de BLSURF dans l'évaluateur de Dassault Aviation, adaptation de maillages, maillages quadrangulaires et maillages transcarreaux. La plupart de ces sujets ont été traités dans le cadre d'un partenariat d'une durée de trois ans (de 2004 à 2006) entre l'INRIA, l'UTT et Dassault Aviation.

À la fin de ce contrat de partenariat, l'accent a été mis sur la reconstruction de la topologie d'une surface définie dans l'environnement de Dassault Aviation. Un nouveau partenariat d'une durée de trois ans est en cours d'acceptation.

7.7. Design Opti

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Le projet Design Opti, *Design Automatique et optimisation des surfaces additionnelles pour le procédé d'emboutissage de carrosseries automobiles*, regroupe l'INRIA, l'UTT, l'URCA et la société Chausson Outillages.

Dans la fabrication des carrosseries automobiles ou des composants d'électroménager en tôles minces par le procédé d'emboutissage, certaines surfaces doivent être ajoutées à la pièce désirée. Ces surfaces additionnelles comprennent des surfaces complémentaires, des murs de protection d'aspect, des arrondis d'entrée matrice et des surfaces sous serre-flan. Elles ont une grande influence sur d'éventuels défauts comme la striction, le plissement et les problèmes d'aspect. La conception de ces surfaces est difficile et fastidieuse, elle nécessite beaucoup d'essais-corrrections numériques et expérimentaux longs et coûteux. L'objectif principal de cette étude est la mise au point d'une procédure automatique de conception et d'optimisation de ces surfaces additionnelles dans le procédé d'emboutissage de tôles minces. Au cours de cette année 2006, nous avons mis au point une définition réaliste de ces surfaces, permettant ainsi d'automatiser totalement la phase de maillage.

7.8. Snecma Moteurs - Division Moteurs Fusée (Vernon)

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Cette étude concerne une méthode originale d'interpolation d'une fonction $z = f(x, y)$ basée sur la génération de maillages de la surface cartésienne associée. La construction du maillage est gouvernée par un estimateur a posteriori d'erreur d'interpolation. En outre, des techniques diffuses sont appliquées pour améliorer la qualité d'interpolation.

7.9. Nippon Steel (Japon)

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Au cours de l'année 2006, le groupe sidérurgiste Nippon Steel a évalué puis acquis le logiciel BL2D afin de simuler des procédés de mise en forme des matériaux. Des études menées préalablement en collaboration avec l'Université de Technologie de Troyes ont montré la nécessité de remaillages fréquents au cours de tels calculs. Ceci est dû à la forte distorsion géométrique des éléments finis et à l'adaptation au comportement physique de la solution (déformations plastiques ou champs d'endommagement). Une méthodologie a été proposée, spécifiant les étapes nécessaires pour remailler une structure mécanique au cours de grandes déformations élastoplastiques avec endommagement. Ce procédé met notamment en jeu des estimateurs d'erreur géométriques et physiques. La méthode proposée a été intégrée dans un environnement de calcul utilisant le mailleur adaptatif BL2D et le solveur ABAQUS/Explicit. Les outils développés sont à présent exploités par le *Forming Technologies R&D Center* de l'entreprise *Nippon Steel Corporation*.

8. Dissemination

8.1. Participation à des colloques, séminaires, invitations

- F. ALAUZET, *Méthodes d'ordre élevées et adaptation de maillage pour les lois de conservation*, Séminaire du Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique, décembre 2006.
- B. CLÉMENÇON, H. BOROUCAKI, P. LAUG, *Crest line extraction for parametric surface meshing*, 7th World Congress on Computational Mechanics (Los Angeles, CA, July 2006).
- P.L. GEORGE, *Maillage : des problèmes numériques en géométrie discrète à la résolution de problèmes d'ingénierie*, vulgarisation, Lycée Lakanal et lycée Parc de Vilgénis, février et avril 2006..
- P.L. GEORGE, *Surface reconstruction Curves and Surfaces*, Avignon, juillet 2006.
- P. LAUG, *Contribution à la génération automatique de maillages de qualité pour la simulation numérique*, soutenance d'Habilitation à Diriger des Recherches, Laboratoire Jacques-Louis Lions, Paris VI, 9 mars 2006.

8.2. Enseignement

- F. Alauzet a donné des cours à l'École Centrale de Paris en 2^e année, sur la "Simulation numérique en géométries complexes : apport des techniques modernes de l'adaptation de maillages. Utilisation de Matlab".
- P.L. George a donné un cours à l'EISTI, à Pau, sur la CAO et le maillage.
- P. Laug a donné des cours, TD et TP intitulés « CAO - Maillage » à l'Université Paris XII, 2^e année de Master mention Sciences de l'Ingénieur et Applications (SdIA), spécialité Conception des Systèmes Mécaniques et Énergétiques (CSME).

9. Bibliography

Year Publications

Doctoral dissertations and Habilitation theses

- [1] P. LAUG. *Contribution à la génération automatique de maillages de qualité pour la simulation numérique*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Laboratoire Jacques-Louis Lions, Paris VI, mars 2006.

Articles in refereed journals and book chapters

- [2] F. ALAUZET, P. FREY, P. GEORGE, B. MOHAMMADI. *3D transient fixed point mesh adaptation for time dependent problems. Application to CFD simulations*, in "J. Comp. Phys.", Available online, 2006.
- [3] F. ALAUZET, X. LI, E. S. SEOL, M. SHEPHARD. *Parallel anisotropic 3D mesh adaptation by mesh modification*, in "Eng. w. Comp.", vol. 21, n^o 3, 2006, p. 247-258.
- [4] Y. MESRI, F. ALAUZET, A. LOSEILLE, L. HASCOET, B. KOOBUS, A. DERVIEUX. *Continuous mesh adaptation models for CFD*, in "CFD Journal", to appear, 2006.

Publications in Conferences and Workshops

- [5] F. ALAUZET. *Adaptive sonic boom sensitivity analysis*, in "Proc. ECCOMAS Computational Fluid Dynamic Conf., Egmond ann Zee, The Netherlands", September 2006.
- [6] F. ALAUZET, P. FREY. *A local approach for anisotropic mesh adaptation*, in "MAFELAP Conference, Brunel University, Uxbridge, England", June 2006.
- [7] F. ALAUZET, A. LOSEILLE, A. DERVIEUX, P. FREY. *Multi-dimensional continuous metric for mesh adaptation*, in "Proc. 15th International Meshing Roundtable, Birmingham, AL, USA", September 2006.
- [8] B. CLÉMENÇON, H. BOROUCHEKI, P. LAUG. *Crest line extraction for parametric surface meshing*, in "7th World Congress on Computational Mechanics, Los Angeles, CA", vol. CD-ROM, décembre 2006.
- [9] P. GEORGE. *Adaptive mesh generation in 3 dimensions by means of Delaunay based method. Applications to mechanical problems*, in "Proc. ECCM: Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, Portugal", June 2006.

References in notes

- [10] J. BOISSONNAT, M. YVINEC. *Géométrie algorithmique*, Ediscience, 1995.
- [11] P. CIARLET. *Basic Error Estimates for Elliptic Problems*, vol. II, Ciarlet, P. G. and Lions, J. L., North Holland, 1991.
- [12] P. FREY, P. GEORGE. *Maillages. Applications aux éléments finis*, Hermès Science Publications, Paris, 1999.
- [13] P. GEORGE, H. BOROUCHEKI. *Triangulation de Delaunay et maillage. Applications aux éléments finis*, Hermès, 1997.
- [14] A. GEORGE. *Computer implementation of the finite element method*, Ph. D. Thesis, Dep. of Computer Science, Stanford, 1971.
- [15] R. LOHNER. *Progress in grid generation via the advancing front technique*, in "Engineering with computers.", vol. 12, 1996, p. 186-210.
- [16] F. PREPARATA, M. SHAMOS. *Computational geometry, an introduction*, Springer-Verlag, 1985.

- [17] M. SHEPHARD, P. GEORGE. *Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Finite Octree Technique*, in "Int. J. Numer. Methods Eng.", vol. 32, n^o 4, 1991, p. 709-749.

- [18] R. VERFURTH. *A review of a posteriori error estimation and adaptive refinement techniques*, Wiley-Teubner, 1996.