



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*

2005

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	4
4.3. E.D.P. et adaptation	4
4.4. Maillage des surfaces	5
5. Software	5
5.1. Introduction	5
5.2. Logiciel BL2D-V2	6
5.3. Logiciel BLSURF-V2	6
5.4. Logiciel BLMOL	6
5.5. Logiciel Medit	6
5.6. Logiciel GAMHIC3D	7
5.7. Logiciel GHS3D-V3	7
5.8. Logiciel YAMS	7
6. New Results	7
6.1. Adaptation de maillage par minimisation de fonctionnelles. Application à la prédiction du bang sonique	7
6.2. Interpolation conservative pour l'adaptation de maillages non structurés	8
6.3. Adaptation de maillages anisotropes pour les simulations numériques en dimensions trois	8
6.4. Adaptation de maillages pour les simulations instationnaires en mécanique des fluides	9
6.5. Simulation du comportement des nanomatériaux	9
6.6. Prise en compte des lignes caractéristiques géométriques et physiques	10
6.7. Shape from shading	10
6.8. Mise à plat	12
6.9. Visualisation de maillage	12
6.10. Écoulements dans un bâtiment	12
6.11. Reconstruction de surface à partir d'un nuage de points	14
6.12. Construction de maillage anisotrope en trois dimensions	15
6.13. Site de données	15
6.14. Génération automatique de maillages hexaédriques, Hexotic	16
7. Contracts and Grants with Industry	16
7.1. Distene	16

7.2.	DASSAULT AVIATION	16
7.3.	HISAC	17
7.4.	LECTRA	18
8.	Dissemination	18
8.1.	Participation à des colloques, séminaires, invitations	18
8.2.	Enseignement	19
9.	Bibliography	19

1. Team

Responsable scientifique

Paul Louis George [DR]

Responsable permanent

Patrick Laug [CR]

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]

Collaborateurs extérieurs

Houman Borouchaki [Professeur, Université de Technologie de Troyes]

Pascal Frey [Professeur, Université Paris 6]

Frédéric Hecht [Professeur, Université Paris 6]

Loïc Maréchal [Distene (anciennement Simulog Technologies) puis Ingénieur Expert]

Bijan Mohammadi [Professeur, Université Montpellier]

Chercheur post-doctorant

Michel Mehrenberger

Chercheurs doctorants

Azeddine Benabbou [UTT, doctorant depuis juillet 2005]

Boris Cléménçon [UTT]

Cécile Dobrzynski [Université Paris 6]

Adrien Loseille [Université Paris 6, doctorant depuis septembre 2005]

Stagiaires

Mehdi Nasslahsen [UTT]

Miao Yu [UTT]

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 [12].

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 [13].

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 [14].

Par ailleurs, l'approche développée en deux dimensions et en trois dimensions se prête à une extension *anisotrope*. Un mailleur 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 [15]. 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 [16], 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 [18].

3.2.4. Géométrie algorithmique

La géométrie algorithmique est apparue, en tant que discipline, vers le milieu des années 80, [17], puis s'est développée au fil des ans, voir par exemple [11]. 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 [12], [19]. 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.

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).

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.

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 mailleur 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. Par ailleurs, les maillages de surfaces permettent le rendu réaliste des géométries de celles-ci en minimisant, selon certains critères, le nombre d'éléments assurant ce rendu. Les techniques de décimation, par exemple, rendent possible la construction de maillages de tailles différentes (en nombre d'éléments) mais d'aspect visuel identique selon le point d'observation (plus on s'éloigne, moins le maillage est riche en éléments). L'effet immédiat est la rapidité de l'affichage.

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 (anciennement Simulog Technologies), 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 (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 maillage par minimisation de fonctionnelles. Application à la prédiction du bang sonique

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Alain Dervieux, 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.

Une théorie est quasiment au point pour le cas des métriques isotropes en deux dimensions mais le cas anisotrope n'a pas encore été traité. L'approche anisotrope utilisera les métriques introduites et popularisées par les chercheurs de Gamma depuis quelques années. On utilisera les états adjoints calculés par les méthodes de Différentiation Automatique du projet Tropics.

Dans un premier temps, l'objectif est de développer la théorie des métriques continues anisotropes en dimension deux et trois, dont les modèles d'erreur proviennent soit de la théorie sur l'erreur d'interpolation, soit de modèles d'erreur plus sophistiqués. Cette approche permettra d'obtenir des métriques pour des solutions d'ordre P^k avec $k \geq 1$ basée sur des erreurs en norme L^p pour $p \geq 1$ ou $p = \infty$.

Puis, on implémentera et analysera cette approche 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. Plusieurs modèles de sophistications diverses seront successivement appliqués.

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

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Michel Mehrenberger.

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 un décalage en temps de la solution. Le but de cette étude (dans le cadre du post-doctorat de Michel Mehrenberger) est d'étudier un schéma d'interpolation conservatif et d'analyser son impact sur la solution adaptée dans le cas des problèmes instationnaires. L'approche proposée sera basée sur des techniques d'intersections et de modifications locales de maillage, voisines de celles utilisées dans l'adaptation. Un algorithme de projection en norme L^2 sera utilisé pour le transfert de solutions.

L'objectif de ce travail est d'étudier et d'implémenter dans un premier temps un algorithme d'intersection de maillages en dimension deux. La difficulté principale de cette étape réside dans le traitement des erreurs numériques ainsi que dans l'identification et le traitement des dégénérescences géométriques éventuelles. Dans une seconde étape, il s'agira de développer l'algorithme de projection L^2 permettant de réaliser l'interpolation conservative sur le maillage intersecté. Cette approche sera ensuite analysée numériquement sur un calcul instationnaire représentatif simulant la propagation d'une onde de choc en géométrie complexe. Les conclusions de cette étude préliminaire permettront ensuite d'aborder le problème en dimension trois. Une attention particulière devra être apportée à la gestion des erreurs numériques.

6.3. Adaptation de maillages anisotropes pour les simulations numériques en dimensions trois

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Pascal Frey, Paul Louis George.

Nos premières expériences sur l'adaptation de maillage anisotropes en trois dimensions ont mis en évidence l'importance de chaque étape de le processus d'adaptation afin d'obtenir des maillages "réellement" anisotropes et permettant aux maillages 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 maillage 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.

Dans le cadre des applications à la mécanique des fluides, les analyses ont conduit à l'implémentation de Wolf un nouveau solveur éléments-volumes finis pour les équations d'Euler et Navier Stokes utilisant les dernières méthodes développées dans la bibliographie. On a pris soin d'utiliser des méthodes de résolution en espace et en temps qui sont monotone et d'ordre élevé. De plus, les schémas de résolution (calcul des flux) utilisés sont positivement conservatifs, c'est-à-dire, si l'état initial est une solution physiquement admissible (*i.e.*, la densité et la pression sont positives) alors tout nouvel état généré par le solveur est une solution physiquement admissible.

6.4. Adaptation de maillages pour les simulations instationnaires en mécanique des fluides

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Pascal Frey, Paul Louis George, Bijan Mohammadi.

Ce travail aborde le thème de l'adaptation de maillage non structuré en trois dimensions pour les problèmes instationnaires et son application à la mécanique des fluides. On y montre en particulier que l'algorithme classique d'adaptation est inapproprié pour traiter ce type de problèmes, il introduit soit des phénomènes de diffusion qui réduisent la précision des simulations numériques, soit des phénomènes de dispersion qui introduisent un décalage de la solution en temps. Par conséquent, on a proposé une nouvelle approche basée sur un nouvel algorithme d'adaptation et sur une procédure d'intersection de métriques en temps, permettant de capturer de tels phénomènes. Cette nouvelle approche est une généralisation de l'algorithme classique d'adaptation de maillage.

Plus précisément, une boucle spécifique est intégrée dans le schéma d'adaptation classique afin de résoudre un problème de point fixe transitoire pour le couple maillage-solution. L'estimateur d'erreur (géométrique) *a posteriori* anisotrope utilisé dans le schéma d'adaptation est basé sur une majoration de l'erreur d'interpolation. La métrique de calcul résultante est alors définie à l'aide du hessien de la solution. L'adaptation de maillage (surfactive et volumique) est basée sur une procédure visant à créer un maillage unité par rapport à la métrique spécifiée.

Ce nouveau schéma permet, par le biais du nouveau schéma d'adaptation, de prédire l'évolution de la solution, non connue *a priori*, dans le domaine de calcul. Ensuite, la procédure d'intersection de métriques en temps est employée afin d'adapter le maillage dans les régions où la solution évolue. Avec l'intersection de métriques en temps, on introduit de manière implicite le temps dans l'estimateur d'erreur, ce qui implique que l'erreur est contrôlée tout au long de la simulation.

Les résultats obtenus en dimension deux sur un problème modèle ont confirmé la validité et l'efficacité de cette approche, en termes de précision de la solution et de réduction de la complexité (gain de temps de calcul). En effet, cette méthode d'adaptation basé sur un point fixe transitoire a permis de préserver l'intensité des phénomènes physiques et de contrôler l'erreur de phase (le décalage en temps de la solution). Un exemple 3D est proposé pour illustrer l'efficacité de cette méthode, Figure 1.

Elle a été appliquée avec succès en dimension trois, pour une simulation modélisant une explosion dans une ville, Figure 1, où la solution est non prédictible *a priori*.

6.5. Simulation du comportement des nanomatériaux

Participants: Patrick Laug [correspondant], Homan Borouchaki, Azeddine Benabbou.

Cette nouvelle étude (thèse de A. Benabbou depuis juillet 2005) concerne le maillage et la simulation du comportement des nanomatériaux par la méthode des éléments finis. Ces matériaux sont issus d'une gamme de procédés SMAT (*Surface Mechanical Attrition Treatment*) permettant de générer des nanostructures en surface, par des déformations plastiques aléatoires et cycliques. Cette technologie permet d'obtenir une nouvelle classe de matériaux ayant une structure composée de grains de 5 à 15 nanomètres environ ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) sur une épaisseur d'une dizaine à une centaine de microns ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$).

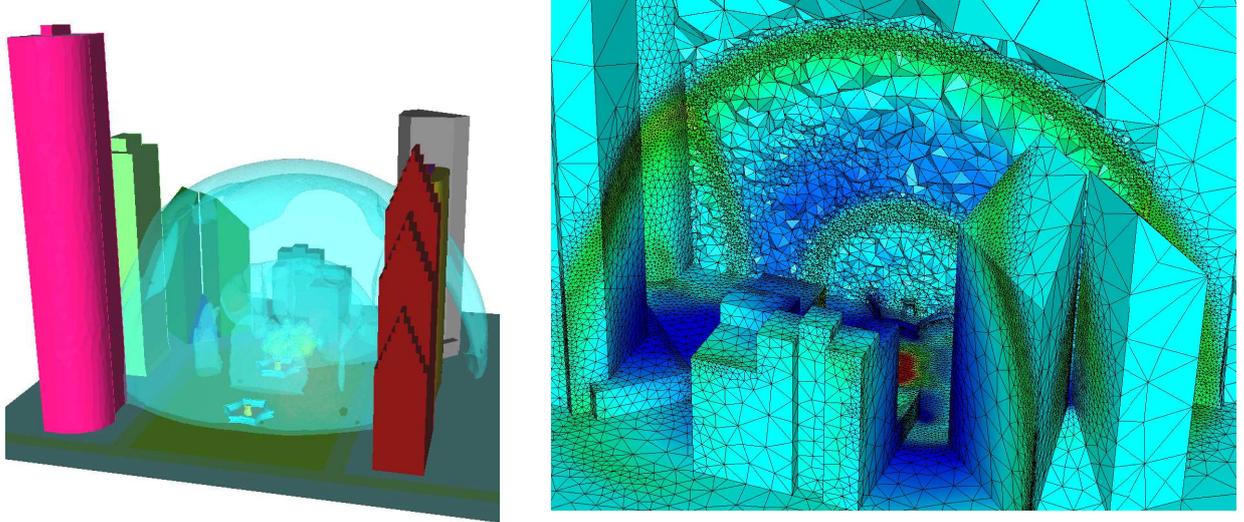


Figure 1. Iso-surfaces de densité dans le domaine de calcul (à gauche) et maillage (surfaccique et volumique dans un plan de coupe) muni de la distribution d'iso-densités correspondantes (à droite) aux temps 0.1 secondes.

La distribution en taille de ces grains peut être déterminée expérimentalement (voir figure 2). Le défi actuel est de modéliser un tel agrégat par un parallélépipède contenant une distribution donnée de grains, chaque grain étant approché par une sphère de rayon variable, puis de mailler l'espace situé entre les sphères. Le nombre total de sphères est de l'ordre de plusieurs milliards $((10^{-6}/10^{-9})^3)$. L'objectif suivant sera de simuler les propriétés mécaniques de ces nouveaux matériaux.

6.6. Prise en compte des lignes caractéristiques géométriques et physiques

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

Cette autre étude (thèse de B. Cléménçon faisant suite à un master soutenu en 2005) a pour objectif la prise en compte de caractéristiques géométriques et physiques dans la génération de maillages surfacciques. Les *lignes caractéristiques géométriques* (arêtes vives, lignes de crête, ou lignes asymptotiques) permettent de bien représenter la « forme » de la surface. Leur présence dans un maillage garantit en partie la qualité géométrique de l'approximation quelle que soit la taille des éléments (voir figure 3). Les *lignes caractéristiques physiques* permettent de représenter soit un phénomène directionnel, soit une variation très importante du champ physique, voire une « cassure physique » (discontinuité du champ physique associé aux points de la surface). Elles peuvent être calculées *a priori* (si le phénomène physique peut être prévu) ou *a posteriori* (sinon). La présence de ces lignes dans le maillage permet de bien suivre l'évolution du champ physique associé. L'objectif est donc d'identifier ces lignes caractéristiques géométriques et physiques afin de les insérer dans une procédure de maillage surfaccique.

6.7. Shape from shading

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki, Adrien Loseille.

On s'intéresse ici au problème de *shape from shading*, ou reconstruction d'une surface à partir d'une seule image ombrée de celle-ci. Ce problème est aujourd'hui considéré comme étant mal posé et aucune

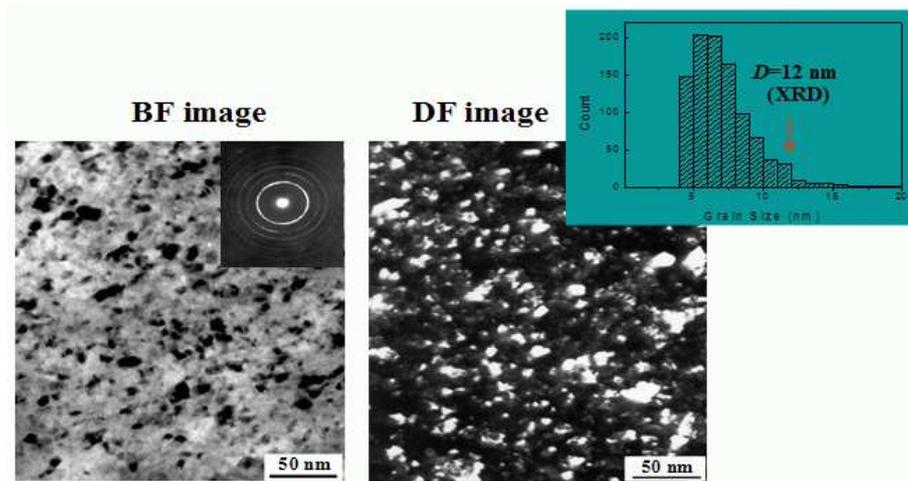


Figure 2. Photo de nanostructure de fer pur obtenue par un microscope électronique de transmission, et répartition de la taille des grains.

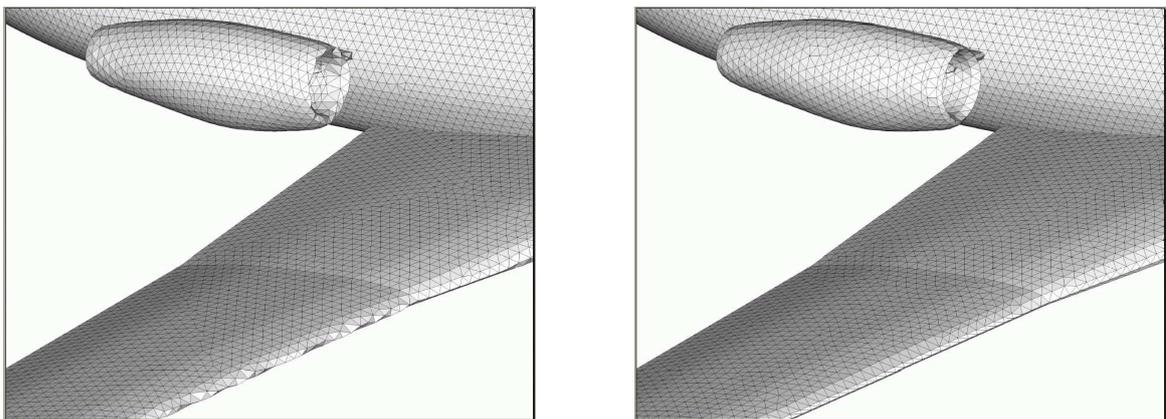


Figure 3. Maillage sans (à gauche) et avec (à droite) prise en compte des lignes caractéristiques géométriques d'une surface.

solution satisfaisante n'est encore connue. Il peut être formalisé comme un problème d'optimisation ou plus précisément de minimisation d'énergie associée à la fonction d'ombrage, en supposant que cette dernière soit continue. Dans le cadre du stage de 3^e année ENSEEIHT de A. Loseille, des premiers résultats ont été obtenus par des méthodes déterministes ou stochastiques, dans le cas particulier d'une image représentant un objet simple ou un visage éclairé orthogonalement. Des extensions par des méthodes hybrides sur des images plus complexes sont envisagées.

6.8. Mise à plat

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki, Mehdi Nasslahsen.

L'objectif est de développer une méthode de génération de *patrons à plat* de carreaux surfaciques maillés, permettant ainsi de définir une paramétrisation adéquate de ces surfaces. Des carreaux maillés de ce type sont généralement fournis par des bases de données d'objets tridimensionnels, ou sont obtenus par des méthodes de reconstruction surfacique à partir de mesures relevées sur un objet. Pour que la paramétrisation convienne au remaillage de la surface, la mise à plat des carreaux doit s'effectuer avec des déformations minimales. Au cours du stage de master de M. Nasslahsen, plusieurs méthodes de minimisation (de nature locale et globale) ont été expérimentées sur des exemples simples et devront être étendues à des objets quelconques. À plus long terme, une décomposition automatique de la surface en carreaux sera également nécessaire.

6.9. Visualisation de maillage

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki, Miao Yu.

Le logiciel BL2D-V2, issu du projet Gamma, comprend notamment un mailleur adaptatif bidimensionnel et un programme de visualisation associé. Notre objectif est de remplacer ce dernier par un environnement graphique plus convivial, plus rapide et plus complet. Cet environnement fera appel à l'interface OpenGL, qui permet de développer des applications graphiques 2D et 3D portables et interactives. Au cours de cette étude (stage de Miao Yu), nous avons conçu et réalisé une maquette permettant de visualiser différentes entités liées à un maillage : sommets, arêtes, éléments, métriques, solution calculée, etc.

Les principales différences de cet environnement graphique par rapport au logiciel Medit (cf. section « Logiciels ») sont les suivantes : visualisation de maillages plans uniquement, représentation d'éléments courbes quadratiques et lecture directe de tous les formats de fichiers de BL2D-V2 (.g, .smo, .mc, .ms, .h, etc.).

6.10. Écoulements dans un bâtiment

Keywords: *advection-diffusion, fluide incompressible, maillage adaptatif, métrique.*

Participants: Cécile Dobrzynski, Pascal Frey [correspondant], Olivier Pironneau.

Abstract. Le but de cette étude est d'analyser le comportement d'un courant d'air dans un bâtiment. Ce courant d'air résulte essentiellement de la différence de température due à l'orientation Nord-Sud du bâtiment.

On s'intéresse ici à la résolution des équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible (l'air ambiant dans notre cas), la densité étant une fonction de la température :

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = \nabla \cdot S - \rho g e_3 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} \nabla \cdot (\rho u) = 0 \end{cases}$$

où S est le tenseur de contrainte, u la vitesse, p la pression, ν la viscosité cinématique, g la gravité et $(\nabla u)_{ij} = u_{ij}$ le gradient de u . Ces équations sont résolues dans un domaine $\Omega \times (0, T_{NS})$, Ω est un ouvert de R^d de frontière $\partial\Omega$, avec les conditions aux limites de Dirichlet, $u = \omega$ sur Γ_1 et de Neumann, $-p + (S.n.n) = F_n$ et $(S.n.s) = F_s$ sur Γ_2 , où $\Gamma_1 \cup \Gamma_2 = \partial\Omega$, n et s représentant les normales sortantes et

les tangentes, F_n et F_s étant les composantes normales et tangentielles de la "traction". La condition initiale est du type $u(x, 0) = u_0(x)$ avec $\nabla \cdot u_0 = 0$ dans Ω . Le solveur utilisé est basé sur une méthode de projection, qui permet de découpler les solutions en u et en p du problème initial en une solution séquentielle de problèmes d'approximation sur v et $p(T)$, qui sont de bonnes approximations de la solution cherchée.

En outre, on cherche à prédire la distribution de température dans la pièce ou le bâtiment. Pour cela, il convient de résoudre l'équation d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = f,$$

où u représente la vélocité de l'air et ν la viscosité cinématique. On impose comme condition initiale $T = T_i$ à $t = 0$ et comme conditions aux limites $T = T_e$, avec des conditions de Neumann sur les bords.

Pour ce type d'application, la méthode des volumes finis n'est pas plus intéressante que celle des éléments finis. Le vrai problème est lié à la précision numérique et aux phénomènes multi-échelles. De ce fait, l'adaptation de maillage est un enjeu majeur de ces simulations numériques.

Une application spécifique concerne le système de refroidissement d'une cheminée de refroidissement de centrale nucléaire (donnée : CEA Cadarache). Le problème est lié ici au taux de refroidissement proprement dit et non à la radioactivité. De ce fait, la géométrie de la pièce correspond à une salle ouverte à son extrémité supérieure munie d'un ventilateur à sa base; l'air froid s'écoule autour du container de combustible radioactif et contribue à abaisser sa température. Bien que l'air froid ait tendance à s'échapper naturellement par la cheminée, un ventilateur est ici ajouté pour accélérer le flux. La Figure 4 montre le maillage initial (généralisé par YAMS) ainsi qu'une coupe du maillage volumique montrant le champ de vitesse dans la cheminée.

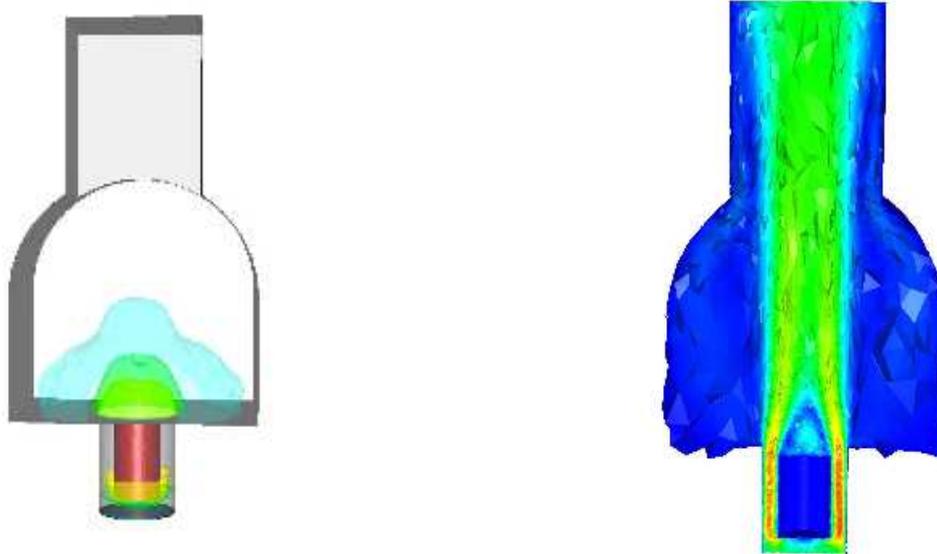


Figure 4. Exemple d'écoulement incompressible dans une cheminée de refroidissement (géométrie: CEA Cadarache).

6.11. 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.

Abstract. 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, 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, 36 millions sur un Mac G5),
- 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 n'est pas assurée). Une suite possible est, par suite, l'orientabilité étant assurée, 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.

6.12. Construction de maillage anisotrope en trois dimensions

Keywords: *adaptation de maillage, estimateur d'erreur, maillage anisotrope, métrique anisotrope.*

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

Abstract. La construction d'un maillage simplicial anisotrope d'un domaine arbitraire est un problème relativement nouveau (nous sommes en trois dimensions). Notre méthode de construction utilise un connecteur de type "Delaunay" réécrit dans un contexte anisotrope, définit des points internes selon une métrique discrète anisotrope et, pour finir, réalise une phase d'optimisation de la qualité des éléments en suivant ce champ de métriques. La validation se fait via quelques problèmes de mécanique des fluides de nature industrielle.

Ce mailleur, nommé GAMANIC3D, est le pendant anisotrope du mailleur GAMHIC3D développé auparavant (lui-même étant l'extension adaptée (isotrope) du mailleur classique GHS3D). Il faut noter qu'il n'existe (toujours et encore cette année) pas d'endroit où cette approche générique est considérée, faisant de GAMMA la seule équipe où ce type de mailleur est développé.

Un tel mailleur est basé sur trois types d'algorithmique. Un connecteur de points, une méthode de création des points internes et des méthodes d'optimisation. Chacun de ces points a été étudié et les algorithmes trouvés ont été, au moins dans des versions préliminaires, implémentés. Par ailleurs, après une série de tests de validation menée sur des cas académiques, nous poursuivons la validation sur des cas industriels concrets, en mécanique des fluides. Diverses thèses ont contribué à valider ce mailleur.

Le connecteur de points est du type "Delaunay". On a étendu au cas anisotrope la méthode incrémentale classique. Ceci, en bref, revient à évaluer les quantités intervenant dans la construction (des distances essentiellement) dans le champ de métriques anisotropes dont nous disposons.

La création des points internes est, à ce jour, simplifiée en utilisant une simple dichotomie portant sur les arêtes trop longues dans le champ. Ces arêtes sont coupées en deux, tant que. Cette méthode simple (simpliste) nous permet d'avoir un ensemble cohérent et, en particulier, de poursuivre la construction avec le développement des outils d'optimisation qui seront nécessaires.

L'optimisation reprend les techniques classiques par bougé de points et par bascule d'arêtes. L'ensemble de ces outils a été étendu au cas anisotrope et, ceci fait, des stratégies de pilotage des outils locaux ont été étudiées. Dans cet esprit, on a montré que les stratégies classiques n'étaient pas appropriées ce qui a conduit à en utiliser de plus fines.

6.13. Site de données

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

Participant: Eric Saltel [correspondant].

Abstract. 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/Eric.Saltel/download/download.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 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 30000 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 350000 downloads ce qui fait une moyenne de 700 downloads par jour.

6.14. Génération automatique de maillages hexaédriques, Hexotic

Keywords: *hexaèdres, maillage, octree.*

Participant: Loïc Maréchal.

Abstract. 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).

Une méthode mixte a été développée durant l'année 2005. Elle permet le maillage de pièces comportant des angles droits (ou avoisinant les 90 degrés) à l'aide de pyramides (environ 2% des éléments). Bien que ces pyramides apportent une plus grande souplesse dans le respect de géométries plus diverses, cela n'est pas encore suffisant pour mailler des pièces vraiment quelconques.

Enfin, l'utilisation du maillage dual a permis l'insertion d'un nouveau jeu d'éléments de transitions, biens moins nombreux et de meilleure qualité qu'auparavant.

Il a donc été décidé d'implémenter un nouveau modèle basé sur des prismes. Celui-ci devrait insérer trois fois plus d'éléments non-hexaédriques que la méthode actuelle, ce qui devrait rester raisonnable (6 à 7 %). L'insertion de prismes tout le long des angles vifs devrait permettre de mailler des angles vraiment quelconques autres que des angles droits.

Les nouveaux enjeux pour l'année à venir sont :

- une parfaite représentation des angles très aigus à l'aide de prismes,
- la génération de maillages pseudo-anisotropes dans le cas des géométries minces ou afin de représenter une métrique issue d'un calcul (la mécanique des fluides nécessite de forts facteurs d'étirement des éléments).
- la création automatique et le recollement de maillages générés par octree, extrusion ou révolution afin de s'adapter au mieux à la géométrie à mailler ("volume épais", "coque mince" ou "poutre").

7. Contracts and Grants with Industry

7.1. Distene

Abstract. Distene (anciennement Simulog Technologies) est chargée de la diffusion des codes développés initialement dans le projet GAMMA. À ce titre, Distene effectue des opérations de commercialisation et de transfert de technologie de maillages.

Distene s'occupe de la commercialisation des maillages surfaciques (YAMS, BLSURF) et volumiques (GHS3D et GAMHIC3D) et participe à la validation puis à l'industrialisation des codes correspondants. Distene intervient aussi dans la conception du maillage hexaédrique (Hexotic) via un contrat supportant Loïc Maréchal.

7.2. DASSAULT AVIATION

Participants: P. Laug, H. Borouchaki.

Les demandes croissantes du calcul numérique par éléments finis en aérodynamique imposent la génération de maillage surfaciques et volumiques de plus en plus rapide et automatique. Dans ce cadre, la mise en place chez DASSAULT AVIATION d'un ensemble de méthodologies de maillages constituant une "véritable boîte à outils logicielle" a été indispensable. La coopération avec l'INRIA s'inscrit dans cette logique. Elle se fait suivant deux axes majeurs:

- un axe maillage surfacique automatique (logiciel BLSURF) permettant le respect de caractéristiques géométriques (courbures, discontinuités,...) ou physiques (lignes de mailles schématisant une frontière entre un élément mobile et un élément fixe, ...).

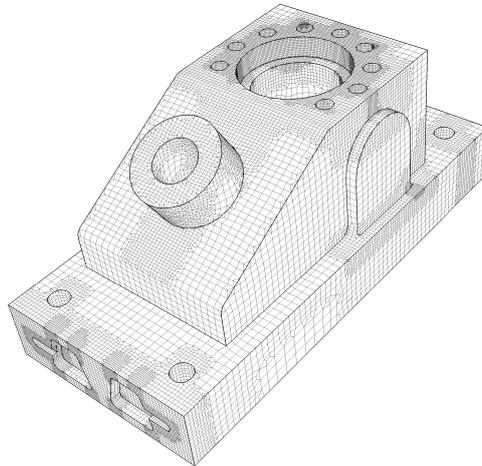


Figure 5. Maillage de la pièce "anc101" (origine : Drexel Repository) : 157.000 éléments dont 3% de pyramides situées le long des angles droits.

- un axe maillage volumique où les maillages sont considérés comme des objets ou composants. La réunion de deux composants maillage demande l'utilisation d'un mailleur automatique volumique (GHS3D).

7.3. 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.

7.4. LECTRA

Participants: P. Laug, H. Borouchaki.

Lectra, leader mondial des solutions CFAO hardware et software dédiées aux industries textiles, a lancé en juin 1999 le développement d'un produit de création de patrons plans 2D basés sur des surfaces 3D. Ce produit, nommé DesignConcept3D, utilise le processus suivant :

1. Import de surfaces 3D (Parasolid, IGES, Step, Catia, ...).
2. Maillage de surfaces 3D.
3. Dépliage de surfaces 3D en patrons 2D.
4. Industrialisation de patrons 2D.

Un contrat de partenariat concerne l'intégration des logiciels de maillage BLSURF et de décimation Decimesh (INRIA et UTT) dans le logiciel industriel DesignConcept3D (LECTRA).

8. Dissemination

8.1. Participation à des colloques, séminaires, invitations

- P. FREY *Perspectives of local anisotropic Delaunay mesh adaptation*, keynote speaker, 14th Int. Meshing Roundtable, San Diego, CA, USA, septembre 2005
- F. ALAUZET, *Concrete application examples based on adaptive mesh generation methods*, Tetrahedron workshop, Weierstrass Institute, Berlin, octobre 2005.
- P.L. GEORGE, *From quality and robustness issues in pure Delaunay algorithms to Delaunay based algorithms and anisotropic mesh construction*, Tetrahedron workshop, Weierstrass Institute, Berlin, octobre 2005.
- F. ALAUZET, *Exemples concrets d'applications basés sur des méthodes de génération de maillage adaptatif*, dans le cadre du partenariat avec l'académie de Versailles, INRIA Rocquencourt, novembre 2005.
- P.L. GEORGE, *Génération de maillages pour la résolution de problèmes formulés en EDP. Problématiques liées à la géométrie sur ordinateur*, dans le cadre du partenariat avec l'académie de Versailles, INRIA Rocquencourt, novembre 2005.
- B. KOOBUS, L. HASCOET, F. ALAUZET, A. LOSEILLE, Y. MESRI AND A. DERVIEUX, *Continuous metric for mesh adaptation*, Symposium on Applied Aerodynamics and Design of Aerospace Vehicles, SAROD 2005 Hyderabad, India, décembre 2005.
- C. DOBRZINSKI, P. FREY ET O. PIRONNEAU, *Couplage pour des simulations de flux d'air dans des géométries complexes avec adaptation de maillage anisotrope*, 17^e congrès français de mécanique, Troyes, septembre 2005.

- H. BOROUCAKI, *Génération de maillages de qualité – Applications*, Journée thématique maillage, IFP, Rueil-Malmaison, mars 2005.
- P. LAUG, H. BOROUCAKI, *Intégration de composants logiciels INRIA et UTT pour l'élaboration de maillages automatiques pour l'industrie automobile et aéronautique*, session « Pourquoi et jusqu'où faut-il faire confiance à la simulation ? », MICAD 2005, Paris, avril 2005 et PSA, La Garenne, juin 2005.
- A. CHEROUAT, H. BOROUCAKI, K. SAANOUNI, P. LAUG, *Procédure adaptative pour le calcul des structures : application à la mise en forme des matériaux solides*, 7^e Colloque National en Calcul des Structures, Giens, mai 2005.
- P. LAUG, *Topologie et maillage des surfaces paramétrées à partir d'une modélisation B-Rep*, 17^e Congrès Français de Mécanique, CFM 2005, conférence d'ouverture de la session C2 « Maillage adaptatif et estimation d'erreur », Troyes, août 2005.
- P. LAUG, *Maillages surfaciques anisotropes – Applications*, Club maillage, IFP, Rueil-Malmaison, décembre 2005.
- PL. GEORGE, *Sur la reconstruction de surfaces à partir d'un nuage de points*, séminaire du Laboratoire Jacques-Louis Lions, Université de Paris VI, Paris, octobre 2005.
- PL. GEORGE, *Sur la construction de maillages*, 17^e Congrès Français de Mécanique, CFM 2005, conférence d'ouverture de la session C2 « Maillage adaptatif et estimation d'erreur », Troyes, août 2005.
- PL. GEORGE, *Maillage et aéronautique*, RFI émission scientifique, le Bourget, septembre 2005.

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".

9. Bibliography

Doctoral dissertations and Habilitation theses

- [1] C. DOBRZYNSKI. *Adaptation de maillage anisotrope 3d et application à l'aérothermique des bâtiments*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, novembre 2005.

Articles in refereed journals and book chapters

- [2] H. BOROUCAKI, P. LAUG, A. CHEROUAT, K. SAANOUNI. *Adaptive remeshing in large plastic strain with damage*, in "International Journal for Numerical Methods in Engineering (IJNME), Wiley", vol. 63, n° 1, 2005, p. 1-36.
- [3] H. BOROUCAKI, J. VILLARD, P. LAUG, P. GEORGE. *Surface mesh enhancement with geometric singularities identification*, in "Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (CMAME), Special Issue on Unstructured Mesh Generation", vol. 194, n° 48-49, 2005, p. 4885-4894.
- [4] A. CHEROUAT, K. SAANOUNI, H. BOROUCAKI, P. LAUG. *Virtual metal forming with damage occurrence using adaptive remeshing*, in "International Journal of Forming Processes (IJFP), Hermès, Lavoisier", vol. 8, n° 2-3, 2005, p. 311-332.

- [5] C. DOBRZYNSKI, P. FREY, B. MOHAMMADI, O. PIRONNEAU. *Fast and accurate simulations of air-cooled structures*, in "Comp. Meth. in Appl. Mech. and Engng.", vol. to appear, 2005.
- [6] P. FREY, F. ALAUZET. *Anisotropic mesh adaptation for CFD computations*, in "Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (CMAME), Special Issue on Unstructured Mesh Generation", vol. 194, n° 48-49, 2005, p. 5068-5082.

Publications in Conferences and Workshops

- [7] A. CHEROUAT, H. BOROUCHEKI, K. SAANOUNI, P. LAUG. *Procédure adaptative pour le calcul des structures : application à la mise en forme des matériaux solides*, in "7e Colloque National en Calcul des Structures, Giens, France", mai 2005.
- [8] P. GEORGE. *Sur la construction de maillages*, in "17e Congrès Français de Mécanique, CFM 2005, conférence d'ouverture de la session C2 « Maillage adaptatif et estimation d'erreur », Troyes, France", n° article no 1320, 16 pages, août 2005.
- [9] B. KOOBUS, L. HASCOET, F. ALAUZET, A. LOSEILLE, Y. MESRI, A. DERVIEUX. *Continuous metric for mesh adaptation*, in "Symposium on Applied Aerodynamics and Design of Aerospace Vehicles, SAROD 2005, Hyderabad, India", vol. CD-ROM, décembre 2005.
- [10] P. LAUG. *Topologie et maillage des surfaces paramétrées à partir d'une modélisation B-Rep*, in "17e Congrès Français de Mécanique, CFM 2005, conférence d'ouverture de la session C2 « Maillage adaptatif et estimation d'erreur », Troyes, France", n° article no 1319, 12 pages, août 2005.

Bibliography in notes

- [11] J. BOISSONNAT, M. YVINEC. *Géométrie algorithmique*, Ediscience, 1995.
- [12] P. CIARLET. *Basic Error Estimates for Elliptic Problems*, vol. II, Ciarlet, P. G. and Lions, J. L., North Holland, 1991.
- [13] P. FREY, P. GEORGE. *Maillages. Applications aux éléments finis*, Hermès Science Publications, Paris, 1999.
- [14] P. GEORGE, H. BOROUCHEKI. *Triangulation de Delaunay et maillage. Applications aux éléments finis*, Hermès, 1997.
- [15] A. GEORGE. *Computer implementation of the finite element method*, Ph. D. Thesis, Dep. of Computer Science, Stanford, 1971.
- [16] R. LOHNER. *Progress in grid generation via the advancing front technique*, in "Engineering with computers.", vol. 12, 1996, p. 186-210.
- [17] F. PREPARATA, M. SHAMOS. *Computational geometry, an introduction*, Springer-Verlag, 1985.
- [18] M. SHEPHARD, P. GEORGE. *Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Finite Octree Technique*, in "Int. J. Numer. Methods Eng.", vol. 32, n° 4, 1991, p. 709-749.

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