



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Project-Team Gamma

*Génération Automatique de Maillages et
Méthodes d'Adaptation*

Paris - Rocquencourt

THEME NUM

Activity
R *eport*

2007

Table of contents

1. Team	1
2. Overall Objectives	1
2.1. Introduction	1
2.2. Highlights of the year	2
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-V3	6
5.4. Logiciel BLMOL	7
5.5. Logiciel Medit	7
5.6. Logiciel GAMHIC3D	7
5.7. Logiciel GHS3D-V3	7
5.8. Logiciel YAMS	7
6. New Results	8
6.1. Adaptation de maillages anisotropes multi-échelles	8
6.2. Adaptation de maillage par minimisation de fonctionnelles. Application à la prédiction du bang sonique.	10
6.3. Capture précise des discontinuités dans un calcul CFD par adaptation de maillage	10
6.4. Combiner efficacement techniques d'adaptation de maillages et méthodes de lignes de niveaux	11
6.5. Écoulements avec interfaces et adaptation de maillage	11
6.6. Reconstruction de surface à partir d'un nuage de points	13
6.7. Triangulation de Delaunay dynamiquement contrainte et maillage	15
6.8. Site de données et comparateur de formes 3D	15
6.9. Génération de maillages surfaciques avec prise en compte des lignes caractéristiques géométriques et physiques	16
6.10. Maillage et calcul par la méthode des éléments finis pour la simulation des procédés et du comportement des nanomatériaux	17
6.11. Reconstruction de la topologie et génération de maillages de surfaces composées de carreaux paramétrés	20
6.12. Maillages surfaciques quadrilatéraux	21
6.13. Intégration de discrétisations de courbes gauches dans un maillage surfacique	21

6.14. Modélisation géométrique de surfaces additionnelles pour le procédé d'emboutissage	22
7. Contracts and Grants with Industry	22
7.1. ARC LNM	22
7.2. HISAC	23
7.3. Contrat de partenariat INRIA/EPFL/Dassault Aviation	24
7.4. Pôle de compétitivité EHPOC : projet Hexotic (hexaèdres)	24
7.5. Pôle de compétitivité EHPOC : maillage surfacique	25
7.6. Contrat de partenariat Dassault Aviation	26
7.7. Design Opti	26
7.8. Nippon Steel (Japon)	27
8. Dissemination	27
8.1. Participation à des colloques, séminaires, invitations	27
8.2. Enseignement	28
9. Bibliography	28

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 Reo)]

Personnel Inria

Frédéric Alauzet [CR]

Éric Saltel [DR]

Collaborateurs extérieurs

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

Loïc Maréchal [Ingénieur Expert]

Chercheur post-doctorant

Lahcen Boulaajine

Nicolas Nemitz

Chercheurs doctorants

Azeddine Benabbou [UTT]

Boris Cléménçon [UTT]

Adrien Loseille [Université Paris 6]

Géraldine Olivier [Université Paris 6]

Erwan Renaut [UTT]

Stagiaires

Antonio-Carlos Pasinelli [ENSEEIHT]

2. Overall Objectives

2.1. Introduction

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 [16].

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 de modélisation géométrique, de post-traitement et de visualisation des résultats issus de tels calculs [17].

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.).

2.2. Highlights of the year

Cette année l'INRIA a organisé la deuxième édition du **Workshop Tetrahedron**, "Grid generation for numerical computations". Cette manifestation a réuni plus de 60 personnes issues de 11 pays, parmi lesquelles un tiers d'industriels, sur deux jours et demi.

Plus d'information sur cette manifestation ainsi que toutes les présentations sont accessibles sur le site du workshop : http://www-rocq.inria.fr/who/Frederic.Alauzet/tetra_eng.html.

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 [18].

Par ailleurs, l'approche développée en deux dimensions et en trois dimensions se prête à une extension *anisotrope*. Un maillage 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 [19]. 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 [20], 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 [22].

3.2.4. Géométrie algorithmique

La géométrie algorithmique est apparue, en tant que discipline, vers le milieu des années 80, [21], puis s'est développée au fil des ans, voir par exemple [15]. 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 [16], [23]. 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 nœuds 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-c.inria.fr/gamma/download/download.php>

Table 1. Tableau des logiciels et des modules.

Nom	Dimension	Disponibilité
BL2D-V2	2D	transfert
BLSURF-V3	3D surfacique	transfert
BLMOL	3D surfacique	transfert
Medit	2D/3D	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-V3

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 est un générateur de maillages surfaciques. Ces derniers peuvent définir la frontière d'un maillage volumique qui est ensuite généré et transmis à un solveur, ou peuvent être transmis directement au solveur. Pour définir une surface tridimensionnelle, les méthodes les plus répandues consistent à placer des points de contrôle à l'aide d'un système de CAO, ou encore à obtenir automatiquement des points d'interpolation à l'aide d'un « scanner ». Dans ces deux approches, la surface est représentée de manière interne par un assemblage de carreaux paramétrés.

La méthode implémentée dans le logiciel BLSURF permet de générer, pour chaque carreau, un maillage qui respecte certaines spécifications de tailles d'éléments et qui approche fidèlement la « géométrie » de la surface. La méthode utilisée, dite indirecte, consiste à mailler les domaines de paramètres (2D) et à appliquer le maillage résultant dans l'espace réel (3D). Les nœuds du maillage sont générés par une méthode frontale ou algébrique, et leur connexion est réalisée par une méthode de Delaunay généralisée. Un maillage conforme est réalisé grâce à une discrétisation préalable des courbes interfaces constituant les frontières communes des carreaux. La méthodologie appliquée (maillage obtenu par assemblage des maillages des carreaux) préserve les contours de chaque carreau, ce qui est généralement souhaité. Cependant, cela risque de provoquer la création de petites arêtes et d'éléments de qualité médiocre. Grâce à une option du logiciel BLSURF, des maillages transcarreaux peuvent être générés par élimination des petites arêtes tout en conservant la géométrie de la surface.

La version précédente de BLSURF était codée en deux langages différents, à savoir Fortran et C. Par ailleurs, les différents composants de BLSURF communiquaient entre eux par l'intermédiaire de fichiers texte. La nouvelle version V3 est totalement réécrite en langage C afin de faciliter sa portabilité quelle que soit la plateforme utilisée, et comprend les nouvelles fonctionnalités suivantes :

- Transmission des données par mémoire ou par fichier, sur option de l'utilisateur.
- Traitement plus robuste de la récupération de la topologie (soudage des différents carreaux).
- Détermination par continuité d'une dérivée bien définie pour les points singuliers.
- Intégration complète dans BLSURF du module de simplification DECIMESH (sans génération d'un fichier intermédiaire de maillage).
- Projection des sommets du maillage simplifié sur la surface exacte (les sommets du maillage généré par DECIMESH sont proches de cette surface mais généralement n'en font pas partie).
- Construction d'un support géométrique pour une visualisation rapide de la surface (support également utilisé pour la projection de points sur la surface).
- Maillage en quadrilatères (sans décimation).

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 (bascules 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. Adaptation de maillages anisotropes multi-échelles

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 mailleurs adaptatifs d'obtenir des maillages de 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 construire les cartes de métriques afin que le mailleur adaptatif soit plus efficace. Les axes sont les suivants :

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

L'adaptation de maillage multi-échelles est basée sur la théorie des métriques continues anisotropes. Au cours de cette année, on a poursuivi le développement de cette théorie. L'idée clef a été d'avoir une vision continue de la notion de maillage, c'est-à-dire de considérer une fonction continue représentant le maillage. Cette vision fait sauter beaucoup de verrou relatif à la notion de maillage, notamment le fait que ce soit un objet mathématique discret, et permet de généraliser les études d'estimateur d'erreur pour traiter des problèmes plus complexes en utilisant des outils de géométrie différentielle.

Cette théorie a été développée en toutes dimensions pour toute 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.

De plus, le choix de la norme L^p revêt une importance cruciale 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 adéquat. Pour contrôler la norme L^∞ de l'erreur d'interpolation, la métrique spécifie de mettre tous les points dans les discontinuités. Les normes L^1 et L^2 sont beaucoup plus appropriées. Par ailleurs, le choix du p permet de contrôler la sensibilité de l'estimateur d'erreur.

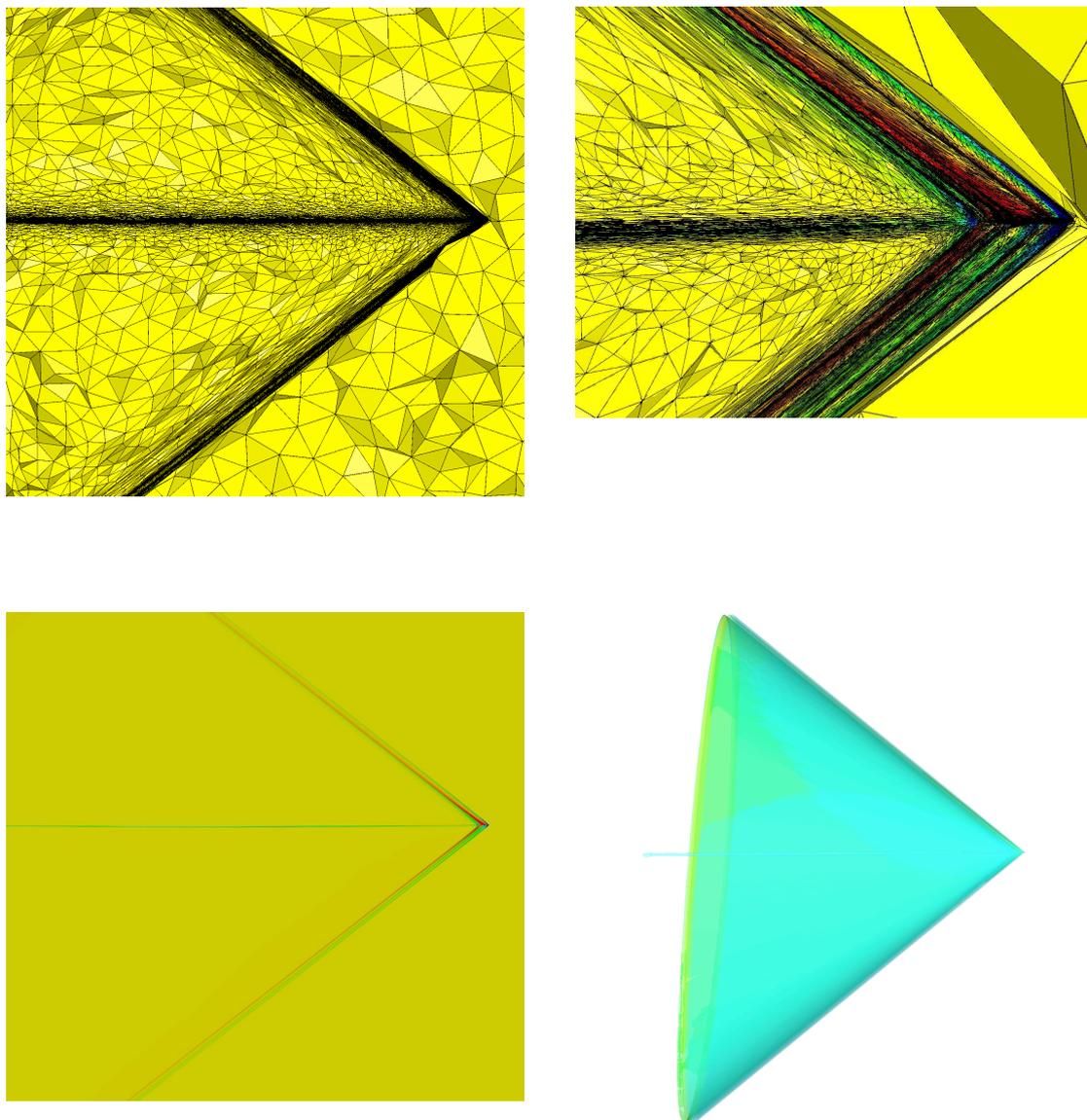


Figure 1. Écoulement supersonique autour d'un avion. En haut, maillage final adapté et en bas, solution (à gauche) et cônes de Mach (à droite) associés obtenus avec les métriques multi-échelles en norme \mathbf{L}^2 .

Les résultats obtenus avec cette nouvelle approche sont très satisfaisants. Elle a été appliquée avec succès pour des écoulements supersoniques autour d'un avion. Elle a permis, entre autre, de propager le signal acoustique (*i.e.*, la signature de pression) sur plusieurs kilomètres alors que la résolution du maillage sur l'avion est de l'ordre du millimètre, 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. Pour évaluer les adjoints, on utilise le logiciel de Différentiation Automatique TAPENADE développé dans le projet Tropics.

Cette année, on a développé la théorie d'adaptation de maillage anisotrope pour les fonctionnelles. On a réalisé une analyse d'erreur "goal-oriented" pour le modèle des équations d'Euler en 3D. Cette analyse prend en compte notre méthode de discrétisation de volumes finis. Tout d'abord, une analyse a priori est utilisée pour mettre en évidence l'influence locale de l'erreur d'interpolation. Puis, la spécification de la fonctionnelle, que l'on désire calculer de manière précise, est réalisée par le biais de l'état adjoint. La métrique optimale, qui contient les rapports d'anisotropie, pour contrôler cette fonctionnelle est obtenue par un calcul de variation. La résolution de ce problème permet d'obtenir la sensibilité de chaque sommet du maillage sur la fonction coût.

Des premiers résultats concluants, utilisant cette approche, ont été obtenus lors de simulations d'un avion supersonique en trois dimensions.

Cette approche sera plus profondément analysée 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 est, 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.

6.3. 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 représentants, spécifiquement les chocs. Le but de ce travail (dans le cadre du post-doctorat de Lachen Boulaajine) a été 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. On a exhibé un détecteur simple et efficace qui fonctionne sur toute la gamme de cas concrets que l'on s'était donné. Ensuite, un premier algorithme permettant de bouger les sommets du maillage de manière à les réaligner sur ces discontinuités a été implémenté et testé.

Ce détecteur de discontinuité a, par ailleurs, été utilisé dans notre solveur numérique pour améliorer le processus de limiteur afin de ne l'utiliser que dans les régions de discontinuités.

6.4. 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 Lignes de Niveaux et Maillage 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.

La Figure 2 illustre un résultat obtenu avec le solveur Stokes bi-fluide développé au cours de ce travail où l'interface est traitée de manière explicite dans la méthode des Elements Finis. Cette interface est advectée précisément par la méthode des lignes de niveaux couplée à un algorithme de maillage adaptatif.

6.5. 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].

Toujours dans le cadre de l'ARC LNM, on a analysé le comportement des méthodes d'adaptation de maillage pour des calculs multi-fluides instationnaires en utilisant l'expérience du projet Smash pour ce type de simulation.

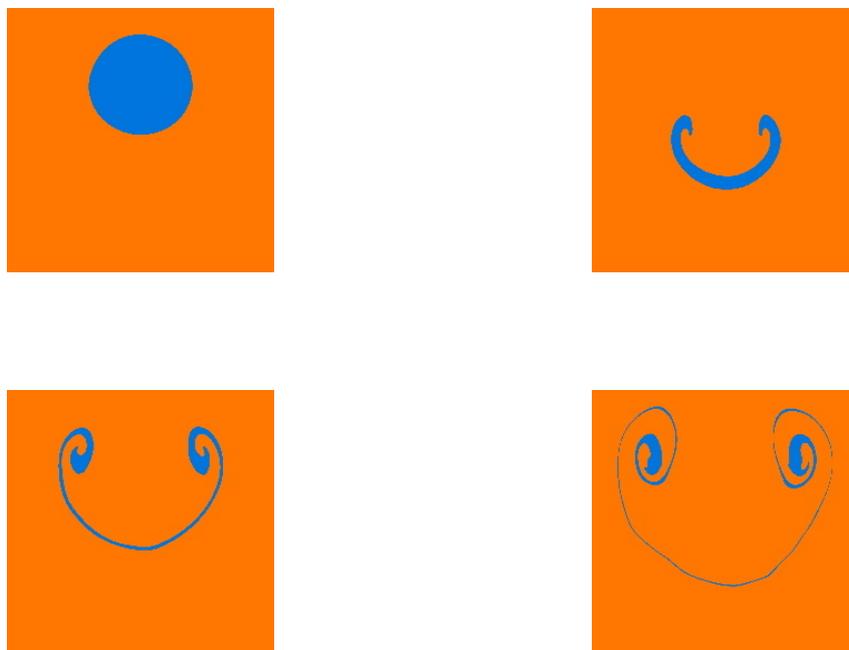


Figure 2. Evolution d'une bulle. Cette simulation a été réalisée dans une plate-forme de calcul adaptatif où l'écoulement est calculé par un solveur Stokes bi-fluide et l'interface est gérée par la méthode des lignes de niveaux.

Les équations de Naviers-Stokes incompressibles 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. La méthode des lignes de niveaux, couplées avec les techniques de maillage adaptatif, apportent une réponse élégante à l'advection haute précision de l'interface.

Dans un premier temps, on s'est attaché à construire une métrique pour adapter le maillage à l'interface pour qu'elle soit advectée très précisément par la méthode des lignes de niveaux. Deux approches ont été considérées. La première se base sur les variables physiques qui sont discontinues à l'interface et permettent donc de la détecter. La deuxième est basée sur la fonction distance et consiste à contrôler l'erreur d'interpolation sur l'interpolé de Clément au voisinage de la ligne de niveaux 0 représentant l'interface.

Ensuite, on a mis en évidence qu'il était nécessaire de prendre en compte la dynamique de l'écoulement pour calculer précisément ces problèmes bi-fluides. En effet, adapter le maillage uniquement à l'interface n'est pas suffisant car le mouvement de l'interface est influencé par la dynamiques des deux fluides. Pour cela, on a exhibé un senseur qui permet d'adapter le maillage dans cette optique.

Cette approche a été appliquée avec succès sur de nombreux exemples. Sur la Figure 3 est illustrée la chute d'une colonne d'eau en 3D sur un obstacle.

6.6. 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.

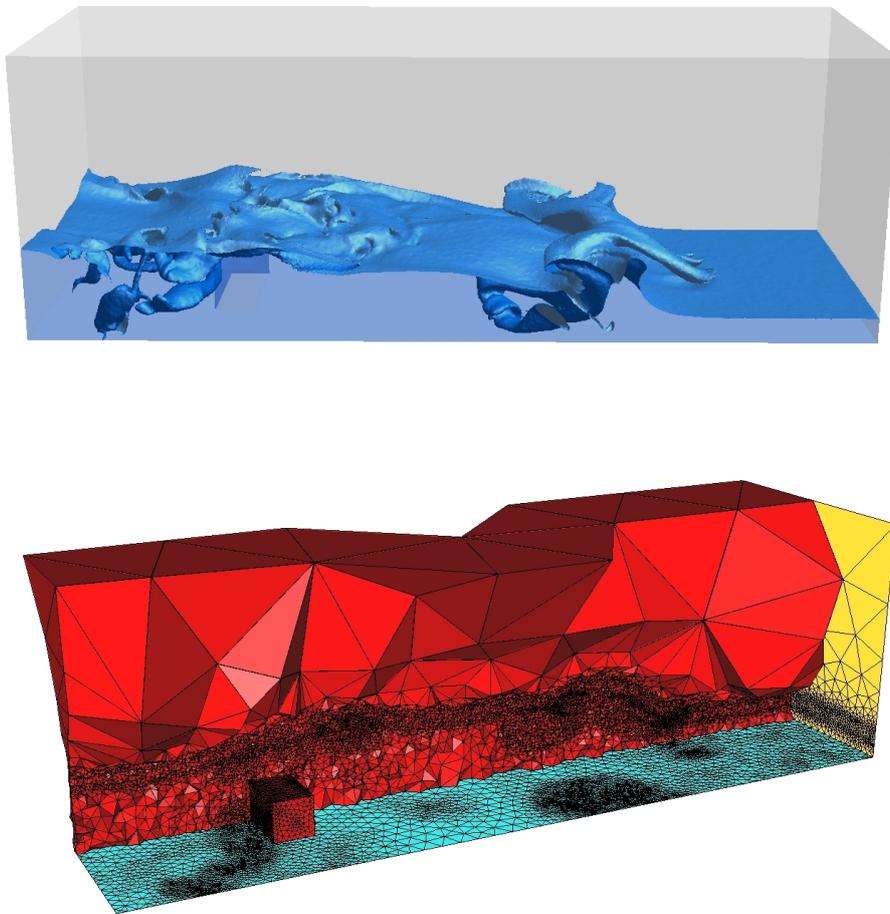


Figure 3. Chute d'une colonne d'eau sur un obstacle en trois dimensions. En haut, l'interface à $T = 240s$. En bas, le maillage final adapté associé.

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 améliorée par rapport à l'an dernier et, surtout, indépendante de l'échantillon traité (via la mise en place d'un ordre d'insertion judicieux construit sur des idées de surface de Hilbert) 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 18 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'aucun critère parmi les critères de pertinence n'est définitif et que certains critères 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 dont le codage ne pose pas de problèmes particuliers. Notons qu'un défaut d'orientabilité de la surface se traduit ici par une auto-intersection bien fâcheuse.

6.7. Triangulation de Delaunay dynamiquement contrainte et maillage

Keywords: *Delaunay admissibilité, triangulation contrainte dynamiquement, triangulation de Delaunay.*

Participants: Paul Louis George [correspondant], Éric Saltel, Antonio-Carlos Pasinelli.

Construire la triangulation de Delaunay ayant pour sommets les sommets du maillage de la frontière (ligne polygonale ou surface polyédrique) d'un domaine n'assure pas, en général, l'existence de ce maillage (ses segments ou ses triangles) dans le maillage (ses triangles ou ses tétraèdres) sauf dans le cas où les données sont Delaunay admissibles.

L'idée de cette étude est de trouver un ordre dans l'insertion des sommets initiaux qui fasse que la triangulation de Delaunay contrainte construite respecte ces données. En effet, un segment donné étant construit, il ne sera jamais détruit par la suite. Le tri repose sur un graphe de dépendance entre les sommets initiaux.

En pratique, la présence de cycle tout comme le coût de construction du graphe rendent inopérante cette méthode qui n'apporte pas de gain comparée avec quelques heuristiques judicieuses. On a ici l'exemple même d'une bonne idée papier qui ne s'applique pas vraiment, ..., à suivre ou à reprendre.

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>

Par ailleurs, les objets du site sont marqués en indiquant si ils sont maillables par GHS3D, si ils sont remaillables par un de nos mailleurs 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.

Vu la taille du site de données de maillages, il n’était plus possible de garantir le classement des objets (cela était fait à la main). Nous avons donc créer 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 operations 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 methodes 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 differentes 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 sauvons le vecteur des valeurs absolues des coeficients 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], Houman Borouchaki, Boris Cléménçon.

Dans le cadre d'une thèse Cifre débutée en septembre 2004, nos travaux traitent de l'amélioration géométrique des maillages surfaciques, en plaçant les points et les arêtes le long des lignes de crête les plus significatives des surfaces plutôt qu'en réduisant la taille des arêtes. Ceci procure notamment deux avantages :

- Lors de la construction de maillage et lorsque la longueur des arêtes h n'est pas adaptée au rayon de courbure minimum, des ondulations parasites apparaissent au voisinage des zones très courbées. Le placement correct des points et des arêtes le long des lignes de crête permet de supprimer ce phénomène parasite, sans augmenter le nombre de nœuds.
- Lorsque h est grand par rapport aux rayons de courbure locaux, l'approximation géométrique, mesurée par exemple en évaluant le volume entre la surface et le maillage, est mauvaise. Imposer les lignes de crête permet de contraindre le maillage à mieux respecter la géométrie au prix d'une perte de régularité des éléments.

D'un point de vue géométrique, nous avons repris les travaux fondamentaux de Porteous et de Thirion, pour étendre les fonctions d'extrémalités au cas des surfaces paramétrées. Celles-ci nous permettent d'extraire les lignes extrémales, incluant des lignes de crête et des lignes de moindre courbure. Nous proposons ensuite deux nouvelles fonctions pour caractériser le type des lignes extrémales (lignes de crête ou lignes de moindre courbure). Les ombilics et les lignes de courbures, très liés à l'étude des lignes extrémales, ont été étudiés, ainsi que des singularités comme les lignes ombiliques ou les points bleus et rouges foncés.

Deux méthodes sont proposées pour extraire le graphe extrémal : une variante adaptative du "marching line" et une nouvelle méthode, la méthode intégrale. Nous proposons aussi des variantes de ces méthodes pour extraire les lignes paraboliques ou générer automatiquement un réseau de lignes de courbure. Les lignes discrètes déterminées forment des graphes, dont les points et les arêtes sont stockées dans une structure adaptée : un maillage d'arêtes.

Les graphes sont simplifiés afin de faciliter la génération du maillage puis les lignes polygonales sont extraites du maillage d'arêtes, puis simplifiées et enfin interpolées. Ces lignes analytiques sont rediscrétisées afin de satisfaire la taille des mailles spécifiée h sur la surface. Nous utilisons la méthode combinée frontale/Delaunay pour générer des maillages surfaciques via le domaine des paramètres en incluant des lignes internes imposées.

De nombreux exemples montrent l'intérêt de la prise en compte des lignes de crête dans un maillage surfacique. La suppression du crénelage est mise en évidence et il est possible de réduire le volume entre la surface et le maillage dans le cas où h est grand par rapport aux rayons de courbure locaux (voir Figures 4 et 5). En appliquant ces méthodes à des surfaces polynomiales par morceaux, souvent utilisées dans l'industrie, nous détectons des lignes de crête parasites, conséquences du type de surface utilisée pour modéliser les surfaces. Les filtres proposés ne remédient pas à ce problème car les lignes intuitivement intéressantes ne font pas partie de l'ensemble des lignes déterminées. En effet, les surfaces polynomiales par morceaux utilisées ondulent inutilement malgré les opérations de lissage : c'est le bruit géométrique. Nous proposons donc des voies pour améliorer malgré tout la qualité géométrique des maillages pour ce type de surface en respectant les lignes de courbure et les frontières de facettes remarquables.

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.

Ce travail de thèse commencé 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 la 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

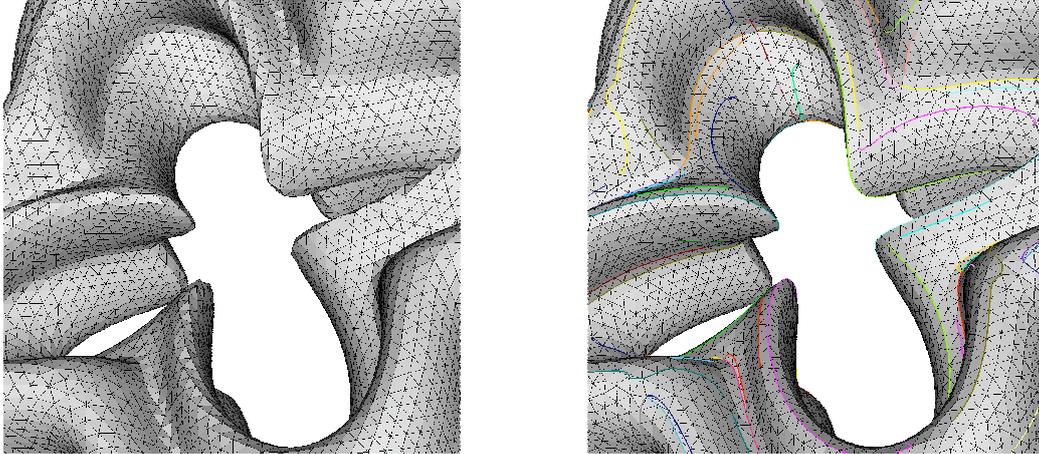


Figure 4. Maillage uniforme d'une surface analytique sans (à gauche) et avec (à droite) prise en compte des lignes de crête.

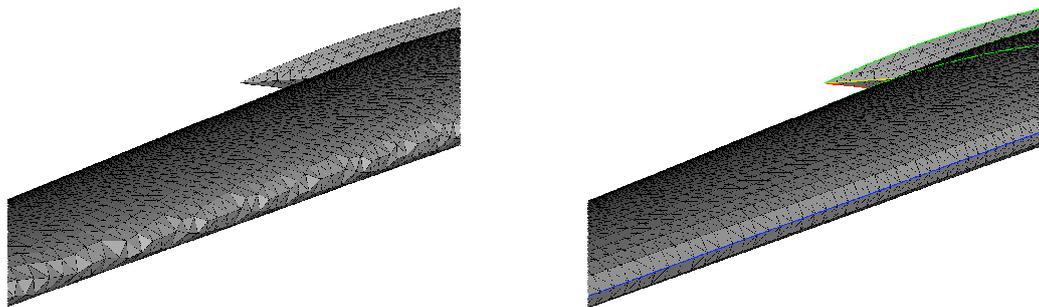


Figure 5. Maillage uniforme de voilure générique sans (à gauche) et avec (à droite) prise en compte des lignes de crête.

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).

Notre démarche comporte trois étapes : modélisation géométrique, maillage et calcul par éléments finis pour la caractérisation du comportement des nanomatériaux.

La modélisation géométrique a fait l'objet de plusieurs études dans lesquelles le domaine nanostructuré est décrit par un rectangle en 2D ou un parallélépipède en 3D, contenant des disques ou des boules dont les rayons sont définis par une distribution donnée. Les disques ou les boules représentent les grains et les espacements entre ceux-ci les joints de grains. Dans la réalité, les grains observés expérimentalement ressemblent plutôt à des polyèdres.

La modélisation des grains par des disques en 2D ou par des boules en 3D simplifie considérablement les calculs géométriques. En outre, elle offre une bonne approximation pour des problèmes complexes où les calculs avec les formes réelles des grains sont très difficiles à réaliser. Plus exactement, cette modélisation simplifiée d'une nanostructure consiste à remplir le domaine avec des disques ou des boules, de telle sorte que la distribution des rayons de ces disques ou boules soit respectée, que les grains soient séparés par des joints de grains d'épaisseur minimale spécifiée, que la structure soit la plus dense possible, et que l'assemblage des disques (ou boules) soit le plus irrégulier possible (pas de périodicité pour ne pas fausser la réalité). Cet assemblage de disques (ou boules) est transformé via des techniques de triangulation en une structure composée de cellules de Voronoï reflétant mieux la forme polyédrique des grains réels.

Nous proposons une nouvelle variante de la méthode frontale, généralisable en trois dimensions, s'inspirant des techniques de génération de maillage utilisant une approche similaire. L'analogie entre cette approche frontale pour le maillage et la nouvelle variante pour l'algorithme de remplissage consiste à assimiler les nœuds à des disques (représentant les grains) et les arêtes (les connectivités du maillage) à des couples de disques voisins. Les rayons des disques sont générés aléatoirement tout en respectant la distribution imposée. Le remplissage par la méthode frontale conduit souvent à une hétérogénéité de la densité locale dans la structure, en d'autres termes, certains endroits sont plus denses que d'autres. Ce phénomène peut avoir une incidence directe sur les résultats des simulations numériques des structures granulaires. Ainsi, un algorithme de bougé de disques est appliqué pour rétablir l'homogénéité de l'ensemble. Pour transformer les disques représentant les grains en cellules polygonales, il suffit de générer un diagramme de puissance (ou de Laguerre) qui est une généralisation du diagramme de Voronoï.

Pour effectuer des simulations numériques par la méthode des éléments finis, une discrétisation spatiale – ou maillage – est nécessaire. Par exemple, chaque cercle doit être approché par un polygone et chaque sphère par l'assemblage des faces triangulaires d'un polyèdre. Ce passage d'un modèle continu à un modèle discret est effectué à l'aide des trois logiciels BL2D, BLSURF et GHS3D, développés par l'équipe-projet GAMMA de l'INRIA.

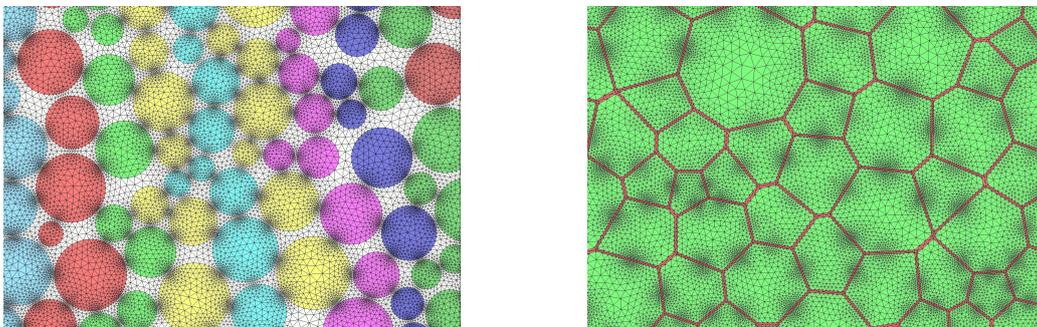


Figure 6. A gauche, maillage avec des disques. A droite, maillage avec des cellules polygonales.

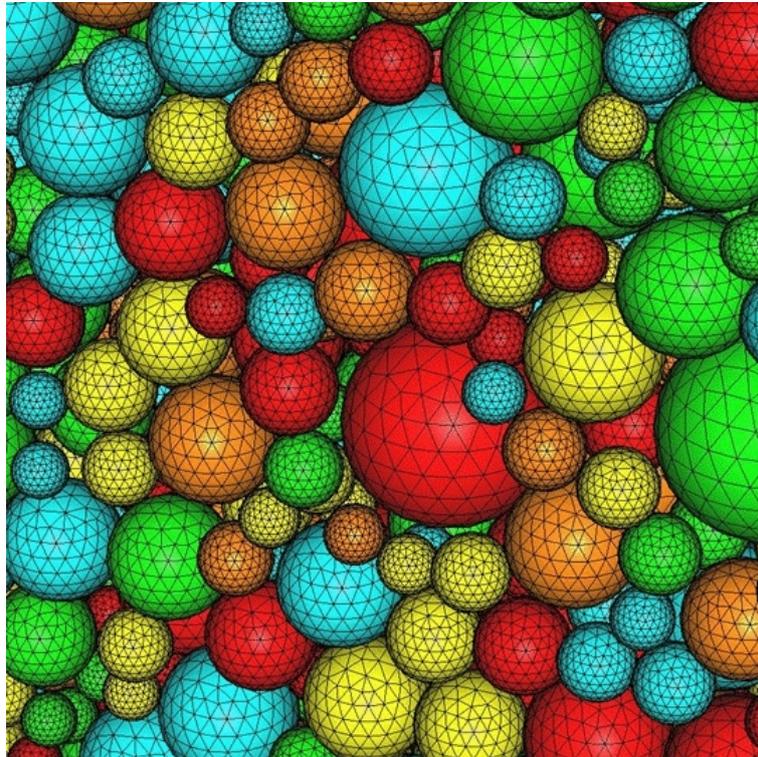


Figure 7. Maillage surfacique non adapté des sphères.

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

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

Ces recherches, qui constituent la première phase d'une thèse, concernent la génération de maillages de surfaces conçues via un système CAO (conception assistée par ordinateur). Celle-ci 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.

Cette année 2007 a débuté par une prise en main de l'environnement de travail. Celui-ci comprend le logiciel Open CASCADE, permettant de récupérer les entités géométriques CAO, et le module de maillage BLSURF greffé sur celui-ci.

Ensuite, nous avons abordé l'étude de la reconstruction topologique en deux étapes, concernant respectivement les sommets et les courbes. Afin de valider la première étape, nous avons proposé un algorithme général qui permet de rétablir, sur l'ensemble de la surface, la conformité topologique des sommets entre deux carreaux adjacents. En s'inspirant du même principe de conformité, nous poursuivons actuellement la réflexion sur la deuxième étape et la mise en place d'un algorithme de reconstruction de la topologie des courbes.

6.12. Maillages surfaciques quadrilatéraux

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Nous proposons un schéma indirect de construction de maillages quadrilatéraux à partir de maillages triangulaires. La méthode consiste à regrouper deux à deux les triangles pour former les quadrilatères. L'appariement des triangles est dirigé par une mesure de qualité de quadrilatère généralisée au cas des domaines munis d'une structure riemannienne. Cette approche peut être appliquée aux surfaces paramétrées dans le cadre de construction de leur maillage via une approche indirecte. Cette stratégie conduit généralement à un maillage mixte (triangles et quadrilatères). La mesure de qualité introduite nous a permis de diminuer considérablement le pourcentage de triangles résultants. Pour l'obtention de maillages constitués seulement d'éléments quadrilatéraux, il suffit de subdiviser les triangles et les quadrilatères obtenus après couplage respectivement en trois et quatre quadrilatères. Une procédure d'optimisation du maillage résultant basée sur des repositionnements de sommets est aussi appliquée pour améliorer la qualité globale du maillage.

Par ailleurs, la construction du maillage triangulaire initial est guidée par une métrique particulière afin de générer des triangles adéquats pour la construction des quadrilatères. En d'autres mots, dans le cas d'une spécification isotrope uniforme de taille, les triangles générés sont pour la plupart des triangles rectangles isocèles et leur appariement produit des carrés de même taille (voir Figure 8).

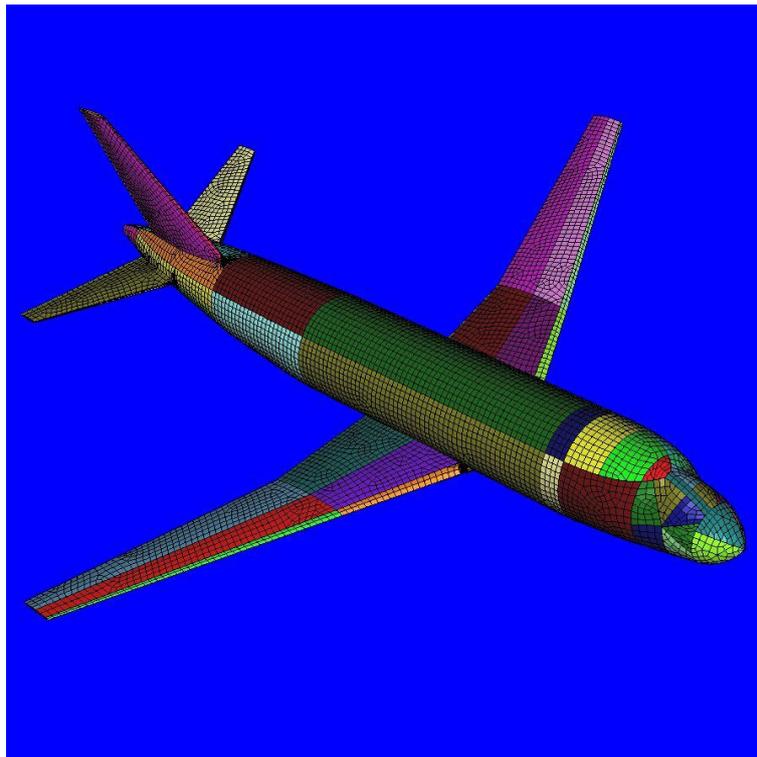


Figure 8. Maillage quadrilatéral d'un Airbus.

6.13. Intégration de discrétisations de courbes gauches dans un maillage surfacique

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

On se propose de développer une stratégie pour combiner des maillages générés par différents mailleurs surfaciques. Par exemple, on peut mailler séparément le fuselage et la voilure d'un avion, le premier maillage étant réalisé par un mailleur libre et le second par un mailleur spécialisé respectant des contraintes métier. Dans le cadre de génération de maillage d'une surface composée de carreaux paramétrés par plusieurs types de mailleurs, le problème consiste à imposer une discrétisation unique sur les segments courbes frontaliers. Généralement, la discrétisation de certaines courbes frontalières est construite par le mailleur spécialisé et cette discrétisation doit être respectée par les autres mailleurs. Dans le cas où une carte de taille est spécifiée séparément pour chaque carreau, les discrétisations imposées pourront être en conflit avec ces spécifications.

Nous avons élaboré une méthodologie basée sur des techniques de contrôle de gradation de maillages, qui permet de générer un maillage de qualité d'un domaine pour lequel des spécifications de taille sont données et des discrétisations de courbes sont imposées. Notre approche généralise un algorithme classique de réduction de gradation pour améliorer la qualité en forme des éléments du maillage en symétrisant l'équilibrage des tailles par diminution et aussi par augmentation.

6.14. Modélisation géométrique de surfaces additionnelles pour le procédé d'emboutissage

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

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. 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.

Les surfaces additionnelles sont définies par interpolation de courbes de profil construites dans des plans perpendiculaires au contour inférieur de la pièce utile. En prenant en compte les contraintes métier, chaque courbe est composée de segments droits et d'arcs circulaires. Plusieurs paramètres sont introduits pour définir ces courbes de profil. Ces paramètres sont ceux qui sont utilisés pour optimiser le processus de conception par une approche inverse. Le nombre de courbes de profil dépend de la discrétisation du contour inférieur de la pièce utile. En effet, à partir de chaque sommet de cette discrétisation, une courbe de profil plane est déterminée dans un plan orthogonal à la tangente au contour au sommet correspondant. Les surfaces additionnelles sont définies en interpolant ces courbes de profil par des techniques d'interpolation de Coons. Ces surfaces sont globalement de continuité d'ordre 1 ainsi qu'au niveau de leurs raccords à la pièce utile. La figure 9 montre la pièce utile d'origine puis enrichie par ces surfaces additionnelles (pour un jeu de paramètres donné).

7. Contracts and Grants with Industry

7.1. ARC LNM

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

En 2007, c'est poursuivit 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

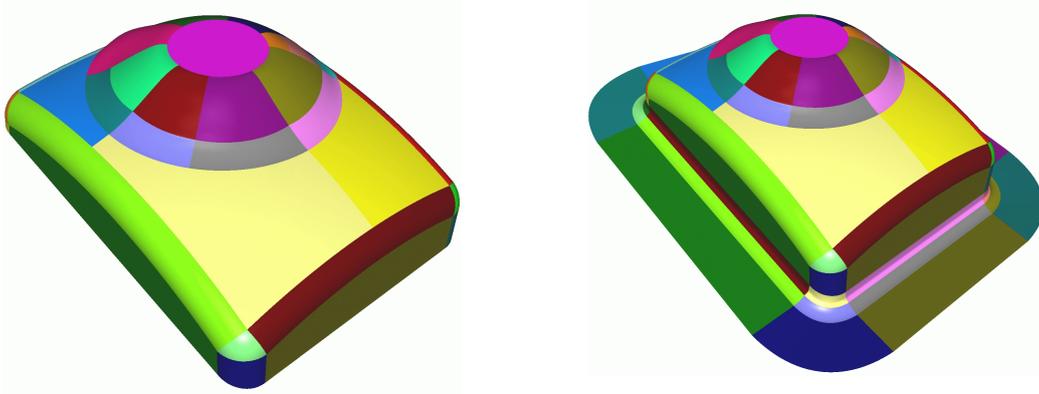


Figure 9. Pièce utile d'origine (à gauche) et enrichie par des surfaces additionnelles (à droite).

On s'est intéressé 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 le cadre de cet ARC, nous nous sommes intéressés à la simulation numérique de deux fluides incompressibles en contact.

Dans cette proposition, on a couplé 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.

Les résultats obtenus ont été présentés lors de la journée nationale des ARC à Rennes. Les travaux réalisés avec succès lors de cette action furent :

- l'adaptation de maillage multi-échelles et l'adaptation à la ligne de niveau 0 représentant l'interface,
- le couplage méthode des lignes de niveaux et adaptation de maillage,
- l'impact sur des solveurs représentant ou ne représentant pas l'interface dans le maillage,
- méthode d'advection et de régularisation de l'interface.

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 Metrix*, issue des propriétés locales de la surface et de senseurs CFD.

Les résultats attendus ont été obtenus avec l'approche adaptative multi-échelles sur la géométrie fournie par Dassault Aviation. Le champ proche de l'avion a été calculé précisément sur plusieurs kilomètres et a permis de valider des modèles simplifiés de propagation du bang sonique.

Une nouvelle géométrie plus réaliste, représentant une forme "low boom", nous a récemment été fournie sur laquelle une étude complète doit encore être réalisée.

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 ont été fournies par Dassault Aviation: une aile ONERA M6 et un avion d'affaire Falcon.

Pour cela on comparera, sur des configurations de vol définies 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 autre 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 remaillleur 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 EHPOC : 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 non-structurés. Il a démarré dans le cadre du projet IOLS et se poursuit dans le projet EHPOC, le tout au sein du pôle de compétitivité System@tic.

Développements apportés à la méthode en 2007 :

- Nouvel algorithme de maillage des arêtes vives uniquement en hexaèdres à l'aide d'une couche tampon spécifique. Celui-ci est parfaitement robuste contrairement à ses prédécesseurs. De fait le maillage hex-dominant a été abandonné et l'objectif est à nouveau le maillage 100% hexaédrique.
- Parallélisation de l'optimisation du maillage (80% du temps de génération) à l'aide de posix threads permettant de tirer parti des nouveaux processeurs multi-cores.
- Premiers essais d'adaptation de maillages d'après les résultats du solveur Wolf développé par la projet Gamma et adapté aux éléments hexaédriques pour l'occasion.
- Intégration du logiciel au sein des applications des divers participants du projet IOLS (Notamment la plate-forme Salomé).
- Démarrage d'un algorithme de maillage des angles aigus et surfaces minces.

Projets pour l'année 2008 :

- Poursuite de la méthode de gestion des angles aigus et géométries minces, vitale pour le succès du projet.
- Travail sur la génération de cartes de tailles anisotropes issues du solveur Wolf. Extraction d'iso-surfaces et maillage de celles-ci comme structures minces.

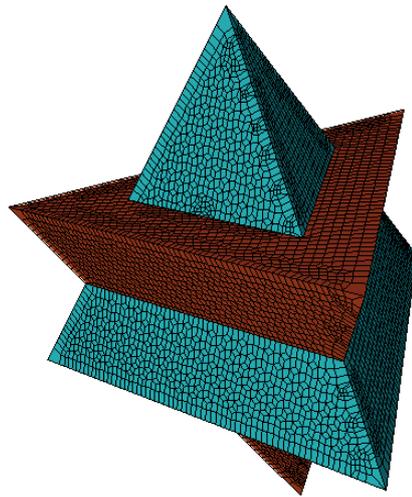


Figure 10. Maillage de deux tétraèdres imbriqués : exercice de style afin de montrer l'efficacité du maillage des angles vifs uniquement à l'aide d'hexaèdres.

7.5. Pôle de compétitivité EHPOC : maillage surfacique

Participant: Patrick Laug [correspondant].

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. 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, il est possible de générer automatiquement des maillages triangulaires carreaux-dépendants ou transcarreaux à partir d'une surface définie sous OPEN CASCADE. Dans la version livrée en 2007, cet outil permet également de générer des maillages de quadrilatères obtenus par appariement de triangles.

7.6. Contrat de partenariat Dassault Aviation

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

A la suite d'un précédent contrat entre l'INRIA, l'UTT et Dassault Aviation, ce nouveau contrat porte sur une durée de trois ans (2007-2009). Des sujets de recherche ont été identifiés et classés en plusieurs thèmes :

- Intégration de BLSURF dans l'évaluateur de Dassault Aviation : interface avec des mailleurs indépendants (un logiciel a été développé et fourni en 2007), reconstruction du squelette topologique à partir de considérations géométriques, traitement des paramétrisations instables.
- Adaptation de maillages : estimation d'erreur et génération de maillages isotropes ou anisotropes.
- Maillages quadrilatéraux : pour générer un maillage quadrilatéral, la méthode d'appariement consiste à assembler des triangles deux à deux ; cependant, pour obtenir des quadrilatères de bonne qualité, la forme de ces triangles doit respecter des critères particuliers qui doivent être pris en compte lors du placement des points dans la méthode actuelle.
- Maillages transcarreaux : le maillage simplifié doit être optimisé en se basant sur la surface exacte (définie par la CAO).
- Identification des courbes critiques : dans de nombreux cas, le maillage généré doit s'appuyer sur certaines courbes critiques, en particulier des lignes de courbure surfacique maximale (notamment le long des bords d'attaque) et des lignes physiques particulières pour le suivi de phénomènes directionnels.

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.

7.8. Nippon Steel (Japon)

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Le groupe sidérurgiste Nippon Steel a 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*.

En 2007, nous avons enrichi l'environnement de calcul par ajout de procédures permettant de simuler le comportement de la pièce après le retrait des outils intervenant dans la mise en forme. En particulier, dans le cas du sidérurgiste, il est nécessaire de déterminer la répartition de contraintes résultant de la relaxation par enlèvement de l'outil.

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 de Mathématiques Appliquées à l'IRMA - Université de Strasbourg, février 2007.
- H. BOROUSHAKI, A. CHEROUAT, P. LAUG, L. MOREAU, *Maillage et remaillage adaptatif (procédés de mise en forme)*, ARCELOR, Maizières les Metz, 21 février 2007.
- D. GUEGAN, O. ALLAIN, F. ALAUZET AND A. DERVIEUX, *Mesh adaptation applied to simulation of bi-fluid flow with level set*, FEF'07, Santa Fe, NM, USA, March 2007.
- A. LOSEILLE, A. DERVIEUX, P. FREY AND F. ALAUZET, *Achievement of second order mesh convergence for unstructured adaptive steady flow simulations*, FEF'07, Santa Fe, NM, USA, March 2007.
- P. LAUG, H. BOROUSHAKI, A. CHEROUAT, L. MOREAU, *Adaptive Meshing and Remeshing in Metal Forming Processes*, Nippon Steel Corporation, Tokyo, 29 March 2007.
- P. LAUG, *Maillages déformables et maillages de surfaces paramétrées*, INRIA, Sophia Antipolis, 3 mai 2007.
- P. LAUG, H. BOROUSHAKI, *Surfaces CAO – Domaines déformables – Nanostructures*, Polytechnique Montréal, 23 mai 2007.
- P. LAUG, *Maillages et nanotechnologies*, visite du Conseil Économique et Social, INRIA Rocquencourt, 28 juin 2007.

- P. LAUG, H. BOROUCHEKI, *Design Opti : Design automatique et Optimisation des surfaces additionnelles*, Université de Technologie de Troyes, 4 juillet 2007.
- A. BENABBOU, H. BOROUCHEKI, P. LAUG AND J. LU, *Geometrical modeling and meshing of granular domains*, 6th Symposium on Trends in Unstructured Mesh Generation, 9th US National Congress on Computational Mechanics, San Francisco, California, July 22-27, 2007.
- A. LOSEILLE AND F. ALAUZET, *A continuous sight of interpolation error for 3D anisotropic unstructured mesh adaptation*, USNCCM'07, San Francisco, CA, USA, July 2007.
- B. CLÉMENÇON, H. BOROUCHEKI AND P. LAUG, *Improving the accuracy of geometric surface meshes by extracting and integrating ridges*, 10th International Society on Computing Grid Generation (ISGG) conference, Heraklion, Greece, September 2007.
- P. LAUG, *Modélisation géométrique et maillage des matériaux nanostructurés*, CEA Grenoble, 12 septembre 2007.
- F. ALAUZET, *Metric-based anisotropic mesh adaptation*, Workshop Tetrahedron II, Rocquencourt, France, October 2007.
- H. BOROUCHEKI, *Adaptive remeshing in large plastic strain with damage*, Workshop Tetrahedron II, Rocquencourt, France, October 2007.
- P. LAUG, *From CAD surface models to quality meshes*, Workshop Tetrahedron II, Rocquencourt, France, October 2007.
- A. BENABBOU, H. BOROUCHEKI AND P. LAUG, *Packing algorithm and mesh generation of nanostructures*, Hong Kong Polytechnic University, November 5-9, 2007.
- F. ALAUZET, *Recent progress in 3D anisotropic mesh adaptation and its impact on numerical scheme for aeronautic*, Séminaire de l'ONERA, novembre 2007.
- L. MARECHAL, *Génération automatique de maillages hexaédriques*, Séminaire de l'ONERA, novembre 2007.
- P. LAUG, A. BENABBOU, H. BOROUCHEKI ET J. LU, *Modélisation, maillage et simulation des nanostructures*, démonstrations au Forum 40 ans de INRIA, Lille, décembre 2007.

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".
- F. Alauzet a donné un cours lors de la 5^e foire aux Eléments Finis Européenne: Plus d'efficacité dans la méthodes des Eléments Finis, CIRM, Luminy, France ; sur "Metrics and anisotropic mesh adaptation based on an interpolation error bound".
- F. Alauzet a donné un cours à l'École d'été: Cemracs'07 Pre and post processing in scientific computing, CIRM, Luminy, France ; sur "Metric-based mesh adaptation".
- P.L. George a donné un cours à l'École d'été: Cemracs'07 Pre and post processing in scientific computing, CIRM, Luminy, France ; sur "Mesh generation and mesh adaptation, methods and techniques".
- P. Laug a donné des cours, TD et TP intitulés « CAO - Maillage » à l'Université Paris XII Val de Marne, 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

Articles in refereed journals and book chapters

- [1] F. ALAUZET. *High-Order method and mesh adaptation for Euler equations*, in "Int. J. Numer. Meth. Fluids", accepted for ICFD2007 Special Issue, 2007.

- [2] F. ALAUZET, S. BOREL-SANDOU, L. DAUMAS, A. DERVIEUX, Q. DINH, S. KLEINVELD, A. LOSEILLE, Y. MESRI, G. ROGÉ. *Multi-model and multi-scale optimization strategies. Application to sonic boom reduction*, in "European Journal of Computational Mechanics", to appear, vol. 17, n^o 1-2, 2008, p. 191-214.
- [3] F. ALAUZET, P. FREY, P.-L. GEORGE, B. MOHAMMADI. *3D transient fixed point mesh adaptation for time-dependent problems: Application to CFD simulations*, in "J. Comp. Phys.", vol. 222, 2007, p. 592-623.
- [4] Y. BOURGAULT, M. PICASSO, F. ALAUZET, A. LOSEILLE. *On the use of anisotropic error estimators for the adaptive solution of 3-D inviscid compressible flows*, in "Int. J. Numer. Meth. Fluids", submitted, 2007.
- [5] A. DERVIEUX, Y. MESRI, F. ALAUZET, A. LOSEILLE, L. HASCOET, B. KOOBUS. *Continuous mesh adaptation models for CFD*, in "CFD Journal", vol. 12, n^o 2, 2007.
- [6] P. GEORGE, H. BOROUCI, P. FREY, P. LAUG, E. SALTEL. *Mesh generation and mesh adaptivity*, in "Encyclopedia of computational Mechanics", E. STEIN, R. BORST, T. HUGHES (editors), 2nd edition, Chapter 17, vol. 1, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2008, p. 497-523.
- [7] P. LAUG, A. BENABBOU, H. BOROUCI, J. LU. *Modélisation géométrique des matériaux nanostructurés*, in "Interstices", novembre 2007, <http://interstices.info/nanostructure>.

Publications in Conferences and Workshops

- [8] F. ALAUZET. *High-order methods and mesh adaptation for conservation laws*, in "Proc. of ICFD2007", 2007.
- [9] F. ALAUZET, A. LOSEILLE. *High-order sonic boom modeling by adaptive methods*, in "Proc. in AAAF 2007", 2007.
- [10] A. BENABBOU, H. BOROUCI, P. LAUG, J. LU. *Geometrical modeling and meshing of granular domains*, in "6th Symposium on Trends in Unstructured Mesh Generation, 9th US National Congress on Computational Mechanics", July 2007.
- [11] B. CLÉMENÇON, H. BOROUCI, P. LAUG. *Improving the accuracy of geometric surface meshes by extracting and integrating ridges*, in "10th International Society on Computing Grid Generation (ISGG) conference", September 2007.
- [12] A. DERVIEUX, A. LOSEILLE, F. ALAUZET. *High-order adaptive method applied to high speed flows*, in "Proc. of WEHSFF2007", 2007.
- [13] A. LOSEILLE, A. DERVIEUX, P. FREY, F. ALAUZET. *Achievement of global second-order mesh convergence for discontinuous flows with adapted unstructured meshes*, in "AIAA paper", vol. 2007-4186, 2007.
- [14] Y. MESRI, F. ALAUZET, A. DERVIEUX. *Optimum shape design and mesh adaptation for sonic boom reduction*, in "Proc. in AAAF 2007", 2007.

References in notes

- [15] J. BOISSONNAT, M. YVINEC. *Géométrie algorithmique*, Ediscience, 1995.

- [16] P. CIARLET. *Basic Error Estimates for Elliptic Problems*, vol. II, Ciarlet, P. G. and Lions, J. L., North Holland, 1991.
- [17] P. FREY, P. GEORGE. *Maillages. Applications aux éléments finis*, Hermès Science Publications, Paris, 1999.
- [18] P. GEORGE, H. BOROUCAKI. *Triangulation de Delaunay et maillage. Applications aux éléments finis*, Hermès, 1997.
- [19] A. GEORGE. *Computer implementation of the finite element method*, Ph. D. Thesis, Dep. of Computer Science, Stanford, 1971.
- [20] R. LOHNER. *Progress in grid generation via the advancing front technique*, in "Engineering with computers.", vol. 12, 1996, p. 186-210.
- [21] F. PREPARATA, M. SHAMOS. *Computational geometry, an introduction*, Springer-Verlag, 1985.
- [22] M. SHEPHARD, M. GEORGES. *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.
- [23] R. VERFURTH. *A review of a posteriori error estimation and adaptive refinement techniques*, Wiley-Teubner, 1996.