



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Project-Team Gamma

*Génération Automatique de Maillages et
Méthodes d'Adaptation*

Rocquencourt

THEME 4B

Activity
R *eport*

2003

Table of contents

1. Team	1
2. 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	2
3.2.3. Autres méthodes	3
3.2.4. Géométrie algorithmique	3
3.3. Méthodes d'adaptation de maillage	3
3.4. Définition géométrique	3
3.4.1. Surfaces analytiques et discrètes	3
3.4.2. Analyse d'une géométrie	4
3.4.3. Bases 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	4
5. Software	5
5.1. Introduction	5
5.2. Logiciel BL2D-V2	5
5.3. Logiciel BLSURF-V2	6
5.4. Logiciel BLMOL	6
5.5. Logiciels Emc2 et Bamg	6
5.6. Logiciel Medit	6
5.7. Logiciel FreeFem+	7
5.8. Logiciel GAMHIC3D	7
5.9. Logiciel GHS3D-V3	7
5.10. Logiciel YAMS	7
6. New Results	7
6.1. Linéarisation des courbes	7
6.2. Maillage adaptatif en grande déformation avec endommagement	8
6.3. Maillage surfacique trans-carreaux	10
6.4. Adaptation de maillages 3D	10
6.5. Écoulements dans un bâtiment	10
6.6. Maillage de surfaces discrètes	12
6.7. Reconstruction de surface à partir d'un nuage de points	13
6.8. Construction de maillage anisotrope en trois dimensions	13
6.9. Maillage anisotrope en trois dimensions par avancée de front	14
6.10. Estimateur d'erreur géométrique	14
6.11. Maillage P2 en trois dimensions	15
6.12. Génération automatique de maillages hexaédriques	15
7. Contracts and Grants with Industry	16
7.1. Simulog Technologie	16
7.2. Dassault Aviation	16
7.3. LECTRA	16

7.4. OGS (Italie)	18
8. Other Grants and Activities	18
8.1. Actions européennes	18
8.1.1. Projet Magic-Feat	18
8.2. Actions nationales	18
8.2.1. Arc ISMC	18
9. Dissemination	18
9.1. Participation à des colloques, séminaires, invitations	18
9.2. Enseignement	19
10. 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

Pascal Frey [CR, puis Professeur, Université Paris 6]

Éric Saltel [DR]

Conseiller scientifique

Olivier Pironneau [Professeur, Université Paris 6]

Collaborateurs extérieurs

Houman Borouchaki [Professeur, Université de Technologie de Troyes]

Frédéric Hecht [Professeur, Université Paris 6]

Jens Krause [ETHZ]

Loïc Maréchal [Simulog-Technologies]

Bijan Mohammadi [Professeur, Université Montpellier]

Chercheurs doctorants

Frédéric Alauzet [Université Montpellier]

Larvi Debiane [Université Montpellier]

Cécile Dobrzynski [Université Paris 6]

Julien Villard [UTT]

2. 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 [25].

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 [30].

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.

Enfin, 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).

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 [29], 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 [31].

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 [26]. 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 [27], 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 [33].

3.2.4. Géométrie algorithmique

La géométrie algorithmique [32], [29], ou du moins des parts importantes de celle-ci, donne des indications théoriques qui, revues ou bien interprétées, permettent, dans une certaine mesure, de définir des outils utiles au développement de nombreux algorithmes utilisables dans le contexte de la génération de maillage.

Les questions générales concernant les structures de données, les algorithmes de base (tri, recherche, ...) et la complexité des algorithmes trouvent naturellement leur place dans nos activités.

Toutes les études sur les triangulations de Delaunay donnent, dans une certaine mesure, des résultats utilisables dans les méthodes de maillage. Parmi ceux-ci, les preuves d'existence ou non de solution indiquent s'il peut être envisagé de chercher des algorithmes dérivés des résultats abstraits ou s'il convient de s'orienter vers des algorithmes qui, quoique de nature plus heuristique, sont, en général, nettement plus efficaces.

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 [25], [28]. 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).

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).

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.

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. Bases 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

Key words: *élément fini, résolution d'EDP, adaptation et contrôle d'erreurs, réalité virtuelle.*

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. À ce titre, l'équipe a mis dans le domaine public, par le passé, un certain nombre de logiciels qui sont documentés et accessibles sur le site :

<ftp://ftp.inria.fr/INRIA/Projects/Gamma>

Pour la diffusion des autres logiciels (non présents sur ce site), existants ou à venir, l'Inria et 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
Emc2 et Bamg	2D	domaine public
FreeFem+	2D	domaine public
Medit	toutes dim.	domaine public
GAMHIC3D	3D volumique	transfert
GHS3D	3D volumique	transfert
YAMS	3D surfacique	transfert

5.2. Logiciel BL2D-V2

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

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

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

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

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

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 maillage 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

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Key words: *maillage, surface moléculaire.*

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. Logiciels Emc2 et Bamg

Participants: Frédéric Hecht [correspondant], Eric Saltel.

Key words: *maillage, CAO, triangle, quadrilatère, maillage automatique, adaptation de maillage, isotrope, anisotrope.*

Emc2 est un logiciel portable, graphique et interactif d'édition de maillages et de contours en deux dimensions.

Bamg est un générateur de maillages bidimensionnels isotropes ou anisotropes.

5.6. Logiciel Medit

Participants: Pascal Frey [correspondant], Eric Saltel.

Key words: *visualisation de maillages.*

Medit est un environnement graphique (sous OpenGL) permettant de visualiser de manière interactive des maillages (2D, 3D et surfaces) et des informations associées (champs de solutions, entités spécifiques). Les rotations, translations, zooms, etc. se font de manière naturelle avec la souris. La visualisation des solutions associées à un maillage permet de regarder des iso-lignes ou iso-surfaces (d'un champ scalaire) ou des lignes de courant (champ vectoriel). Ce logiciel très simple d'utilisation permet de visualiser très rapidement des

maillages (et solutions) de taille importante (plusieurs centaines de milliers ou quelques millions d'éléments - jusqu'à 50 millions de tétraèdres ont été testés - en 3 dimensions) sur une simple station de travail ou un PC.

5.7. Logiciel FreeFem+

Participants: Frédéric Hecht [correspondant], Olivier Pironneau [correspondant].

Key words: *maillage, triangle, élément fini, adaptation de maillage, équation aux dérivées partielles, C++.*

FreeFem+ est une implémentation d'un langage dédié aux éléments finis qui permet de résoudre des équations aux dérivées partielles simplement sur différents maillages. Il permet aussi de faire de l'adaptation de maillages. Le logiciel a été porté sous les environnements Unix, MacOS et Windows.

5.8. Logiciel GAMHIC3D

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

Key words: *maillage isotrope contrôlé, tétraèdre, triangulation automatique.*

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.

5.9. Logiciel GHS3D-V3

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

Key words: *maillage, tétraèdre, triangulation automatique.*

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.

5.10. Logiciel YAMS

Participant: Pascal Frey [correspondant].

Key words: *maillage de surface, décimation, simplification, optimisation.*

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

6. New Results

6.1. Linéarisation des courbes

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

La plupart des systèmes de CAO permettent d'extraire la frontière d'un volume donné ou de définir directement une surface 3D. La représentation interne d'une telle *surface composée* est généralement un assemblage de carreaux paramétrés. Les interfaces entre ces carreaux sont généralement des courbes obtenues par jonction ou par intersection de surfaces. Ainsi, ces courbes jouent un rôle fondamental dans la modélisation géométrique des objets tridimensionnels.

Dans le contexte de la méthode des éléments finis, il est nécessaire de discrétiser ces courbes et de mailler ces surfaces composées. Il existe deux grandes classes de méthodes pour construire ces maillages : les méthodes directes (le maillage est généré directement sur la surface dans R^3) et les méthodes indirectes (le maillage est généré dans le domaine de R^2 des paramètres, puis plongé dans R^3). Dans ces deux méthodes, les courbes interfaces sont dans un premier temps discrétisées, puis les surfaces sont maillées en s'appuyant sur ces discrétisations.

La discrétisation des courbes est un sujet bien connu dans le domaine de la génération de maillages. Cependant, les méthodes utilisées sont généralement basées sur des longueurs d'arcs (ou abscisses curvilignes) et peuvent être très coûteuses lorsque la représentation analytique des courbes est complexe. D'autres problèmes apparaissent dans le contexte d'une méthode indirecte de maillage, car il est alors nécessaire d'obtenir les images inverses de la courbe discrétisée dans les domaines de paramètres correspondants. Généralement, ce report est effectué par la résolution de systèmes non linéaires représentant les équations analytiques des courbes, ce qui entraîne un manque de robustesse et de rapidité.

Nous avons mis au point une nouvelle méthode de discrétisation des courbes, basée sur la construction préalable de lignes polygonales approchant fidèlement les courbes. En outre, une nouvelle technique de linéarisation permet de faciliter le report de ces discrétisations dans les domaines de paramètres correspondants, évitant ainsi le recours à la résolution de systèmes non linéaires. Ces résultats ont été intégrés dans le mailleur surfacique BLSURF-V2 et plusieurs articles ont été soumis à publication.

6.2. Maillage adaptatif en grande déformation avec endommagement

Participants: Patrick Laug, Houman Borouchaki [correspondant].

Dans de nombreux procédés de mise en forme des matériaux, des pièces mécaniques sont soumises à de grandes déformations plastiques et sont endommagées, volontairement ou non. Une simulation numérique de ces procédés par la Méthode des Éléments Finis exige des techniques de maillage appropriées. En effet, le maillage doit être aussi régulier que possible pour assurer la convergence de la solution, ce qui conduit à des remaillages fréquents du domaine en cours de déformation et d'endommagement. En outre, le maillage doit être adapté pour améliorer la précision de la solution, selon les phénomènes physiques étudiés.

Nous avons proposé une nouvelle approche pour générer ces maillages, en prenant en compte la géométrie des outils et les champs physiques à l'intérieur de la pièce, et en éliminant les éléments totalement endommagés. Ainsi, un remaillage est effectué à chaque pas de temps selon le schéma suivant :

- définition de la nouvelle frontière du domaine ayant subi des déformations ainsi que des endommagements pouvant modifier sa topologie,
- estimation de l'erreur géométrique liée à la forme de la pièce et des outils,
- estimation de l'erreur physique en fonction des contraintes mécaniques, des déformations plastiques et des endommagements,
- spécification de la taille idéale des éléments du maillage à partir des estimations d'erreurs géométriques et physiques précédentes,
- rediscrétisation adaptative de la frontière gouvernée par cette spécification de tailles,
- remaillage adaptatif du domaine gouverné par cette même spécification de tailles.

Cette méthode a été implémentée dans un environnement de calcul comprenant le mailleur adaptatif BL2D-V2 et le solveur ABAQUS/Explicit (voir figure 1). Des articles ont été soumis ou publiés [13], et un DVD présentant certains résultats de manière animée est en cours de réalisation par l'équipe Communication Scientifique Multimédia de l'INRIA.

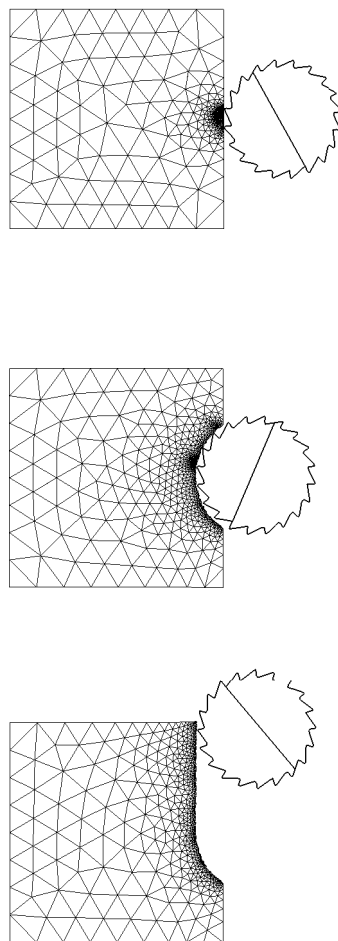


Figure 1. Maillage adaptatif durant la simulation d'un procédé de fraisage.

6.3. Maillage surfacique trans-carreaux

Participants: Houman Borouchaki [correspondant], Patrick Laug.

Une approche indirecte a été précédemment proposée pour mailler des surfaces paramétrées. De part sa nature (construction du maillage via les domaines des paramètres), elle ne permet que la génération de maillages "patch dépendant", c'est-à-dire respectant les frontières des carreaux définissant la surface. Ainsi, à chaque élément du maillage (triangle ou quadrilatère) correspond de manière unique un carreau de la surface, et cette associativité est généralement souhaitable au sein d'un système de CAO. Cependant, cette associativité peut aussi entrer en conflit avec la qualité des éléments, par exemple lorsqu'un carreau est de taille inférieure aux tailles requises ou lorsque deux côtés adjacents d'un carreau forment un angle vif. Pour y remédier, une méthode d'optimisation de maillage basée sur des techniques de simplification est introduite. Elle est appliquée *a posteriori* aux maillages résultants de l'approche indirecte. En outre, la méthode préserve partiellement l'associativité avec le système CAO (en particulier les courbes imposées préalablement). La figure 2 illustre ces possibilités.

6.4. Adaptation de maillages 3D

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

Key words: *Adaptation de maillages, métriques, mécanique des fluides.*

L'objectif est de mettre en place une boucle de calcul CFD avec adaptation de maillage en 3D pour des simulations instationnaires utilisant les outils de génération de maillages du projet. L'adaptation de maillages non-structurés est une méthode efficace pour effectuer des simulations numériques en réduisant considérablement le coût de calcul et atteindre la précision désirée pour la solution numérique. L'adaptation de maillages pour les phénomènes qui évoluent au cours du temps est d'autant plus importante que de telles simulations nécessitent un maillage fin uniforme dans tout le domaine de calcul.

Le schéma d'adaptation "classique" n'étant pas adapté à de telles simulations, une alternative consiste à prédire l'évolution du phénomène et à mailler avec une taille adéquate les régions où la solution évolue. L'idée est de résoudre un problème de point fixe transitoire, en introduisant une nouvelle boucle dans la boucle d'adaptation. Afin d'avoir un maillage de taille adéquate tout au long du calcul de la boucle interne, on introduit une intersection de métrique en temps. Elle permet d'avoir un maillage à la fois adapté à la solution initiale, la solution finale, ainsi que toutes les solutions intermédiaires de la période. Ces travaux ont été présentés dans la thèse de F. Alauzet [2] et dans plusieurs papiers et rapports [3][12][14][21][22]. Les études en cours portent sur une extension de cet algorithme aux métriques anisotropes.

6.5. Écoulements dans un bâtiment

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

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

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.

En termes numériques, il s'agit de résoudre les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u &= -\nabla p + \nabla \cdot S + f \\ \nabla \cdot u &= 0 \end{cases}$$

où $S = \nu(\nabla u + {}^t \nabla u)$, u est la vitesse, p la pression, ν la viscosité cinématique, $f(x)$ est une force donnée, $(\nabla u)_{ij} = u_{i,j}$ est 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

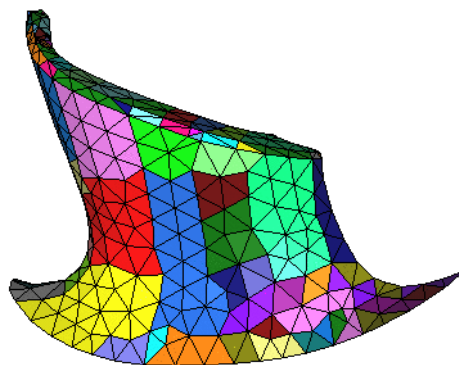
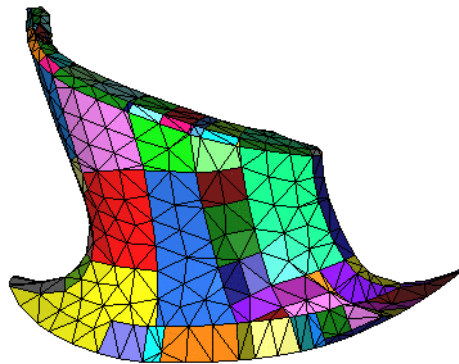


Figure 2. Maillage surfacique : à gauche, respectant les frontières des carreaux ; à droite, trans-carreaux.

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 vitesse 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.

Une application spécifique concerne le système de refroidissement d'un tunnel du métro parisien au passage d'une rame (Figure 3). Les ventilateurs fonctionnent en extraction en confort avec un débit de 40 ou 60 m³/s. Le fonctionnement en extraction permet d'extraire les calories induites par la circulation des trains (freinage, dégagement de chaleur dû à la traction du pneu, Figure 3).

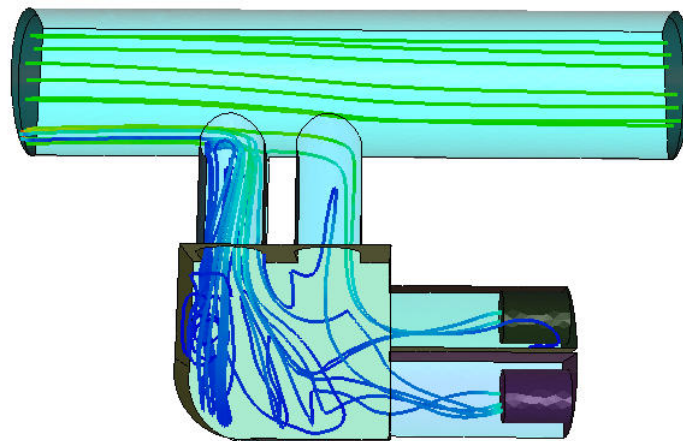


Figure 3. Exemple d'écoulement incompressible dans un tunnel du métro parisien (géométrie: RATP).

6.6. Maillage de surfaces discrètes

Participants: Houman Borouchaki [correspondant], Pascal Frey [correspondant], Éric Saltel.

Key words: *surface discrète, décimation, remaillage, optimisation.*

Le but est de remailler une surface en tenant compte des propriétés géométriques de celle-ci (courbures, etc.) et éventuellement d'une carte de métriques (tailles et/ou directions). La surface est définie, du point

de vue géométrique, par un maillage (*i.e.*, de manière discrète) éventuellement enrichi d'informations sur les singularités (points singuliers, arêtes vives) présentes et de toutes autres informations disponibles (normales, par exemple).

Cette étude, débutée il y a deux ans, a été poursuivie par le développement d'algorithmes de remaillage basés sur des métriques anisotropes. La carte de métrique anisotrope est définie à partir des propriétés intrinsèques de la surfaces (courbures et directions principales). Cette carte de métrique peut être combinée, le cas échéant avec une carte de métrique fournie par un estimateur d'erreur (dans le contexte de l'adaptation de maillages). Ces développements ont été intégrés au logiciel Yams. Par ailleurs, la construction de maillages de surface en quadrilatères a été implémentée dans le logiciel, par une méthode d'appariement de triangles.

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

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

Key words: *nuage de points, maillage de surface, reverse engineering.*

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 Elements Finis.

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), de mauvais genre, ..., ne présentant pas les propriétés 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 interne appartient à deux faces) et, au final, telle que les outils standards de traitement des surfaces s'appliquent sans problèmes particuliers.

6.8. Construction de maillage anisotrope en trois dimensions

Participants: Houman Borouchaki, Paul Louis George [correspondant], Éric Saltel, Frederic Alauzet, Larvi Bediane.

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

La construction d'un maillage simplicial anisotrope d'un domaine arbitraire est un problème relativement nouveau (du moins en trois dimensions). On étudie une méthode de construction qui 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 nouveau 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) pas d'endroit où cette approche générique est considérée, faisant de Gamma le seul lieu où ce type de mailleur est développé.

Un tel mailleur est basé sur trois type 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 avons poursuivi la validation sur des cas industriels concrets, en mécanique des fluides.

Le connecteur de points est du type “Delaunay”. On a étendu au cas anisotrope la méthode incrémentale correspondante. 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. Les arêtes trop longues, dans la métrique, 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 (suite à une étude menée l’an dernier). 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 et qu’il fallait en utiliser de plus fines.

6.9. Maillage anisotrope en trois dimensions par avancée de front

Participant: Jans Krause [correspondant].

Key words: *maillage anisotrope, adaptation de maillage, avancée de front métrique anisotrope, couches limites.*

La construction d’un maillage simplicial anisotrope d’un domaine arbitraire par avancée de front dirigée directement par une métrique anisotrope est une approche nouvelle et différente de ci-dessus qui permet d’obtenir des couches limites. On étudie une méthode de construction qui utilise un connecteur de type “Delaunay” réécrit dans un contexte anisotrope, définit des points internes selon une métrique discrète anisotrope directement basée sur une avancée de front.

Cette étude regarde comment placer les points d’une couche limite en s’appuyant sur une stratégie d’avancée de front basée sur les points de la peau du domaine (et non ses faces) dont la métrique est utilisée pour placer correctement les nouveaux points. Ces points sont alors connectés entre eux via un noyau de Delaunay anisotrope.

6.10. Estimateur d’erreur géométrique

Participants: Houman Borouchaki [correspondant], Paul Louis George, Dominique Chapelle, Patrick Laug, Pascal Frey.

Key words: *estimateur d’erreur, courbure.*

Une étude détaillée sur une majoration possible d’erreur d’interpolation, exploitable en termes d’adaptation de maillages, est réalisée en toute dimension. Une nouvelle approche reliant le problème d’estimation *a posteriori* d’erreur et la génération de maillages surfaciques a été introduite. Quelques exemples d’adaptation dans le cas d’une solution analytique ont permis de valider cette approche.

Il existe plusieurs types d’estimateurs permettant le contrôle *a posteriori* de l’erreur commise sur une solution calculée sur un maillage par éléments finis. Ces estimateurs peuvent servir à contrôler le maillage par *h-adaptation* de manière à ce que la solution du problème aux EDP résolu avec un tel maillage comme support spatial soit d’une précision donnée.

Parmi ces estimateurs, on trouve ceux basés sur l’erreur d’interpolation (et, en ce sens, purement géométriques puisque ne prenant pas en compte la nature de l’opérateur étudié). Ce type d’estimateurs a été étudié par de nombreux auteurs. Néanmoins, la plupart de ces études reposent sur le fait qu’un paramètre, h , la taille des mailles, est petit ou tend vers zéro et, de ce fait, sont des études asymptotiques. L’estimateur se base alors sur des développements de Taylor appropriés et donne ainsi des indications sur la taille, le h , admissible. Toutefois, cette taille n’étant pas nécessairement petite, nous proposons une nouvelle approche qui, quoique

voisine, ne suppose pas d'hypothèses particulières sur ce paramètre et, par suite, est probablement mieux justifiée. Notre approche est d'ailleurs assez similaire, dans son esprit, à certaines solutions utilisées dans un domaine différent, le maillage de carreaux paramétrés.

6.11. Maillage P2 en trois dimensions

Participants: Julien Villard, Houman Borouchaki [correspondant].

Key words: *maillage P2, surface P2, tétraèdres P2.*

La construction d'un maillage simplicial composé d'éléments quadratiques (au sens des Eléments Finis P2) est demandée pour certains types d'applications (en particulier en mécanique du solide pour prendre en compte les fortes non-linéarités). On étudie une méthode de construction qui part d'un maillage simplicial classique (i.e., P1) et le transforme en un maillage P2. Pour ce faire, les triangles de la surface sont "courbés" tout comme les tétraèdres voisins d'une surface courbe.

Cette étude traite la transformation d'un maillage tétraédrique P1 en un maillage tétraédrique P2.

La première étape consiste à extraire le maillage de la surface du domaine du maillage volumique. Puis, une géométrie intrinsèque valide (ne présentant aucun plis) s'appuyant sur ce maillage surfacique est définie. En particulier, une nouvelle approche est proposée afin d'identifier les discontinuités géométriques (arêtes vives et coins). Cette géométrie permet de transformer les triangles en triangles courbes là où la géométrie le prescrit.

Ceci fait, les tétraèdres voisins des zones courbes sont, à leur tour, courbés si l'une des arêtes coupe la géométrie intrinsèque. Pour ce faire, une méthode d'optimisation est appliquée.

Simple dans son principe, ce problème présente de nombreuses difficultés qui sont traitées via des méthodes appropriées.

6.12. Génération automatique de maillages hexaédriques

Participant: Loïc Maréchal.

Key words: *hexaèdres, octree, maillage.*

La génération automatique de maillages hexaédriques reste, aujourd'hui, un enjeu industriel important. Cette étude, de nom de code Hexotic, tente de relever le défi en se basant sur la méthode octree. La géométrie issue d'un tel arbre se prêtant, de par sa nature, à la génération de maillages hexaédriques.

Ce travail consiste à créer une boîte noire prenant une triangulation de surface quelconque en entrée et ressortant un maillage composé uniquement d'hexaèdres conformes remplissant le volume défini par la surface.

L'algorithme se base sur la représentation de la triangulation de surface par un arbre *octree*. Celui-ci peut être contrôlé par divers critères de subdivision comme la géométrie de la surface, ou le résultat d'un calcul. Cet arbre constitue le point de départ de l'algorithme décrit ci-dessous :

1. Création d'un maillage de fond:
 - i. La méthode *octree* est tout d'abord utilisée pour créer un premier maillage de fond non-conforme.
 - ii. Puis, l'insertion de jeux d'éléments prédéfinis permet de transformer cet octree en maillage mixte (hexaèdres-pentaèdres) et conforme.
2. Recherche de la frontière par découpe des éléments intersectés par la triangulation de surface:
 - i. Etiquetage des nœuds en fonction de leur appartenance ou non au volume à mailler et de leur sous-domaine.

- ii. Découpe des éléments en fonction des étiquettes de leurs nœuds, cette étape produit un maillage approximant la frontière mais composé de polyèdres quelconques (ceux-ci respectent toutefois deux propriétés fondamentales : ils sont convexes, et le degré de chaque point est égal à trois).
- iii. Découpe de tous les polyèdres par étoilement partant du point central vers les milieux des faces et des arêtes. Ceci conduit à un maillage purement hexaédrique.
- iv. Déplacement des nœuds de cette frontière pour approcher au mieux la géométrie du domaine. Les nœuds à l'intérieur du volume sont déplacés simultanément afin de garantir une bonne qualité d'éléments dans le maillage final.

La méthode de recherche de la frontière par pliage pur a été abandonnée au profit d'une découpe des éléments de frontière. Cette dernière produit des hexaèdres de meilleure qualité, évite les éléments invalides, améliore la formation de couches limites et facilite grandement la phase finale de projection des nœuds frontières du maillage volumique sur la surface.

Même si les angles vifs restent très difficiles à représenter avec cette méthode (c'est un défaut inhérent à la classe des méthodes intersection grille-surface), un prototype utilisable est aujourd'hui en cour de finalisation (voir figure 4).

7. Contracts and Grants with Industry

7.1. Simulog Technologie

Simulog Technologie est chargée de la diffusion des codes développés initialement dans le projet Gamma. À ce titre, Simulog Technologie effectue des opérations de commercialisation et de transfert de technologie de maillages. Simulog Technologie s'occupe de la commercialisation des maillages surfaciques (Yams) et volumiques (Ghs3d et Gamhic3d) et participe à la validation puis à l'industrialisation des codes correspondants. Simulog Technologie intervient aussi dans la conception du maillage hexaédrique (Hexotic) via la mise à disposition de Loïc Maréchal.

7.2. Dassault Aviation

Participants: F. Alauzet, P. Frey, B. Mohammadi.

L'objectif est d'étudier l'impact de la modification du nez d'un avion supersonique 3D sur les performances acoustiques et aérodynamique, notamment la réduction du bang sonique. Dans cette étude, l'objectif est de coupler l'adaptation de maillages avec l'optimisation de formes, dans le but d'étudier l'impact de la modification du nez d'un avion supersonique 3D sur les performances acoustiques et aérodynamique, notamment la réduction du bang sonique.

La méthode d'optimisation n'utilise pas de méthode de gradients mais seulement une paramétrisation de petites dimensions du nez de l'avion, qui permet d'étirer et de cambrer le museau. Par contre, à l'aide de l'adaptation de maillages, on a un calcul de l'état beaucoup plus précis. Il donne une condition initiale précise qui est nécessaire pour le code de propagation afin d'avoir une bonne évaluation du bang sonique. Après un échantillonnage de l'espace de contrôle, on construit la surface de réponse et on en a déduit le minimum global.

On constate que l'on trouve un résultat similaire à celui obtenu à l'aide de la méthode d'optimisation basée sur les gradients.

7.3. LECTRA

Participants: P. Laug, H. Borouchaki.

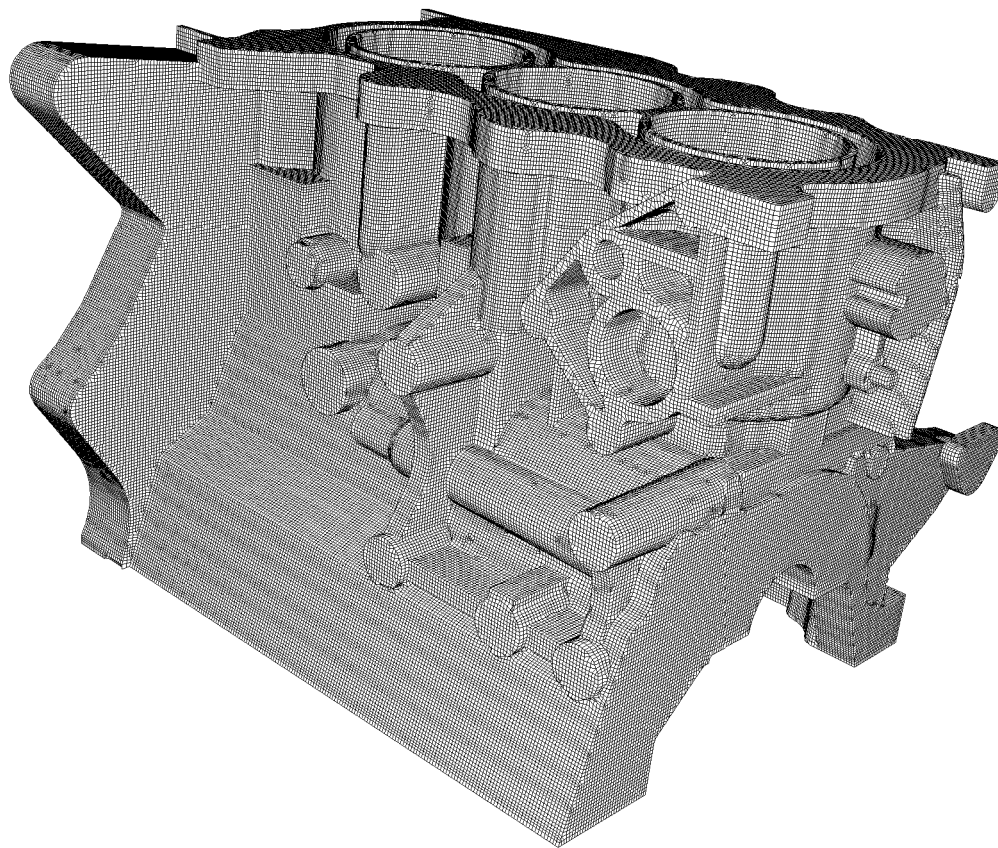


Figure 4. Exemple de maillage d'une partie bloc moteur (Honda Motor Japan) obtenu automatiquement avec le prototype d'Hexotic (1.700.000 hexaèdres, 5mn 40s et 785 Mo de mémoire sur une station HP à 750 mhz).

Le maillieur surfacique BLSURF-V2 a été intégré dans les systèmes de Conception et de Fabrication Assistées par Ordinateur de LECTRA, destinés principalement à la confection et aux textiles techniques de l'industrie automobile et aéronautique. De nouveaux développements sont à l'étude.

7.4. OGS (Italie)

Participants: P. Laug, H. Borouchaki.

Licence d'exploitation du maillieur bidimensionnel BL2D-V2 chez OGS – Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Italie. Ce logiciel sera utilisé pour la génération des grilles 2D de modèles de structures géologiques complexes nécessaires à la simulation numérique, par des schémas d'éléments spectraux, et l'étude de la propagation des ondes sismiques dans le sous-sol.

8. Other Grants and Activities

8.1. Actions européennes

8.1.1. *Projet Magic-Feat*

Participants: P.L. George, P. Frey, E. Saltel, F. Alauzet.

Key words: *simulation, processus, fabrication, semi-conducteurs.*

Ce projet concerne les processus de simulation et de fabrication des semi-conducteurs. À ce titre, de nombreux problèmes de construction de maillages sont rencontrés dus à la spécificité des géométries intéressées (zones minces, surfaces déformables, etc.). Le projet intervient dans la construction automatique de maillages volumiques à partir de la donnée de surface mal adaptée et intervient également dans le remaillage de surfaces. Ce projet s'est terminé en mars 2003.

8.2. Actions nationales

8.2.1. *Arc ISMC*

Participant: P. Laug.

Cette Action de Recherche Coopérative, intitulée « Instabilités de Surface de Matériaux Contraints », vise à modéliser l'évolution des surfaces pour de nombreux matériaux d'importance dans le domaine de la métallurgie et des semiconducteurs. Elle regroupe l'INRIA (projet Gamma) et l'Université de Poitiers (LMP et LAM). Cette ARC s'est terminée en juin 2003.

<http://www-rocq1.inria.fr/Patrick.Laug/arc-ismc/index.html>

9. Dissemination

9.1. Participation à des colloques, séminaires, invitations

- *Simplification of Composite Parametric Surface Meshes*, P. LAUG AND H. BOROUCHAKI, 7th US National Congress on Computational Mechanics, 4th Symposium on Trends in Unstructured Mesh generation, Albuquerque, New Mexico, USA, July 2003.
- *Simplification of terrains by minimization of the local deformation*, P.J. FREY, 5th Conf. on Curves and Surfaces, St Malo, 2003.
- *Medit: a multiplatform visualisation tool*, P.J. FREY, 2nd MIT Conf., Cambridge, Juin 2003,
- *Anisotropic mesh adaptation, application to transient CFD problems*, F. ALAUZET, P.J. FREY, 2nd MIT Conf., Cambridge, Juin 2003,
- *Anisotropic mesh adaptation for transient CFD problems*, P.J. FREY, F. ALAUZET, 12th Int. Meshing Roundtable, sept. 2003,
- *Back to edge flips in 3D*, H. BOROUCHAKI, P.L. GEORGE, 12th Int. Meshing Roundtable, sept. 2003,
- *Anisotropic mesh adaptation*, P.J. FREY, Seminaire Sandia Natl Lab, Livermore, CA, Sept 2003.

9.2. Enseignement

- P. Laug participe au cours *Les langages informatiques du calcul scientifique* à l'École Supérieure d'Ingénieurs Léonard de Vinci (ESILV).
- P.J. Frey donne un cours sur les méthodes d'éléments finis et méthodes spectrales (maîtrise) à L'Université Pierre et Marie Curie.
- F. Alauzet donne des Travaux Pratiques en Mathématiques avec Maple à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.

10. Bibliography

Books and Monographs

- [1] P. J. FREY, P. L. GEORGE. *Le maillage facile*. Hermes Lavoisier, 2003, in french.

Doctoral dissertations and “Habilitation” theses

- [2] F. ALAUZET. *Adaptation de maillage anisotrope en trois dimensions. Application aux simulations instationnaires en mécanique des fluides*. Ph. D. Thesis, 2003.

Articles in referred journals and book chapters

- [3] F. ALAUZET, P. L. GEORGE, B. MOHAMMADI, P. J. FREY, H. BOROUCAKI. *Transient fixed point based unstructured mesh adaptation*. in « Int. j. numer. methods fluids », number 6-7, volume 43, 2003, pages 729-745.
- [4] H. BOROUCAKI, A. CHEROUAT. *Une nouvelle approche géométrique pour le drapage de structures composites*. in « Revue des composites et des matériaux avancés », volume 12, 2002, no 3, pp. 407–421.
- [5] H. BOROUCAKI, A. CHEROUAT. *Drapage géométrique des composites*. in « C. R. Mécanique », volume 331, 2003, pp. 437–442.
- [6] P. J. FREY, H. BOROUCAKI. *Surface meshing using a geometric error estimate*. in « International Journal for Numerical Methods in Engineering (IJNME) », volume 58, 2003, pp. 227–245.
- [7] P. L. GEORGE, H. BOROUCAKI, P. LAUG. *An efficient algorithm for 3D adaptive meshing*. in « Advances in Engineering Software (AES) », volume 33, 2002, no. 7–10, pp. 377–387.
- [8] P. L. GEORGE, H. BOROUCAKI, E. SALTEL. *“Ultimate” robustness in meshing an arbitrary polyhedron*. in « International Journal for Numerical Methods in Engineering (IJNME) », volume 58, 2003, pp. 1061–1089.
- [9] P. LAUG, H. BOROUCAKI. *Generation of Finite Element Meshes on Molecular Surfaces*. in « International Journal of Quantum Chemistry (IJQC) », volume 93, 2003, no. 2, pp. 131-138.
- [10] P. LAUG, H. BOROUCAKI. *Interpolating and Meshing 3-D Surface Grids*. in « International Journal for Numerical Methods in Engineering (IJNME) », volume 58, 2003, pp. 209–225.

- [11] J. TOMASI, B. MENNUCCI, P. LAUG. *The modeling and simulation of the liquid phase*. in « In: Handbook of Numerical Analysis, Volume X, Special Volume on Computational Chemistry », 2003, P.G. Ciarlet (editor), C. Le Bris (guest editor), ISBN: 0-444-51248-9, North-Holland, Amsterdam, Netherlands, pp. 271–375..

Publications in Conferences and Workshops

- [12] F. ALAUZET, P. J. FREY. *Anisotropic mesh adaptation. Applications to transient CFD problems*. in « 2nd MIT Conference », Cambridge, MA, USA, 2003.
- [13] A. CHEROUAT, H. BOROUCAKI, K. SAANOUNI, P. LAUG. *An adaptive remeshing procedure in elastoplastic deformation with ductile damage: application in metal forming processes*. in « The 6th International ESAFORM Conference on Material Forming, Salerno, Italy », Apr., 2003.
- [14] P. J. FREY, F. ALAUZET. *Anisotropic mesh adaptation for transient CFD problems*. in « 12th Int. Meshing Roundtable », Sandia, Santa Fe, NM, USA, 2003.
- [15] P. J. FREY, H. BOROUCAKI. *Simplification of terrains by minimization of the local deformation*. in « 5th Int. Conf. on Curves and Surfaces », Nashboro Press, L. SCHUMAKER, editor, Saint Malo, 2003.
- [16] P. J. FREY. *Medit: a multiplatform visualisation tool*. in « 2nd MIT Conference », Cambridge, MA, USA, 2003.
- [17] P. L. GEORGE, H. BOROUCAKI. *Back to edge flips in 3 dimensions*. in « Proceedings 12th International Meshing Roundtable », pages 393–402, Santa Fe, New Mexico, USA, 2003.
- [18] P. L. GEORGE, P. J. FREY, P. LAUG, H. BOROUCAKI. *Automatic generation of 3D adapted meshes*. in « 5th Int. Conf. on Curves and Surfaces », Nashboro Press, L. SCHUMAKER, editor, Saint Malo, 2003.
- [19] P. L. GEORGE, P. J. FREY, P. LAUG, H. BOROUCAKI. *Curve and Surface meshing for Finite Elements Applications*. in « 5th Int. Conf. on Curves and Surfaces, Curve and Surface Fitting », Nashboro Press, J. M. A. COHEN, L. SCHUMAKER, editors, pages 159–176, Saint Malo, 2003.
- [20] P. LAUG, H. BOROUCAKI. *Simplification of Composite Parametric Surface Meshes*. in « 7th US National Congress on Computational Mechanics, 4rd Symposium on Trends in Unstructured Mesh generation: Part II, Albuquerque, New Mexico, USA », pages 66, July, 2003.

Internal Reports

- [21] F. ALAUZET, P. J. FREY. *Estimateur d'erreur géométrique et métriques anisotropes pour l'adaptation de maillage. Partie I: aspects théoriques*. Rapport de Recherche, number RR-4759, INRIA, Rocquencourt, 2003, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4759.html>.
- [22] F. ALAUZET, P. J. FREY. *Estimateur d'erreur géométrique et métriques anisotropes pour l'adaptation de maillage. Partie II: exemples d'applications*. Rapport de Recherche, number RR-4789, INRIA, Rocquencourt, 2003, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4789.html>.

- [23] P. J. FREY. *Génération et adaptation de maillages de calcul à partir de données anatomiques discrètes*. Rapport de Recherche, number RR-4764, INRIA, Rocquencourt, 2003, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4764.html>.
- [24] P. LAUG, H. BOROUCAKI. *BL2D-V2 : mailleur bidimensionnel adaptatif*. Rapport technique, number 0275, INRIA, Rocquencourt, Jan., 2003, <http://www.inria.fr/rrrt/rt-0275.html>.

Bibliography in notes

- [25] P. G. CIARLET. *Basic Error Estimates for Elliptic Problems*. volume II, Ciarlet, P. G. and Lions, J. L., North Holland, 1991.
- [26] A. GEORGE. *Computer implementation of the finite element method*. Ph. D. Thesis, Dep. of Computer Science, Stanford, 1971.
- [27] R. LOHNER. *Progress in grid generation via the advancing front technique*. in « Engineering with computers. », volume 12, 1996, pages 186-210.
- [28] R. VERFURTH. *A review of a posteriori error estimation and adaptive refinement techniques*. Wiley-Teubner, 1996.
- [29] BOISSONNAT, J. D. ET YVINEC, M.. *Géométrie algorithmique*. Ediscience, 1995.
- [30] FREY, P. J. ET GEORGE, P. L.. *Maillages. Applications aux éléments finis*. Hermès Science Publications, Paris, 1999.
- [31] GEORGE, P. L. ET BOROUCAKI, H.. *Triangulation de Delaunay et maillage. Applications aux éléments finis*. Hermès, 1997.
- [32] PREPARATA, F. P. AND SHAMOS, M. I.. *Computational geometry, an introduction*. Springer-Verlag, 1985.
- [33] SHEPHARD, M. S. AND GEORGES, M. K.. *Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Finite Octree Technique*. in « Int. J. Numer. Methods Eng. », number 4, volume 32, 1991, pages 709-749.