

*Projet Gamma**Génération Automatique de Maillages et  
Méthodes d'Adaptation**Rocquencourt*

THÈME 4B

 *Rapport  
d'Activité*

2002



# Table des matières

<b>1. Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2. Présentation et objectifs généraux</b>	<b>1</b>
<b>3. Fondements scientifiques</b>	<b>2</b>
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	2
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
<b>4. Domaines d'application</b>	<b>4</b>
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
<b>5. Logiciels</b>	<b>5</b>
5.1. Introduction	5
5.2. Logiciel Bamg	5
5.3. Logiciel BL2D-V2	5
5.4. Logiciel BLSURF	6
5.5. Logiciel BLMOL	6
5.6. Logiciel Emc2	6
5.7. Logiciel Medit	7
5.8. Logiciel FreeFem+	7
5.9. Logiciel GAMHIC3D	7
5.10. Logiciel GHS3D-V3	7
5.11. Logiciel YAMS	7
<b>6. Résultats nouveaux</b>	<b>8</b>
6.1. Interpolation et maillage de grilles 3-D	8
6.2. Remaillage en grandes déformations	8
6.3. Adaptation de maillages 3D	10
6.4. Écoulements dans un bâtiment	12
6.5. Maillage de surfaces discrètes	12
6.6. Contraintes par partition et problème d'existence d'un maillage d'un polyèdre arbitraire	13
6.7. Construction de maillage anisotrope en trois dimensions	15
6.8. Bascules généralisées en trois dimensions	15
6.9. Génération automatique de maillages hexaédriques	16
<b>7. Contrats industriels</b>	<b>17</b>
7.1. Simulog Technologie	17
7.2. Dassault Aviation	17
7.3. LECTRA	18
7.4. ALCATEL SPACE	18
<b>8. Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>18</b>

8.1. Actions européennes	18
8.1.1. Projet Magic-Feat	18
8.2. Actions nationales	18
8.2.1. Arc VITESV	18
8.2.2. Arc ISMC	18
<b>9. Diffusion des résultats</b>	<b>19</b>
9.1. Participation à des colloques, séminaires, invitations	19
9.2. Enseignement	20
<b>10. Bibliographie</b>	<b>20</b>

# 1. Composition de l'équipe

**Responsable scientifique**

Paul Louis George [DR]

**Responsable permanent**

Patrick Laug [CR]

**Assistante de Projet**

Maryse Desnous [TR (en commun avec Macs et M3N)]

**Personnel Inria**

Pascal Frey [CR]

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]

Bijan Mohammadi [Professeur, Université Montpellier]

Loic Maréchal [Simulog]

**Doctorants**

Frédéric Alauzet [Université Montpellier]

Larvi Debiane [Université Montpellier]

Cécile Dobrzynski [Université Paris 6]

## 2. Présentation et objectifs généraux

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 [31].

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 [32].

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.

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. Fondements scientifiques

### 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 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 [30], 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 [33].

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 étude 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 [34]. 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 [35], 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 [37].

### 3.2.4. Géométrie algorithmique

La géométrie algorithmique [36], [30], ou du moins des parts importantes de celle-ci, donne des indications théoriques qui, revues ou bien interprétées, permettent 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 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 [31], [38]. 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 numériques<sup>1</sup>. 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 d'introduire la notion de *longueur unité* et 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).

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.

<sup>1</sup>Le 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.

### 3.4.2. Analyse d'une géométrie

Les problèmes de maillage de surfaces nécessite 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. Domaines d'application

### 4.1. Panorama

**Mots clés :** *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 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. Logiciels

### 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 les logiciels Emc<sup>2</sup>, Bamg et FreeFEM/GFEM 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 ci-dessus et dans la description rapide qui suit.

Table 1. Tableau des logiciels et des modules.

Nom	Dimension	Disponibilité
Bamg	2D	domaine public
BL2D-V2	2D	transfert
BLSURF	3D surfacique	transfert
BLMOL	3D surfacique	transfert
Emc2	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 Bamg

**Participant :** Frédéric Hecht [correspondant].

**Mots clés :** *maillage, triangle, quadrangle, adaptation de maillage, isotrope, anisotrope.*

Bamg est un générateur de maillages bidimensionnels isotropes ou anisotropes. Il permet de construire un maillage à partir d'une géométrie (une frontière) ou de construire un maillage adapté en partant d'un maillage précédent et en se donnant une solution ou une métrique. Il permet aussi, dans ce cas, d'interpoler sur le maillage créé les solutions, dans le cas  $P^1$ , définies sur le maillage précédent.

Une géométrie est définie par un maillage de contours : une liste de sommets, une liste d'arêtes et des informations sur la continuité  $G^1$  souhaitée.

### 5.3. Logiciel BL2D-V2

**Participants :** Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki [correspondant].

**Mots clés :** *maillage, triangle, quadrangle, 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, et leur connexion est réalisée comme dans une approche Delaunay classique. L'obtention de quadrangles 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.

La diffusion de ce logiciel est liée à des accords de transfert.

## 5.4. Logiciel BLSURF

**Participants :** Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki [correspondant].

**Mots clés :** *maillage de surface, triangle, quadrangle, adaptation de maillage, isotrope, anisotrope, élément  $P^1$ , élément  $P^2$ , élément  $Q^1$ , élément  $Q^2$ .*

Le logiciel BLSURF 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 diffusion de ce logiciel est liée à des accords de transfert.

## 5.5. Logiciel BLMOL

**Participants :** Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki [correspondant].

**Mots clés :** *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.

La diffusion de ce logiciel est liée à des accords de transfert.

## 5.6. Logiciel Emc2

**Participants :** Frédéric Hecht [correspondant], Eric Saltel.

**Mots clés :** *maillage, CAO, triangle, quadrangle, triangulation automatique.*

Emc2 est un logiciel portable, graphique et interactif d'édition de maillages et de contours en deux dimensions. Il permet de générer interactivement des maillages bidimensionnels pour la méthode des éléments finis en définissant la géométrie (D.A.O), la discrétisation des contours, les sous-domaines et les numéros de référence (afin d'introduire un lien avec la physique, *i.e.*, les conditions aux limites et les propriétés des matériaux). Les maillages, formés de triangles ou de quadrangles, sont essentiellement de type grille ou de type Delaunay.

Il est possible d'éditer un maillage en ajoutant, supprimant, déplaçant des sommets, etc. et en lui appliquant des transformations affines (symétrie, rotation, etc).

## 5.7. Logiciel Medit

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

**Mots clés :** *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.

La diffusion de ce logiciel est liée à des accords de transfert.

## 5.8. Logiciel FreeFem+

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

**Mots clés :** *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. Ce logiciel est décrit sur le site :

<http://www-rocq.inria.fr/gamma/cdrom/www/freefem/fra.htm>.

## 5.9. Logiciel GAMHIC3D

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

**Mots clés :** *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.

La diffusion de ce module est liée à des accords de transfert.

## 5.10. Logiciel GHS3D-V3

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

**Mots clés :** *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.

La diffusion de ce module est liée à des accords de transfert. Notons que ce module est déjà intégré dans la plupart des codes commerciaux existants.

## 5.11. Logiciel YAMS

**Participant :** Pascal Frey [correspondant].

**Mots clés :** *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.

La diffusion de ce module est liée à des accords de transfert.

## 6. Résultats nouveaux

### 6.1. Interpolation et maillage de grilles 3-D

**Participants :** Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

Nous donnons une représentation continue d'une surface définie par une grille de points, puis nous générons un maillage surfacique en utilisant une méthode indirecte. Pour représenter la frontière d'un solide, le modèle *B-Rep* (*Boundary Representation*) est couramment utilisé. Une surface est alors définie par un ensemble de morceaux (*patches*), le plus souvent des carreaux à 4 côtés. Un moyen commode de définir un tel carreau est de fournir une grille structurée de points. Par exemple, dans le cas d'un système de CAO, cette grille est simplement l'image de points régulièrement espacés sur un domaine paramétrique rectangulaire. Une telle grille peut également provenir d'un dispositif de numérisation 3-D. Des topologies non rectangulaires peuvent aussi être rencontrées, typiquement le carreau à 3 côtés qui peut être considéré comme un cas dégénéré du précédent (l'un des côtés étant de longueur nulle).

Nous utilisons la méthode de Coons pour construire une surface passant par les sommets d'une telle grille. À partir de la représentation discrète précédente, nous obtenons ainsi une représentation continue de la surface. À cette fin, nous calculons les dérivées premières et les dérivées croisées (*twist vectors*) aux sommets, à l'aide d'un schéma de différences finies, et nous utilisons la technique de Coons pour définir une surface cubique par morceaux ayant une continuité  $C^1$  (d'aspect lisse). Cette méthode peut être appliquée à une grille de forme quelconque, pourvu qu'elle soit adaptée à un schéma de différences finies. Elle peut aussi être appliquée au cas dégénéré d'un carreau à 3 côtés, moyennant un changement de variables. La continuité de la paramétrisation dans ces deux cas permet d'utiliser ensuite notre méthode indirecte de maillage surfacique.

À titre d'exemple, la Figure 1 montre des grilles servant à modéliser un avion Falcon JJ (Dassault Aviation), un maillage géométrique (avec une tolérance de  $8^\circ$ ) et deux maillages uniformes (de tailles respectives 200 et 100).

### 6.2. Remaillage en grandes déformations

**Participants :** Patrick Laug, Houman Borouchaki [correspondant].

Nous nous intéressons au problème de remaillage d'une structure subissant de grandes déformations plastiques avec endommagement.

La mécanique non linéaire des solides et des structures a pour objet la modélisation et le calcul des structures à fortes non linéarités géométriques (transformations finies, contact unilatéral évolutif, etc) et matérielles (plasticité, viscoplasticité, écrouissage, endommagement, etc). L'objectif est de simuler numériquement le comportement d'un objet mécanique (structure) soumis à diverses sollicitations thermomécaniques plus ou moins complexes afin d'améliorer sa tenue (durée de vie), voire d'optimiser le procédé même de fabrication de l'objet. La fiabilité et la performance d'une telle simulation repose sur celle des outils théoriques (relations constitutives représentant les phénomènes physiques), numériques (algorithmes d'intégration des EDO, schémas de résolution des systèmes non-linéaires, etc) et géométriques (représentation géométrique de l'objet, discrétisation en éléments finis ou maillage, remaillage et maillage adaptatif en cours de la simulation).

Nous nous intéressons ici au problème de remaillage d'une structure subissant de grandes déformations plastiques avec endommagement. Nous avons mis en place un schéma général constitué de plusieurs étapes nécessaires à une représentation presque optimale du domaine au cours de l'évolution. Ces étapes sont essentiellement divisées en deux catégories : définition et rediscrétisation de la frontière de la pièce et remaillage adaptatif de la pièce. Dans les deux cas, on peut définir une carte de taille permettant de gouverner

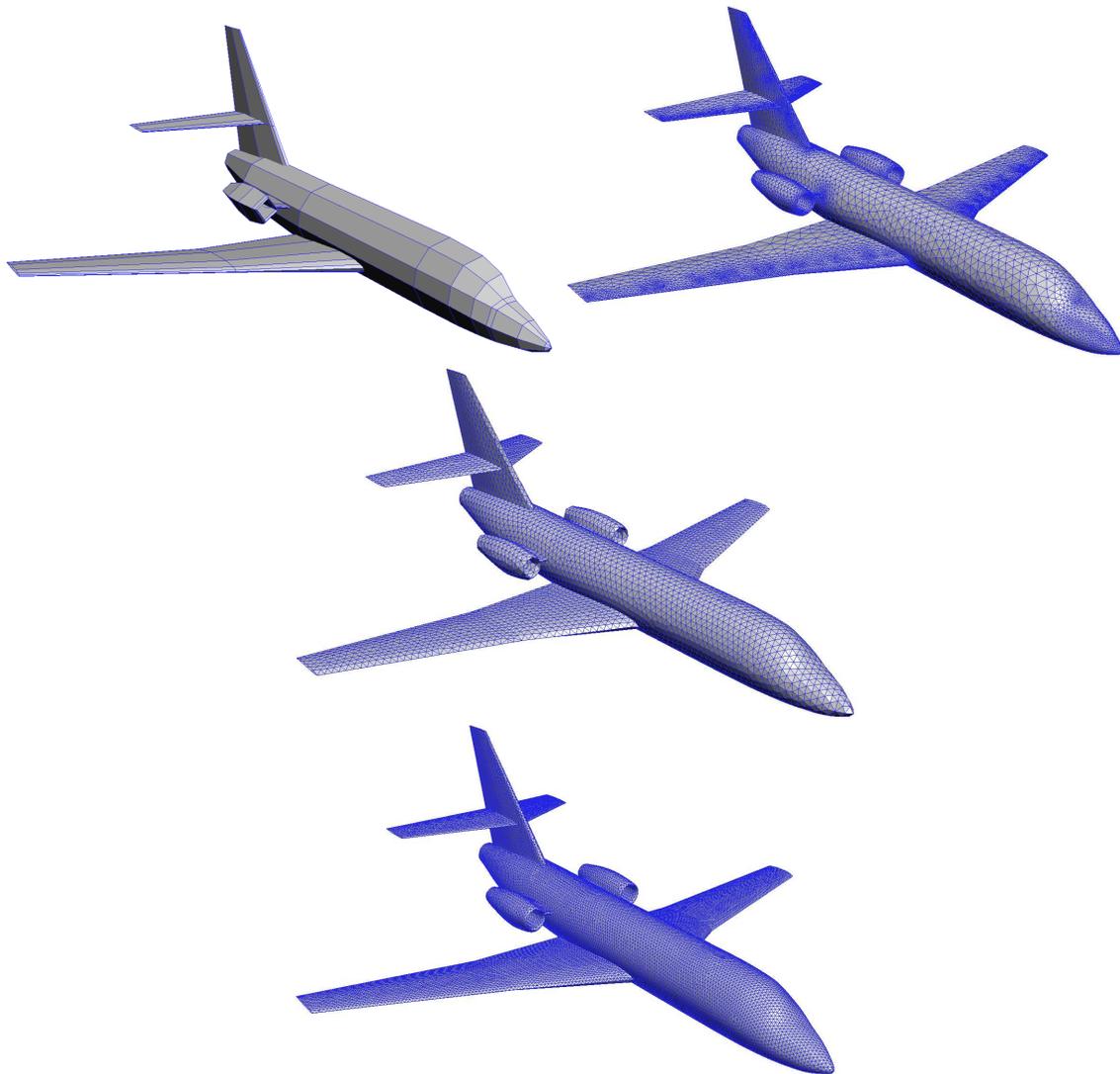


Figure 1. Falcon JJ (Dassault Aviation).

le procédé de remaillage. La première carte représente le respect de la géométrie sous-jacente à la frontière du domaine déformé et la deuxième permet d'augmenter la précision de la solution physique recherchée. En supposant que la déformation totale soit effectuée à pas de petites déformations, le remaillage peut être éventuellement appliqué à chaque itération [12].

Un exemple de découpage orthogonal, avec formation d'un copeau, est présenté en Figure 2.

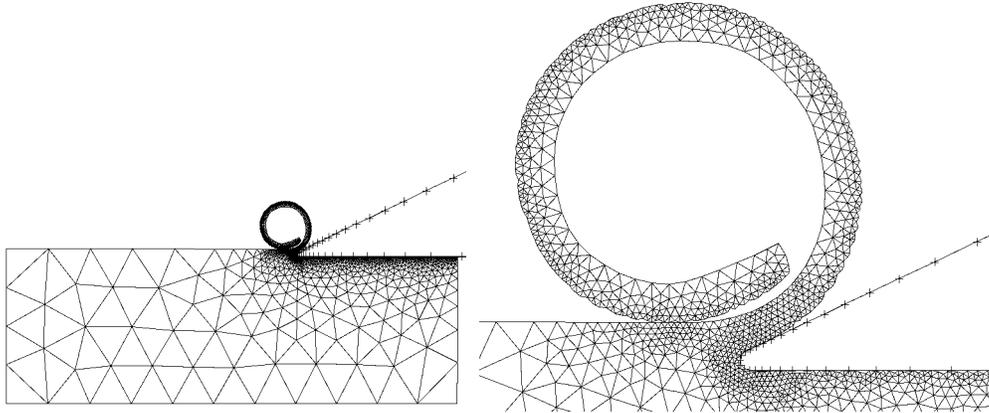


Figure 2. Procédé de découpage orthogonal (vue normale et zoom).

### 6.3. Adaptation de maillages 3D

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

**Mots clés :** *Adaptation de maillages, métriques, mécanique des fluides.*

L'objectif est de mettre en place une boucle de calcul CFD avec adaptation de maillage en 2D et 3D utilisant les outils de génération de maillages du projet, ainsi que la mise en place d'une nouvelle boucle d'adaptation pour des simulations instationnaires en 2D et 3D. 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.

On a constaté que le schéma d'adaptation « classique » n'est pas adapté à de telles simulations. En pratique, si le nombre d'adaptation reste raisonnable, la solution se diffuse lors du calcul (le maillage est en retard par rapport au phénomène). Une alternative consiste à augmenter grandement le nombre d'adaptations mais, dans ce cas, on constate que la solution numérique n'est pas « consistante en temps », c'est-à-dire, on n'obtient pas la bonne solution à un instant donné. On envisage donc le développement d'une boucle d'adaptation pour les simulations dépendant du temps.

Schématiquement, une boucle d'adaptation « classique » se divise en quatre parties centrées sur [16] :

- le calcul : résolution des équations d'Euler, dans ce cas avec le code NSCKE,
- la construction de la métrique : fournie par un estimateur d'erreur géométrique,
- l'adaptation de maillage : le but est de générer un maillage adapté à la solution à l'aide de la métrique,
- l'interpolation de la solution : la solution est interpolée sur le nouveau maillage.

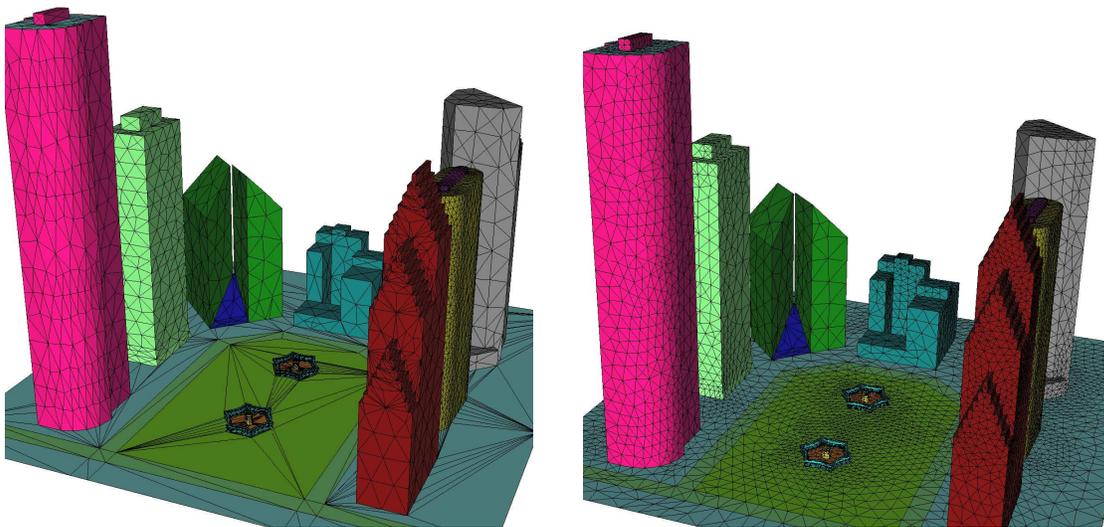


Figure 3. Maillage de référence géométrique et maillage de calcul initial.



Figure 4. Propagation d'onde non-linéaire, maillages et iso-densité aux itérations 1 (initiale) et 30 (finale).

Pour les simulations instationnaires, il est clair que si l'on veut capturer un phénomène dépendant du temps et avoir un maillage correct pour calculer la solution à un instant  $t$ , on doit prédire l'évolution du phénomène et 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.

Pour cela, on découpe l'intervalle de temps d'étude en période. Le but est d'atteindre la précision désirée pour la solution finale de chaque période à l'aide de la boucle interne, en réitérant le calcul jusqu'à convergence de la solution. Une fois la convergence atteinte, on avance en temps en passant à la période suivante. 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, [10][17]. On peut voir l'impact de la méthode sur la Figure 4.

## 6.4. Écoulements dans un bâtiment

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

**Mots clés :** *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,  $\nu$  la viscosité cinématique,  $f(x)$  est une force donnée,  $(\nabla u)_{ij} = u_{ij}$  est le gradient de  $u$ . Ces équations sont résolues dans un domaine  $\Omega \times (0, T_{NS})$ ,  $\Omega$  est un ouvert de  $R^d$  de frontière  $\partial\Omega$ , avec les conditions aux limites de Dirichlet,  $u = \omega$  sur  $\Gamma_1$  et de Neumann,  $-p + (S.n.n) = F_n$  et  $(S.n.s) = F_s$  sur  $\Gamma_2$ , 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  $u(x, 0) = u_o(x)$  avec  $\nabla \cdot u_0 = 0$  dans  $\Omega$ . 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  $\nu$  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 [25].

La Figure 5 illustre le maillage de calcul initial de surface (généralisé par YAMS) ainsi qu'une vue de l'écoulement à l'intérieur du bâtiment (lignes de courant). Le maillage de calcul volumique initial comporte 248 983 sommets, 118 193 triangles et 1 333 334 tétraèdres et a été créé par GHS3D.

## 6.5. Maillage de surfaces discrètes

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

**Mots clés :** *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

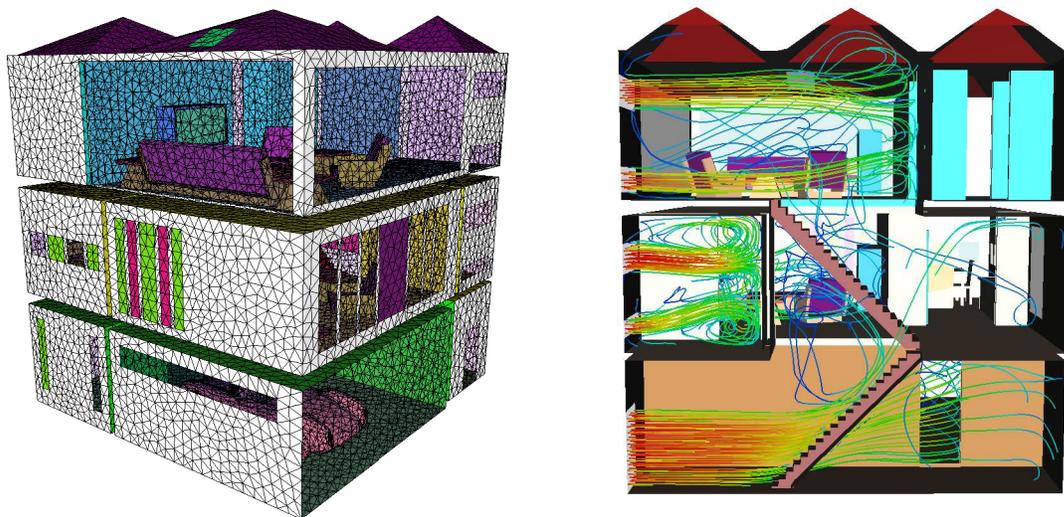


Figure 5. Exemple d'écoulement incompressible dans un bâtiment.

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). La Figure 6 illustre un exemple d'adaptation de surface discrète sur une métrique anisotrope (ici définie de manière analytique). Ces développements ont été intégrés au logiciel Yams.

## 6.6. Contraintes par partition et problème d'existence d'un maillage d'un polyèdre arbitraire

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

**Mots clés :** *existence, maillage.*

La construction d'un maillage simplicial d'un polyèdre arbitraire est un problème connu comme étant *NP*-complet. On étudie une méthode de construction qui montre l'existence d'un tel maillage et, de plus, qui n'est de complexité non polynomiale que dans le cas le pire.

Cette méthode constructive consiste à découper les arêtes et faces contraintes en ajoutant les points d'intersection de ces entités avec les faces et arêtes d'un maillage de Delaunay construit de manière classique. Ensuite, on montre que les points ainsi ajoutés peuvent être détruits ou bougés de manière à ce que le résultat contienne effectivement les contraintes initiales (*i.e.* non découpées). Outre le résultat théorique important ci-dessus, cette étude a de nombreuses applications, par exemple dans le cadre du contrat européen MAGIC-FEAT.

Les deux années dernières, l'étude a porté sur la construction d'un maillage incluant les points d'intersection puis la destruction de ces points via des suppressions d'arêtes. Le résultat était alors un maillage de surface épuré et le maillage résultant correspondant s'appuyait sur ce maillage de surface.

L'étude, cette année, s'est poursuivie sur deux aspects. Tous les points des arêtes des faces et ceux des faces ont été supprimés, en particulier, le cas des arêtes « non manifold » et celui des faces « flottantes » ont été considérés. De cette manière, les faces initiales réapparaissent. Ensuite, second point, la suite de la

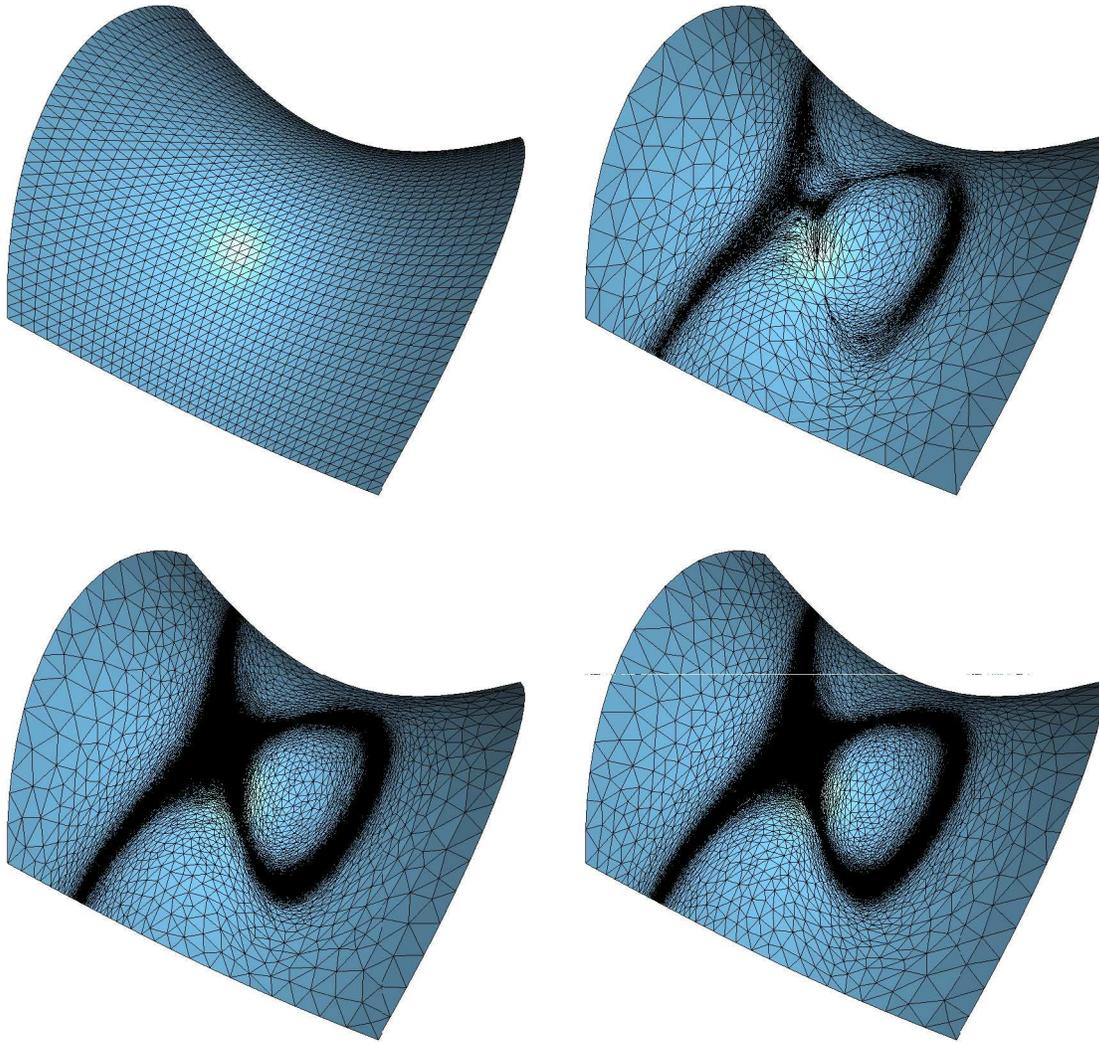


Figure 6. Exemple d'adaptation de maillage de surface à un champ analytique, maillage initial et maillages adaptés aux itérations 1, 4 et 7 et zooms partiels au voisinage du point selle.

construction du maillage a été implémentée, des points internes sont définis puis connectés puis le maillage est optimisé (comme dans un mailleur classique).

En conclusion, on dispose ainsi d'un mailleur capable de traiter des données non nécessairement de bonne qualité (pour les applications habituelles). Une suite possible serait de greffer cette méthode dans un mailleur classique, le rendant ainsi robuste au point de traiter des données piètres. Pour ce faire, la méthode serait déclenchée lorsque la méthode classique de forçage se bloque. Outre deux rapports de recherche, cette étude a fait l'objet d'un papier de titre « Ultimate robustness in meshing an arbitrary polyhedro », accepté, à paraître l'an prochain.

## 6.7. Construction de maillage anisotrope en trois dimensions

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

**Mots clés :** *maillage anisotrope, adaptation de maillage.*

La construction d'un maillage simplicial anisotrope d'un domaine arbitraire est un problème nouveau. 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.

Ce nouveau mailleur, nommé Gamanic3d, est le pendant anisotrope du mailleur Gambic3d développé auparavant (lui-même étant l'extension adaptée (isotrope) du mailleur classique Ghs3d). Il faut noter qu'il n'existe 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, une série de tests de validation a été menée sur des cas académiques et sur un cas concret, 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. 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.

Un rapport technique présente ces résultats, qualifiés de préliminaires, et montre quelques exemples d'application avec des métriques définies de façon analytique (mais utilisées de manière discrète) ou avec des métriques issues de vrais calculs en mécanique des fluides.

## 6.8. Bascules généralisées en trois dimensions

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

**Mots clés :** *maillage anisotrope, adaptation de maillage, optimisation, forçage de frontière.*

Les bascules d'arêtes sont l'outil primordial des algorithmes d'optimisation de maillages tétraédriques. On étudie ces bascules en regardant leur faisabilité, leur complexité et leurs applications. On regarde également les champs d'application des bascules anisotropes et le rôle qu'elles peuvent avoir dans le délicat problème du forçage d'une contrainte (arête ou face) dans un maillage tétraédrique.

L'étude et l'écriture du mailleur anisotrope, décrit ci-dessus, nous a amené à nous pencher plus finement sur les opérateurs de bascules d'arêtes. Il s'agit de regarder le polyèdre formé par les tétraèdres enroulés autour d'une arête et de voir si cette arête peut être supprimée (s'il existe un maillage alternatif du même polyèdre ne contenant plus cette arête), c'est le problème de réductibilité.

On donne des conditions de réductibilité, on analyse la complexité de l'opérateur de bascule, on montre qu'il n'y a pas d'autres opérateurs manipulant des faces ou des arêtes et que des combinaisons de bascules élémentaires sont équivalentes aux bascules directes.

On discute de l'usage des bascules anisotropes où le déclenchement d'une bascule est gouverné par l'optimisation d'un critère anisotrope. On montre que cette simple idée s'applique au délicat problème du forçage d'une contrainte dans un maillage tétraédrique. Un rapport technique décrit cet aspect des choses, un autre est en préparation sur les propriétés plus générales des bascules.

## 6.9. Génération automatique de maillages hexaédriques

**Participant :** Loic Maréchal.

**Mots clés :** *hexaèdres, octree, maillage.*

La génération automatique de maillages hexaédriques reste, aujourd'hui, un enjeu majeur. 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 la taille de ses triangles. 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'hexaèdres prédéfinis permet de transformer cet octree en maillage hexaédrique conforme.
2. Recherche de la frontière par pliage des hexaèdres :
  - i. Recherche des faces des hexaèdres les plus proches de la surface triangulée d'origine, ce qui constituera une frontière approchée (en marches d'escalier) du domaine à mailler.
  - ii. 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.
  - iii. Les différents sous-domaines sont énumérés et seuls ceux requis par l'utilisateur sont conservés.

Le prototype actuel butte encore sur la phase finale de déplacement des nœuds de la frontière. Le pliage d'hexaèdres à l'intérieur d'angles très aigus tout en gardant des qualités d'éléments raisonnables est complexe à réaliser.

Les points restants à améliorer concernent divers aspects relatifs à :

- une meilleure régularisation des nœuds de la frontière,
- un meilleur algorithme de pliage de la frontière,

- la possibilité de lisser localement la géométrie à mailler afin de libérer certaines configurations bloquantes.

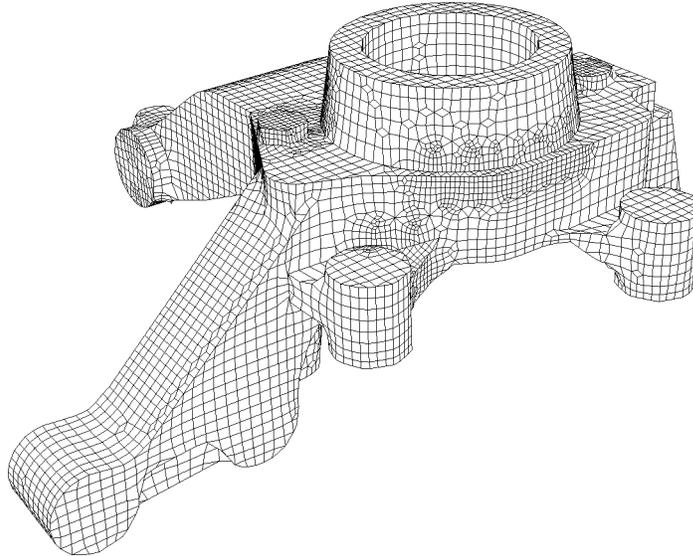


Figure 7. Exemple de maillage d'une pièce mécanique obtenu automatiquement avec le prototype d'Hexotic (31.000 hexaèdres).

## 7. Contrats industriels

### 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 mailleur hexaédrique (Hexotic) via la mise à disposition de Loic 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.

Le mailleur surfacique BLSURF 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. ALCATEL SPACE

**Participants :** P. Laug, H. Borouchaki.

Mise à disposition du mailleur bidimensionnel BL2D-V2 chez ALCATEL SPACE, société spécialisée dans le développement de satellites pour les télécommunications, la navigation, l'observation optique et radar, la météorologie et les applications scientifiques.

## 8. Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1. Actions européennes

#### 8.1.1. *Projet Magic-Feat*

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

**Mots clés :** *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 se termine à la fin de l'année.

### 8.2. Actions nationales

#### 8.2.1. *Arc VITESV*

**Participants :** P.L. George, P. Frey.

L'ARC VITESV (VISualisation Tridimensionnelle et Exploration du Système Vasculaire) s'inscrit dans le cadre d'un programme ambitieux dont le but est de mettre à la disposition du monde de la santé un outil de simulation basé sur la reconstruction de la géométrie tridimensionnelle des vaisseaux sanguins à partir de l'imagerie médicale. Cette reconstruction 3D sera associée aux simulations numériques de l'écoulement sanguin conçues comme aide à la planification thérapeutique en particulier. Le projet Gamma participe à cette action dans le cadre de la construction et de l'adaptation des maillages de surfaces et volumiques aux contraintes liés à la modélisation en mécanique des fluides. Cette ARC se termine à la fin de l'année.

#### 8.2.2. *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).

## 9. Diffusion des résultats

### 9.1. Participation à des colloques, séminaires, invitations

- *Governed automatic mesh generation, isotropic and anisotropic cases*,  
P.L. George,  
Université de Chemnitz, Germany.
- *3D adaptive control and shape design platform for unstructured meshes*,  
F. Alauzet, P.J. Frey, P.L. George, E. Leclerc, P. Sagaut and B. Mohammadi,  
40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, january, Reno, NV, USA.
- *Unstructured mesh adaptation for transient CFD problems*,  
F. Alauzet, P. Frey, P.L. George and B. Mohammadi,  
5th World Congress on Computational Mechanics, July, Vienna, Austria.
- *Automatic generation of 3D adapted meshes*,  
P.L. George, P.J. Frey and F. Alauzet, 5th World Congress on Computational Mechanics, July,  
Vienna, Austria.
- *Adaptation de maillage pour les simulations instationnaires en 3D*,  
F. Alauzet,  
14<sup>e</sup> Séminaire de Mécanique des Fluides Numérique, janvier, CEA, Saclay.
- *Unstructured Mesh Adaptation for Transient CFD Problems*,  
F. Alauzet,  
Seminary of Center for Turbulence Research, Stanford University, january, CAL, USA.
- *Adaptation de maillages 3D non-structurés en Mécaniques des Fluides. Application aux problèmes instationnaires*,  
F. Alauzet,  
Séminaire sur le maillages adaptatifs, septembre, INRIA Sophia-Antipolis.
- *Construction de métriques géométriques pour le maillage des surfaces*  
P. Frey  
Séminaire Méthodes numériques du traitement d'images, Université Paris VI, avril.
- *Métriques anisotropes et maillage des surfaces discrètes*,  
P. Frey,  
Journée d'étude : Imagerie et maillages déformables, INSA, Lyon.
- *Anisotropic surface meshing using discrete metrics*,  
P. Frey,  
Workshop on Anisotropic grids : generation, adaption and error estimation, Dept. Math., Milan,  
Italy.
- *Curve and surface meshing*  
P.L. George, P.J. Frey, P. Laug and H. Borouchaki,  
5th International Conference on Curves and Surfaces, Saint Malo, France, juillet.
- *Maillage iso et anisotrope contrôlé en dimension 3*,  
P.L. George,  
Séminaire sur le maillages adaptatifs, septembre, INRIA Sophia-Antipolis.
- *Simplification of terrains by minimization of the local deformation*  
P. Frey,  
5th International Conference on Curves and Surfaces, Saint Malo, France, juillet.
- *Maillages gouvernés de surfaces discrettes. Application a la simulation numerique en mecanique des fluides*,  
P. Frey,  
INRIA, Sophia Antipolis, mai.

- *Adaptation de maillages et simulation numérique, un enjeu pour la visualisation scientifique*, P. Frey, Journées d'étude sur la visualisation scientifique, CINES, Montpellier, oct.
- *Mesh adaptation in biomedical applications*, P. Frey, MS4CMS'02, INRIA-Rocquencourt, nov.
- *Maillages surfaciques et mobiles*, P. Laug, Séminaire à l'INRIA Sophia-Antipolis, mai 2002.
- *Remeshing process in large deformation - Application to 2D structure forming*, P. Laug and H. Borouchaki, 8th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulation, Hawaii, USA, June 2002 (et 5th International Conference on Curves and Surfaces, Saint Malo, France, juillet 2002).

## 9.2. Enseignement

- P. Laug donne au Pôle Universitaire Léonard de Vinci le cours *Fortran 90/95 pour le calcul scientifique*.
- P. Frey donne un cours sur les méthodes de maillages à l'école doctorale de l'Université Paris XI (Orsay).
- F. Alauzet donne à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines des Travaux Pratiques en Mathématiques avec Maple.

# 10. Bibliographie

## Bibliographie de référence

- [1] H. BOROUCHAKI, P. GEORGE, F. HECHT, P. LAUG, E. SALTEL. *Delaunay mesh generation governed by metric specifications. Part 1 : Algorithms*. in « Finite Elements in Analysis and Design », volume 25, 1997, pages 61-83.
- [2] H. BOROUCHAKI, P. GEORGE, B. MOHAMMADI. *Delaunay mesh generation governed by metric specifications. Part 2 : Application examples*. in « Finite Elements in Analysis and Design », volume 25, 1997, pages 85-109.
- [3] P. FREY, P. GEORGE. *Meshing. Applications to Finite Elements*. Hermès Science Publications, Paris, 2000.
- [4] P. FREY, P. GEORGE. *Maillages. Applications aux éléments finis*. Hermès Science Publications, Paris, 1999.
- [5] P. GEORGE, H. BOROUCHAKI. *Triangulation de Delaunay et maillage. Applications aux éléments finis*. Hermès Science Publications, Paris, 1997.
- [6] P. GEORGE, H. BOROUCHAKI. *Delaunay triangulation and meshing. Application to finite elements*. Hermès Science Publications, Paris, 1998.
- [7] P. GEORGE. *Génération automatique de maillages. Applications aux méthodes d'éléments finis*. volume RMA 16, Masson, 1991.

- [8] P. GEORGE. *Improvement on Delaunay based 3D automatic mesh generator*. in « Finite Elements in Analysis and Design », volume 25, 1997, pages 297-317.
- [9] P. GEORGE, F. HECHT, E. SALTEL. *Automatic mesh generator with specified boundary*. in « Comput. Methods Appl. Mech. Engrg », volume 92, 1991, pages 269-288.

### Articles et chapitres de livre

- [10] A. ALAUZET, P. FREY, B. MOHAMMADI. *Adaptation de maillages non structurés pour des problèmes instationnaires..* in « C. R. Acad. Sci. Paris », volume Ser. I 335 773-778, 2002.
- [11] H. BOROUCAKI, A. CHEROUAT, P. LAUG, K. SAANOUNI. *Adaptive remeshing for ductile fracture prediction in metal forming*. in « C. R. Acad. Sci. Paris », 2002, t. 330, Série II b, pp. 709-716.
- [12] A. BOROUCAKI, K. SAANOUNI, P. LAUG. *Remaillage en grandes déformations. Applications à la mise en forme de structures 2D..* in « Revue Européenne des éléments Finis », volume 11, 2002, no 1, pp. 57-79.
- [13] P. FREY, H. BOROUCAKI. *Simplification des cartes géographiques par minimisation de la déformation locale*. in « C. R. Acad. Sci. Paris », 2002, t. 334, Série I, pp. 227-232.
- [14] P. LAUG, H. BOROUCAKI. *Molecular Surface Modeling and Meshing*. in « Engineering with Computers », 2002, vol. 18, pp. 199-210.
- [15] J. VILLARD, H. BOROUCAKI, D. CHAPELLE. *Simulation du drapé des tissus par maillages adaptatifs*. in « C. R. Acad. Sci. Paris », 2002, t. 335, Série I, pp. 561-566.

### Communications à des congrès, colloques, etc.

- [16] F. ALAUZET, P. FREY, P. GEORGE, E. LECLERC, P. SAGAUT, B. MOHAMMADI. *3D adaptive control and shape design platform for unstructured meshes*. in « AIAA-2002-0592 », 2002.
- [17] F. ALAUZET, P. FREY, P. GEORGE, B. MOHAMMADI. *Unstructured mesh adaptation for transient CFD problems*. in « 5th WCCM », 2002.
- [18] H. BOROUCAKI, P. LAUG, A. CHEROUAT, K. SAANOUNI. *Remeshing process in large deformation - Applications to 2D structures forming*. in « 8th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulation », 2002, Hawaii, pp. 549-560, Jun. 2002.
- [19] A. CHEROUAT, H. BOROUCAKI, P. LAUG, K. SAANOUNI, J. MARIAGE. *An efficient Remeshing Technique in Analysis of Large plastic Deformation*. in « The fifth International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming process », 2002, Jeju Island, Korea, vol. 1, pp. 349-354, Oct. 2002.
- [20] A. CHEROUAT, H. BOROUCAKI, K. SAANOUNI, P. LAUG. *Schéma adaptatif en mécanique des structures : application à la mise en forme des matériaux*. in « Les quatrième Journées Scientifiques et Techniques en Mécaniques et Matériaux (JSTMM-2002 : Les procédés de formage, réalité et simulation) », 2002, Monastir Tunisie, Oct. 2002.

- [21] P. FREY, H. BOROUCAKI. *Simplification of terrains by minimization of the local deformation*. in « Fifth International Conference on Curves and Surfaces », 2002, Saint-Malo, Jun. 2002.
- [22] P. FREY. *Adaptation de maillages et simulation numérique, un enjeu pour la visualisation scientifique*. in « Journées d'étude sur la visualisation scientifique, CINES », volume octv., 2002.
- [23] P. FREY. *Mesh adaptation in biomedical applications*. in « MS4CMS'02 », volume nov., 2002.
- [24] P. GEORGE, P. FREY, F. ALAUZET. *Automatic generation of 3D adapted meshes*. in « 5th WCCM », 2002.

## Rapports de recherche et publications internes

- [25] C. DOBRZYNSKI. *Calculs sur l'air conditionné*. Rapport de stage de DESS Analyse Numérique, Université Paris VI, 2002.
- [26] P. GEORGE, H. BOROUCAKI. *Premières expériences de maillage automatique par une méthode de Delaunay anisotrope en trois dimensions*. Rapport Technique, numéro 0272, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rt-0272.html>.
- [27] P. GEORGE, H. BOROUCAKI, E. SALTEL. *Maillage simplicial d'un polyèdre arbitraire. Partie I : Existence et coût*. Rapport de Recherche, numéro 4397, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4397.html>.
- [28] P. GEORGE. *Sur une bascule tridimensionnelle anisotrope et ses applications*. Rapport Technique, numéro 0273, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rt-0273.html>.
- [29] H. S. E. GEORGE. *Maillage simplicial d'un polyèdre arbitraire. Partie II : Construction et exemples*. Rapport de Recherche, numéro 4398, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4398.html>.

## Bibliographie générale

- [30] J. BOISSONNAT, M. YVINEC. *Géométrie algorithmique*. Ediscience, 1995.
- [31] P. G. CIARLET. *Basic Error Estimates for Elliptic Problems*. volume II, Ciarlet, P. G. and Lions, J. L., North Holland, 1991.
- [32] P. FREY, P. GEORGE. *Maillages. Applications aux éléments finis*. Hermès Science Publications, Paris, 1999.
- [33] P. GEORGE, H. BOROUCAKI. *Triangulation de Delaunay et maillage. Applications aux éléments finis*. Hermès, 1997.
- [34] A. GEORGE. *Computer implementation of the finite element method*. thèse de doctorat, Dep. of Computer Science, Stanford, 1971.
- [35] R. LOHNER. *Progress in grid generation via the advancing front technique*. in « Engineering with computers. », volume 12, 1996, pages 186-210.

- [36] F. PREPARATA, M. SHAMOS. *Computational geometry, an introduction*. Springer-Verlag, 1985.
- [37] M. S. SHEPHARD, M. K. GEORGES. *Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Finite Octree Technique*. in « Int. J. Numer. Methods Eng. », numéro 4, volume 32, 1991, pages 709-749.
- [38] R. VERFURTH. *A review of a posteriori error estimation and adaptive refinement techniques*. Wiley-Teubner, 1996.