



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Project-Team GAMMA3

*Automatic mesh generation and advanced
methods*

Paris - Rocquencourt

Theme : Computational models and simulation

Activity
R *eport*

2010

Table of contents

1. Team	1
2. Overall Objectives	1
3. Scientific Foundations	2
3.1. Fondation 1	2
3.2. Méthodes de génération maillage	2
3.2.1. Méthode de type Delaunay	2
3.2.2. Méthode frontale	3
3.2.3. Autres méthodes	3
3.2.4. Géométrie algorithmique	3
3.3. Méthodes d'adaptation de maillage	3
3.4. Définition géométrique	4
3.4.1. Surfaces analytiques et discrètes	4
3.4.2. Analyse d'une géométrie	4
3.4.3. Structures de données	4
4. Application Domains	4
4.1. Panorama	4
4.2. E.D.P. et éléments ou volumes finis	5
4.3. E.D.P. et adaptation	5
4.4. Maillage des surfaces	5
5. Software	5
5.1. Introduction	5
5.2. Logiciel BL2D-V2	5
5.3. Logiciel BLSURF-V3	6
5.4. Logiciel GAMHIC3D	6
5.5. Logiciel GHS3D-V3	7
5.6. Logiciel INTERPOL	7
5.7. Logiciel METRIX	7
5.8. Logiciel SHRIMP	7
5.9. Logiciel WOLF	7
6. New Results	7
6.1. Continuous mesh theory	7
6.2. Multi-scale anisotropic mesh adaptation for unsteady problems	8
6.3. A changing-topology ALE numerical scheme	8
6.4. Goal-oriented anisotropic mesh adaptation	8
6.5. Construction de maillage de degré 2	8
6.6. Surface meshing	8
6.7. Numerical modeling of nanostructured materials	8
6.8. Geometric Error Estimation	9
6.9. Parallel CAD surface meshing	9
6.10. Génération de maillages hexaédriques : Hexotic	9
6.11. Optimisation multithreads de maillages tétraédriques	10
6.12. Parallélisation de codes : la librairie LP3	10
6.13. Applications du maillage à la cryptographie	10
6.14. Applications du maillage à l'électromagnétisme et modélisation multi-physiques	10
6.15. Mise au point de méthodes de remaillages adaptatifs surfacique 3D dans le cadre des simulations numériques de mise en forme des structures minces	11
6.16. Mise au point de méthodes de remaillages adaptatifs 3D pour le formage incrémental de tôles minces	11
6.17. Remaillage hexaédrique adaptatif	11

7. Contracts and Grants with Industry	11
8. Other Grants and Activities	11
8.1. Regional Initiatives	11
8.2. European Initiatives	12
8.3. International Initiatives	12
8.4. Enseignement	12
9. Bibliography	12

1. Team

Research Scientists

Paul Louis George [Team leader, responsable scientifique, Senior Researcher]
Patrick Laug [Responsable permanent, Senior Researcher, HdR]
Frédéric Alauzet [Junior Researcher]
Adrien Loseille [Junior Researcher]

Faculty Members

Houman Borouchaki [Professeur, Université de Technologie de Troyes, HdR]
Abel Cherouat [Professeur, Université de Technologie de Troyes, HdR]
Dominique Barchiesi [Professeur, Université de Technologie de Troyes, HdR]
Thomas Grosjes [Maître de conférences, Université de Technologie de Troyes, HdR]
Laurence Moreau [Maître de conférences, Université de Technologie de Troyes]

Technical Staff

Dominique Moreau [Ingénieur Expert, Université de Technologie de Troyes]
Julien Castelneau [Ingénieur Expert]
Loïc Maréchal [Ingénieur Expert]

PhD Students

Guillaume Dufay [Université de Technologie de Troyes]
Rémi Figueredo [Université de Technologie de Troyes]
Mickael François [Université de Technologie de Troyes]
Florent Ilcyszyn [Université de Technologie de Troyes]
Sameh Kessentini [Université de Technologie de Troyes]
Estelle Mbinky [Université Paris 6]
Thibaud Mouton [Université de Technologie de Troyes]
Géraldine Olivier [Université Paris 6]
Longmin Ran [Université de Technologie de Troyes]
Faouzi Slimani [Université de Technologie de Troyes]
Rémi Slysz [Université de Technologie de Troyes]
Brahim Yahiaoui [Université de Technologie de Troyes]
Jie Zhang [Université de Technologie de Troyes]

Visiting Scientist

Marco Picasso [Professeur, EPFL, visiteur de août 2009 à février 2010]

Administrative Assistant

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

2. Overall Objectives

2.1. Introduction

Une branche importante des sciences de l'ingénieur s'intéresse aux calculs des solutions d'équations aux dérivées partielles très variées (en mécanique du solide, en mécanique des fluides, en modélisation de problèmes thermiques, ...) par la méthode des éléments ou des volumes finis. Ces méthodes utilisent comme support spatial des calculs un maillage du domaine sur lequel les équations sont formulées. Par suite, les algorithmes (de construction) de maillages occupent un rôle important dans toute simulation par la méthode des éléments ou des volumes finis d'un problème modélisé en équations aux dérivées partielles. En particulier, la précision, voire la validité, des solutions calculées est liée aux propriétés du maillage utilisé [52].

L'équipe-projet GAMMA3 a été créé en 2010 à la suite du projet GAMMA. L'équipe est bilocalisée avec une partie à l'UTT (Troyes) et l'autre à Rocquencourt. 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 les méthodes d'éléments ou de volumes finis. Sont également étudiés les aspects de modélisation géométrique, de post-traitement et de visualisation des résultats issus de tels calculs [53].

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 également à s'intéresser à l'aspect multi-cœurs au niveau des algorithmes de maillages proprement dits.

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

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

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

Les objectifs du projet GAMMA3 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 pour ne citer qu'un seul exemple).

3. Scientific Foundations

3.1. Fondation 1

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, néanmoins 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, au moins

au niveau du codage), 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 [54].

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 [55]. C'est l'une des toutes premières méthodes capables de traiter des géométries arbitraires. 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 [56], 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 critère (ou test d'arrêt). Les cellules terminales servent alors de support à la création des éléments du maillage [58].

3.2.4. Géométrie algorithmique

La géométrie algorithmique est apparue, en tant que discipline, vers le milieu des années 80, [57], puis s'est développée au fil des ans, voir par exemple [51]. Dans certains de ses aspects elle semble traiter de sujets assez voisins de ceux rencontrés en maillage, pensons ici aux triangulations. Avec un peu de recul, force est de nuancer le propos. En effet ses apports ont été, sont et restent sans réel intérêt au sens où les problématiques envisagées sont par trop éloignées des problèmes concrets. Il n'en demeure pas moins vrai que l'on persiste à regarder ce que cette discipline pourrait éventuellement apporter aux méthodes et techniques qui nous préoccupent.

3.3. Méthodes d'adaptation de maillage

Dans une simulation numérique par des méthodes d'éléments ou de volumes finis, la qualité en forme et en taille des éléments du maillage support est importante, en raison de son effet sur la précision des solutions numériques et sur la convergence du schéma numérique utilisé lors du calcul [52], [59]. 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.

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

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). Notons que ceci nécessite d'investir dans les solveurs, direction nouvelle dans le projet.

3.4. Définition géométrique

3.4.1. Surfaces analytiques et discrètes

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

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

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

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

3.4.2. Analyse d'une géométrie

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

3.4.3. Structures de données

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

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

4. Application Domains

4.1. Panorama

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 maillages automatiques de tels volumes utilisent, en général, le maillage de leur frontière comme donnée. De plus, la qualité de ce maillage de surface conditionne, dans une large mesure, la qualité du maillage tridimensionnel construit.

5. Software

5.1. Introduction

Dans la thématique où nous nous situons, ne pas développer de logiciels serait une aberration. De même, ne pas les diffuser serait choquant.

Par suite, la diffusion des logiciels issus des travaux de recherche du projet GAMMA3 est un point saillant de notre activité. Elle est effectuée, à ce jour, de deux façons, soit via des accords directs avec des partenaires académiques ou industriels soit via des distributeurs. Ainsi, l'Inria et Distene, en collaboration étroite, proposent différentes solutions permettant des mises à disposition, des évaluations, des transferts de technologie ou des ventes (sous des formes adaptées).

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

<http://www-roc.inria.fr/gamma/gamma/Logiciels/index.fr.html>

Table 1. Tableau des logiciels et des modules.

Nom	Dimension	Disponibilité
BL2D-V2	2D	transfert
BLSURF-V3	3D surfacique	transfert
GAMANIC3D	3D volumique	transfert
GAMHIC3D	3D volumique	transfert
GHS3D	3D volumique	transfert
INTERPOL	2D/3D	transfert
METRIX	2D/3D	transfert
SHRIMP	2D/3D	transfert
WOLF	2D/3D	transfert

5.2. Logiciel BL2D-V2

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

<http://www-roc.inria.fr/gamma/Patrick.Laug/logiciels/bl2d-v2/INDEX.html>

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

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

5.3. Logiciel BLSURF-V3

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

<http://www-roc.inria.fr/gamma/Patrick.Laug/logiciels/blsurf/INDEX.html>

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

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

La version V3 de BLSURF, totalement écrite en C afin de faciliter sa portabilité, comprend les fonctionnalités suivantes : transmission des données par mémoire ou par fichier, sur option de l'utilisateur ; traitement robuste de la récupération de la topologie (soudage des différents carreaux) ; détermination par continuité d'une dérivée bien définie pour les points singuliers ; intégration complète dans BLSURF du module de simplification DECIMESH (sans génération d'un fichier intermédiaire de maillage) ; projection des sommets du maillage simplifié sur la surface exacte (les sommets du maillage généré par DECIMESH sont proches de cette surface mais généralement n'en font pas partie) ; construction d'un support géométrique pour une visualisation rapide de la surface (support également utilisé pour la projection de points sur la surface) ; maillage en quadrilatères (sans décimation).

5.4. Logiciel GAMHIC3D

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

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

GAMANIC3D est le pendant *anisotrope* de GAMHIC3D.

5.5. Logiciel GHS3D-V3

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

GHS3D, alias TetMesh-GHS3D (aussi dit “le ghs”), est un module de maillage automatique en tétraèdres d’un domaine défini par une discrétisation (en principe en triangles) de sa surface.

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

5.6. Logiciel INTERPOL

Participant: Frédéric Alauzet [correspondant].

Interpol est un logiciel qui permet de projeter (ou transférer) très rapidement des champs de solutions d’un maillage sur un autre sur des domaines coïncidents ou non-coïncidents. Il autorise différents schémas d’interpolation: polynomial ou conservatif. Il permet aussi d’extraire des solutions sur des droites dans le domaine de calcul.

5.7. Logiciel METRIX

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Adrien Loseille [George Mason University, VA, USA].

Metrix est un logiciel qui construit des champs de métriques à partir de solutions ou de maillages et effectue des opérations sur les métriques : gradation, lissage et intersection. Il contient les estimateurs d’erreur pour l’erreur d’interpolation, pour les interfaces et ciblés à une fonctionnelle.

5.8. Logiciel SHRIMP

Participants: Frédéric Alauzet [correspondant], Adrien Loseille [George Mason University, VA, USA].

Shrimp est un re-numéroteur et partitionneur de domaine rapide basé sur les courbes de Hilbert qui est particulièrement efficace pour les maillages adaptés anisotropes. Il est utilisé pour minimiser les défauts de cache et pour le calcul parallèle. Il permet aussi de faire de l’adaptation de maillage en parallèle avec GAMHIC3D et GAMANIC3D.

5.9. Logiciel WOLF

Participant: Frédéric Alauzet [correspondant].

Wolf est un solveur mixte Elements-Volumes Finis qui résout les équations d’Euler et de Navier-Stokes compressibles en 2D et 3D sur des maillages simpliciaux. Il utilise une parallélisation innovante basée sur les p-thread pour les machines à mémoire partagée. Il contient aussi un module permettant de calculer le bang sonique d’un mobile dans l’atmosphère.

6. New Results

6.1. Continuous mesh theory

Participants: Adrien Loseille, Frédéric Alauzet [correspondant].

The continuous mesh theoretical framework developed during the previous years has been achieved and published in SIAM Journal in Numerical Analysis [22], [23]

6.2. Multi-scale anisotropic mesh adaptation for unsteady problems

Participants: Géraldine Olivier, Frédéric Alauzet [correspondant].

We focused on the extension of the multi-scale anisotropic mesh adaptation to unsteady flows. It leads to the development of a global fixed point mesh adaptation algorithm and space-time error estimates. Moreover, the mesh adaptation methodology has been extended to the case of moving meshes simulations [29], [30].

6.3. A changing-topology ALE numerical scheme

Participants: Géraldine Olivier, Frédéric Alauzet [correspondant].

The main difficulty arising in numerical simulations with moving geometries is to handle the displacement of the domain boundaries, *i.e.*, the moving bodies. Only vertices displacement is not sufficient to achieve complex movement such as shear. We proved that the use of edge swapping allows us to achieve such complex displacement. We therefore developed an ALE formulation of this topological mesh modification to preserve the solver accuracy and convergence order [46], [47].

6.4. Goal-oriented anisotropic mesh adaptation

Participants: Alain Dervieux, Frédéric Alauzet [correspondant], Adrien Loseille, Marco Picasso.

A priori and *a posteriori* goal-oriented error estimate have been derived and applied to Poisson equations [27] and compressible Euler system [24]. We have also extended our previous work on goal-oriented mesh adaptation to time dependent simulations [33]. This requires to set up a global fixed point algorithm in which state and adjoint variables problems are solved. The adjoint problem is solved backward in time.

6.5. Construction de maillage de degré 2

Participants: Houman Borouchaki, Paul Louis George [correspondant], Patrick Laug.

Le but est de construire un maillage P2 dans le cas plan, surfacique ou volumique. Considéré comme trivial, ce problème est en fait nettement plus compliqué et les références sont quasiment inexistantes. Ce travail s'emploie à trouver les bases théoriques relatives au P2, validité, notion de qualité, ..., puis à inventer les algorithmes à mettre en œuvre pour la construction effective [36].

6.6. Surface meshing

Participant: Patrick Laug [correspondant].

A synthesis book [50] describes different contributions concerning quality mesh generation for numerical simulation, namely: curve discretization, planar domain meshing, parametric and discrete surface meshing.

In particular, in many computational processes involving the finite element method, the domain to be meshed is defined by a set of contiguous parametric surfaces (this is the case for instance in CAD environments). In this context, the mesh must satisfy two fundamental conditions, namely: approximate the surface as accurately as possible, and contain elements having the highest possible quality. In paper [21], definitions are given to measure distance deviations (denoted by A_0) and angle deviations (A_1) between the mesh and the exact surface. Also, isotropic or anisotropic sizing functions are specified for generating quality meshes while bounding A_0 and/or A_1 deviations. These size specifications have been tested on many industrial models, and the meshes generated show the pertinency of this approach.

6.7. Numerical modeling of nanostructured materials

Participants: Houman Borouchaki, Patrick Laug [correspondant].

A granular structure is usually modeled by a parallelepiped containing spherical balls in three dimensions or by a rectangle filled with disks in two dimensions. These grains (spherical balls or disks) are disjoint and their size correspond to a size distribution determined by experiments. In paper [9], we consider the geometrical modeling and the meshing of these structures. To define the repartition of disjoint grains, we propose a new constructive algorithm based on an advancing-front approach. Often, the use of an advancing-front algorithm leads to a heterogeneity of the local density in the generated structure. In order to homogenize this density, we propose an optimization method based on local grain relocations. Furthermore, we introduce a method to transform spherical balls into polyhedral cells similar to realistic grain shapes.

To generate quality meshes of granular models with, either spherical balls (disks) or polyhedral (polygonal) cells, an adaptive scheme is proposed. The mesh generation method is a combined advancing front-Delaunay approach governed by a metric field. The metric specification is based on the geometry and the proximity of grains.

6.8. Geometric Error Estimation

Participants: Houman Borouchaki [correspondant], Patrick Laug.

An essential prerequisite for the numerical finite element simulation of physical problems expressed in terms of PDEs is the construction of an adequate mesh of the domain. This first stage, which usually involves a fully automatic mesh generation method, is then followed by a computational step. One can show that the quality of the solution strongly depends on the shape quality of the mesh of the domain. At the second stage, the numerical solution obtained with the initial mesh is generally analyzed using an appropriate a posteriori error estimator which, based on the quality of the solution, indicates whether or not the solution is accurate. The quality of the solution is closely related to how well the mesh corresponds to the underlying physical phenomenon, which can be quantified by the element sizes of the mesh. An a posteriori error estimation based on the interpolation error depending on the Hessian of the solution seems to be well adapted to the purpose of adaptive meshing. In paper [34], we propose a new interpolation error estimation based on the local deformation of the Cartesian surface representing the solution. This methodology is generally used in the context of surface meshing. In our example, the proposed methodology is applied to minimize the interpolation error on an image whose grey level is considered as being the solution.

This paper has been awarded as one of the top papers presented in the conference.

6.9. Parallel CAD surface meshing

Participants: Patrick Laug [correspondant], Houman Borouchaki.

A wide range of surfaces can be defined by means of composite parametric surfaces as is the case for most CAD modelers. There are, essentially, two approaches to meshing parametric surfaces: direct and indirect. Popular direct methods include the octree-based method, the advancing-front-based method and the paving-based method working directly in the tridimensional space. The indirect approach consists in meshing the parametric domain and mapping the resulting mesh onto the surface. Using the latter approach, we have proposed a general meshing scheme which consists in discretizing each interface curve and meshing each parametric domain according to the above boundary discretizations. Complex surfaces such as a car engine or a complete aircraft are composed of thousands of patches, and meshing these surfaces using the above sequential scheme can be inefficient. We propose a parallel version of the general meshing scheme while naturally balancing the load to each processor. [43]

6.10. Génération de maillages hexaédriques : Hexotic

Participant: Loïc Maréchal [correspondant].

Le projet Hexotic vise à mettre au point un algorithme et un logiciel de génération automatique de maillages hexaédriques non-structurés. Il a été réalisé dans le cadre des projets IOLS et EHPOC, le tout au sein du pôle de compétitivité Sytem@tic. Il est actuellement maintenu dans le cadre l'une coopération ILAB entre l'INRIA et Distene.

Les développements apportés à la méthode concernent :

- l'intégration de la méthode permettant une meilleure représentation des angles aigus par raffinement au sein même du maillage. La gestion des angles aigus est désormais transparente pour l'utilisateur.
- le développement d'une version partiellement programmée en langage OpenCL, pour l'utilisation sur GPU (Graphic Processing Unit) de différentes cartes graphiques (Nvidia et ATI). Seule l'optimisation du maillage par bouger de points a été portée sur GPU car ces processeurs ne sont adaptés qu'aux calculs vectoriels et peu d'algorithmes s'y prêtent. Le résultat est mitigé : la vitesse étant équivalente entre un CPU et GPU d'ordinateur portable (GeForce 330m contre Intel Core i7 m620). Le seul réel gain est en terme de prix et de consommation électrique, tous deux en faveur du GPU.

6.11. Optimisation multithreads de maillages tétraédriques

Participant: Loïc Maréchal [correspondant].

Le but est de commencer à paralléliser par multithreads certaines parties du générateur de maillages tétraédrique GHS3D. Pour cette année, nous nous sommes concentrés sur l'optimisation du maillage par bouger de points et par bascules d'arrêtes.

Une excellente accélération a été obtenue (x7,5 sur une machine à 8 cœurs), mais il reste la gestion des slivers (éléments dégénérés) à paralléliser, or celle-ci consomme une part très importante du temps d'optimisation, rendant le gain global très modeste. Un algorithme de suppression des slivers parallélisé est prévu pour 2011.

6.12. Parallélisation de codes : la librairie LP3

Participant: Loïc Maréchal [correspondant].

Le but de la librairie LP3 est de fournir une API aux développeurs de solveurs ou de maillages dans le domaine du calcul scientifique afin de paralléliser leurs codes de manière simple, transparente et rapide.

Cette librairie est basée sur les threads au standard posix (pthreads) et permet donc d'exploiter les machines multi-processeurs et les processeurs multi-cœurs à mémoire partagée sur la plupart des plateformes actuelles (Linux, Mac Os X, Unix, Windows). La version 3 apporte deux nouveautés :

- une fonction de renumérotation de l'espace selon une courbe de Hilbert a été intégrée à la librairie. La fonction est elle-même parallélisée afin de réduire le surcoût de la renumérotation au minimum. Les maillages ainsi renumérotés présentent une grande proximité en mémoire des éléments et des nœuds, ce qui permet de minimiser les défauts de caches et surtout de considérablement favoriser le traitement en parallèle de plusieurs partitions du maillage.
- la gestion de threads autonomes a été ajoutée afin de permettre le lancement de tâches gérées explicitement par l'utilisateur pour faire du parallélisme asymétrique.

6.13. Applications du maillage à la cryptographie

Participants: Thomas Grosgees [correspondant], Dominique Barchiesi, Mickael François.

Développement de nouveaux procédés de génération de clés de chiffrement, dits "exotiques", basé sur des processus physiques, multi-échelles, multi-domaines assurant un niveau élevé de sécurité. Application du maillage adaptatif au calcul du couplage lumière-matériaux avec contrôle d'erreur. Application du maillage avec estimateur d'erreur sur l'entropie du système. Étude (locale) de la réduction d'entropie des clés tout au long de la chaîne de création et étude (globale) de l'entropie de l'espace des clés générées, à partir de tests statistiques [16], [35], [14].

6.14. Applications du maillage à l'électromagnétisme et modélisation multi-physiques

Participants: Dominique Barchiesi [correspondant], Thomas Grosgees, Houman Borouchaki, Sameh Kessentini.

Développement de modèles et méthodes numériques en spectroscopie et électromagnétisme. Optimisation et adaptation aux études de l'interaction lumière-matière aux échelles nano-micro-macro. Applications des maillages adaptatifs et optimisés avec estimateur d'erreur sur le champ physique (intensité électrique et/ou magnétique). Études des couplages multi-physique (électro-thermique dans les nano-mesostructures), [17], [11], [10], [31], [32], [8].

6.15. Mise au point de méthodes de remaillages adaptatifs surfacique 3D dans le cadre des simulations numériques de mise en forme des structures minces

Participants: Laurence Moreau, Abel Cherouat [correspondant], Houman Borouchaki.

Développement de méthodes de remaillage adaptatif surfacique 3D, développement de méthodes d'interpolation et transfert des champs, interfaçage avec le code EF Abaqus et application sur des exemples concrets de mise en forme de structure métalliques et composites, [15], [37], [38], [13], [12].

6.16. Mise au point de méthodes de remaillages adaptatifs 3D pour le formage incrémental de tôles minces

Participants: Laurence Moreau [correspondant], Abel Cherouat, Houman Borouchaki.

Développement d'une méthode de remaillage adaptatif surfacique 3D permettant de raffiner de déraffiner le maillage localement autour de l'outil sphérique au cours des simulations numériques de formage incrémental, [39].

6.17. Remaillage hexaédrique adaptatif

Participants: Dominique Moreau [correspondant], Houman Borouchaki, Loïc Maréchal.

Méthodologie du raffinement conforme de maillages hexaédriques et intégration dans le schéma d'un calcul adaptatif. Développement d'un code de remaillage (par raffinement) hexaédrique adaptatif.

7. Contracts and Grants with Industry

7.1. Contracts with Industry

- ANDRA, maillages adaptatifs hexaédriques appliqués à une alvéole de stockage.
- Dassault Aviation, maillage surfacique.
- Dassault Aviation, adaptation de maillage pour Navier-Stokes.
- ILAB, Distène - GAMMA3.
- LECTRA, maillage surfacique.
- SNECMA groupe SAFRAN, maillage plan.

8. Other Grants and Activities

8.1. Regional Initiatives

Participants: Laurence Moreau [correspondant], Houman Borouchaki, Abel Cherouat [correspondant].

Projet État-Région Champagne/Ardennes : CPER " BRAMMS : Buste-Reconstruction 3D, Acquisition de la morphologie, Modélisation et Simulation du comportement au porter. Mise au point d'une méthode d'acquisition de la morphologie du buste féminin, développement d'algorithmes de reconstruction de surface 3D d'un buste féminin à partir de photos numériques dans l'objectif de modéliser le comportement du sein en modes statiques et dynamiques.

Projet Etat-Région Champagne/Ardennes : Modélisation mécanique et numérique du comportement des agro-composites et matériaux innovants. Étude du comportement des agro-composites à base de chanvre. Des outils numériques de maillage et de remaillage sont utilisés pour modéliser les structures réelles des fibres de chanvre et simuler le comportement en utilisant les outils éléments finis. Modélisations numériques pour l'étude du comportement des matériaux innovants (caoutchoutiques, composites, ..), [41].

8.2. European Initiatives

Participants: Dominique Barchiesi [correspondant], Thomas Grosjes, Sameh Kessentini.

Projet Européen : FP7 - Health-F5-2009-241818 : NANOANTENNA. Développement d'un biocapteur in vitro, ultrasensible et sélectif destiné à la détection de protéines impliquées dans les premières phases du développement de maladies. Modélisation et optimisation numériques du dispositif (taille, forme, couplage électromagnétique-matériaux), [40], [19], [42], [20].

8.3. International Initiatives

Participant: Abel Cherouat [correspondant].

Projet de coopération inter-universitaire : Optimisation des procédés d'hydroformage des tôles et des tubes. Dans ce projet en collaboration avec ESSTT Tunisie, INSA Rouen et FST Settat Maroc, on s'intéresse à l'étude et à l'optimisation fiabiliste du comportement des structures minces lors de la mise en forme par hydroformage, [7], [26].

Projet de coopération inter-universitaire de l'Agence Universitaire de la Francophonie AUF : Maîtrise de la fiabilité et de la sécurité de structures hydroformées : Expérimentation - Simulation et Optimisation. Ce projet traite la fiabilité des systèmes mécaniques en collaboration avec l'INSA de Rouen et le FST Errachidia de Maroc.

8.4. Enseignement

- F. Alauzet, *Simulation numérique en géométries complexes: apport des techniques modernes de l'adaptation de maillages*, MSc course at Ecole Centrale de Paris, France.
- F. Alauzet, *Metric-based anisotropic mesh adaptation*, CEA-EDF-INRIA schools: Numerical Analysis Summer School. CEA, Cadarache, France.
- P. Laug, *CAO et maillage*, 35 heures, Université Paris-Est Créteil Val de Marne, Master 2, mention SPI (sciences pour l'ingénieur), spécialité CoMeT (conception mécanique et thermique du matériau au système).

Les membres de la composante UTT de GAMMA3 participent naturellement à l'enseignement de divers modules d'ingénieur en mathématiques, mécanique, physique et informatique.

9. Bibliography

Major publications by the team in recent years

- [1] H. BOROUCAKI, D. CHAPPELLE, P. GEORGE, P. LAUG, P. FREY. *Chapter 9*, in "Estimateurs d'erreur géométriques et adaptation de maillages", Hermès, Paris, France, 2001, p. 279-310.

- [2] P. GEORGE, H. BOROUCAKI, P. FREY, P. LAUG, E. SALTEL. *Chapter 17*, in "Mesh Generation and Mesh Adaptivity: Theories and Techniques", Wiley InterScience, 2004, p. 497-523, ISBN 0-470-84699-2, E. Stein, R. de Borst and T.J.R. Hughes ed., 2nd edition 2008.
- [3] J. TOMASI, B. MENNUCCI, P. LAUG. *The modeling and simulation of the liquid phase*, North-Holland, Amsterdam, Netherlands, 2003, p. 271-375, ISBN: 0-444-51248-9, P. G. Ciarlet and C. Le Bris ed..

Publications of the year

Articles in International Peer-Reviewed Journal

- [4] F. ALAUZET. *Size gradation control of anisotropic meshes*, in "Finite Elements in Analysis and Design (FEAD)", 2010, vol. 46, p. 181-202.
- [5] F. ALAUZET, A. LOSEILLE. *High Order Sonic Boom Modeling by Adaptive Methods*, in "Journal of Computational Physics (JCP)", 2010, vol. 229, p. 561-593.
- [6] F. ALAUZET, M. MEHREBERGER. *P1-conservative solution interpolation on unstructured triangular meshes*, in "International Journal for Numerical Methods in Engineering (IJNME)", 2010, vol. 84, n^o 13, p. 1552-1588.
- [7] M. AYADI, M. REZGUI, A. CHEROUAT, N. MEZGHANI. *Experimental and numerical study of hydroforming aptitudes of Welded Tubes*, in "Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems", 2011, vol. 4, n^o 1.
- [8] D. BARCHIESI, T. GROSGES, E. KREMER, M. LAMY DE LA CHAPELLE. *Electromagnetic Heat-induced in Meso-structures: Computation of Temperature in Metallic Dimers*, in "PIERS Online", 2011, vol. 7.
- [9] A. BENABBOU, H. BOROUCAKI, P. LAUG, J. LU. *Numerical modeling of nanostructured materials*, in "Finite Elements in Analysis and Design (FEAD)", 2010, vol. 46, p. 165-180, doi:10.1016/j.finel.2009.06.030.
- [10] H. BOROUCAKI, T. GROSGES, D. BARCHIESI. *Enhancement of the accuracy of numerical field computation using an adaptive three-dimensional remeshing scheme*, in "Comptes rendus Mécanique", 2010, vol. 338, p. 127-131.
- [11] H. BOROUCAKI, T. GROSGES, D. BARCHIESI. *Improved 3D adaptive remeshing scheme applied in high electromagnetic field gradient computation*, in "Finite Elements in Analysis and Design", 2010, vol. 46, p. 84-95.
- [12] A. CHEROUAT, H. BOROUCAKI. *Advanced Numerical Simulation of Composite Woven Fabric Forming Processes, Resin Composites: Properties, Production and Applications*, in "Series Materials Science and Technologies", 2011, ISBN: 978-1-61209-129-7.
- [13] A. CHEROUAT, H. BOROUCAKI, L. GIRAUD-MOREAU. *Mechanical and geometrical approaches applied to composite fabric forming*, in "International Journal of Material Forming", 2010, vol. 3, n^o 2, p. 1189-1204.
- [14] M. FRANÇOIS, T. GROSGES, D. BARCHIESI, R. ERRA. *Generation of encryption keys from plasmonics*, in "PIERS Online", 2011, vol. 7.

- [15] L. GIRAUD-MOREAU, H. BOROUCAKI, A. CHEROUAT. *Adaptive remeshing of composite fabrics during the forming process*, in "International Journal of Material Forming", 2010, vol. 3, n^o 1, p. 659-662, 1960-6206, DOI 10.1007/s12289-010-0856-3.
- [16] T. GROSGES, D. BARCHIESI. *Toward nano-world based secure encryption for enduring data storage*, in "Opt. Lett.", 2010, vol. 35, n^o 14, p. 2421-2423.
- [17] T. GROSGES, H. BOROUCAKI, D. BARCHIESI. *Three dimensional adaptive meshing scheme applied to the control of the spatial representation of complex field pattern in electromagnetics*, in "Appl. Phys. B-Lasers Opt.", 2010, vol. 101, n^o 4, p. 883-889.
- [18] D. GUÉGAN, O. ALLAIN, A. DERVIEUX, F. ALAUZET. *An L^∞ - L^p mesh adaptive method for computing unsteady bi-fluid flows*, in "International Journal for Numerical Methods in Engineering (IJNME)", 2010, vol. 84, n^o 11, p. 1376-1406.
- [19] S. KESSENTINI, D. BARCHIESI, T. GROSGES, L. GIRAUD-MOREAU, M. LAMY DE LA CHAPELLE. *Adaptive Non-Uniform Particle Swarm Application to Plasmonic Design*, in "Int. J. Appl. Meta. Comput.", 2011.
- [20] S. KESSENTINI, D. BARCHIESI, T. GROSGES, M. LAMY DE LA CHAPELLE. *Selective and collaborative optimization methods por plasmonics: a comparison*, in "PIERS Online", 2011, vol. 7.
- [21] P. LAUG. *Some aspects of parametric surface meshing*, in "Finite Elements in Analysis and Design (FEAD)", 2010, vol. 46, p. 216-226, doi:10.1016/j.finel.2009.06.015.
- [22] A. LOSEILLE, F. ALAUZET. *Continuous mesh framework. Part I: well-posed continuous interpolation error*, in "SIAMNUMA", 2011, vol. 49, n^o 1, p. 38-60.
- [23] A. LOSEILLE, F. ALAUZET. *Continuous mesh framework. Part II: validations and applications*, in "SIAMNUMA", 2011, vol. 49, n^o 1, p. 61-86.
- [24] A. LOSEILLE, A. DERVIEUX, F. ALAUZET. *Fully anisotropic goal-oriented mesh adaptation for 3D steady Euler equations*, in "Journal of Computational Physics (JCP)", 2010, vol. 229, p. 2866-2897.
- [25] T. MOUTON, H. BOROUCAKI, C. BENNIS. *Hybrid mesh generation for reservoir flow simulation: Extension to highly deformed corner point geometry grids*, in "Finite Elements in Analysis and Design", 2010, vol. 46, p. 152-164.
- [26] B. RADI, A. CHEROUAT, A. E. HAMI. *Optimization techniques to identify the characteristics of an hydroformed structure*, in "International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization", 2011, p. 1779-6288, ISSN : 1779-627X ISSN (Electronic Edition).

International Peer-Reviewed Conference/Proceedings

- [27] F. ALAUZET, W. HASSAN, M. PICASSO. *Goal oriented, anisotropic, a posteriori error estimates for the Laplace equation*, in "Proceedings of ENUMATH 2009, the 8th European Conference on Numerical Mathematics and Advanced Applications", Springer, 2010, p. 47-58.

-
- [28] F. ALAUZET, A. LOSEILLE. *High-Order Sonic Boom Prediction by Utilizing Mesh Adaptive Methods*, in "48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit", AIAA-2010-1390, Orlando, FL, USA, Jan 2010.
- [29] F. ALAUZET, G. OLIVIER. *An L^p - L^∞ space-time anisotropic mesh adaptation strategy for time dependent problems*, in "Proceedings of the V ECCOMAS CFD Conf.", Lisbon, Portugal, June 2010.
- [30] F. ALAUZET, G. OLIVIER. *Extension of Metric-Based Anisotropic Mesh Adaptation to Time-Dependent Problems Involving Moving Geometries*, in "49th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit", AIAA-2011-0896, Orlando, FL, USA, Jan 2011.
- [31] D. BARCHIESI, A. CHEROUAT, S. KESSENTINI, T. GROSGES, H. BOROUCAKI. *Apparent convergence of Finite Element multiphysics problem: requirements for plasmonics studies*, in "Workshop EM IEEE 2010", Saint-Malo, France, December 2010.
- [32] D. BARCHIESI, T. GROSGES, E. KREMER, M. LAMY DE LA CHAPELLE. *Electromagnetic Heat-induced in Meso-structures: Computation of Temperature in Metallic Dimers*, in "Progress in Electromagnetics Research Symposium PIERS", Marrakesh, March 2011.
- [33] A. BELME, A. DERVIEUX, F. ALAUZET. *A fully anisotropic goal-oriented mesh adaptation for unsteady flows*, in "Proceedings of the V ECCOMAS CFD Conf.", Lisbon, Portugal, June 2010.
- [34] H. BOROUCAKI, P. LAUG. *Geometric Error Estimation*, in "ADVCOMP 2010: The Fourth International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences, IARIA conference", 2010, p. 81-86, ISBN: 978-1-61208-000-0.
- [35] M. FRANÇOIS, T. GROSGES, D. BARCHIESI, R. ERRA. *Generation of encryption keys from plasmonics*, in "Progress in Electromagnetics Research Symposium PIERS", Marrakesh, March 2011.
- [36] P. GEORGE. *A few remarks about P2 mesh generation*, in "Tetrahedron Workshop III", Swansea University, Swansea, September 2010.
- [37] L. GIRAUD-MOREAU, H. BOROUCAKI, A. CHEROUAT. *Adaptive remeshing of composite fabrics during the forming process*, in "13th Esaform Conference on Material Forming", April 2010.
- [38] L. GIRAUD-MOREAU, H. BOROUCAKI, A. CHEROUAT. *Remaillage adaptatif couplé à des techniques de projection sur l'outil pour les problèmes de mise en forme*, in "ACMA 2010", Mai 2010.
- [39] L. GIRAUD-MOREAU, J. ZHANG, A. CHEROUAT, H. BOROUCAKI. *Incremental sheet metal forming simulation using adaptive remeshing*, in "4th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes (ICTMP 2010)", Juin 2010.
- [40] T. GROSGES, D. BARCHIESI, S. KESSENTINI. *Model and optimization of nanoantenna*, in "Workshop on micro and nanofabrication - Nanoantenna meeting", Marrakesh, March 2011.
- [41] F. ILCZYSZYN, A. CHEROUAT, G. MONTAY. *Caractérisation des propriétés mécaniques de fibres de chanvres*, in "MATÉRIAUX 2010", Nantes, Paris, Octobre 2010.

- [42] S. KESSENTINI, D. BARCHIESI, T. GROSGES, M. LAMY DE LA CHAPELLE. *Selective and collaborative optimization methods for plasmonics: a comparison*, in "Progress in Electromagnetics Research Symposium PIERS", Marrakesh, March 2011.
- [43] P. LAUG, H. BOROUCHEKI. *Parallel CAD surface meshing*, in "PARENG 2011: The Second International Conference on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering", 2011.
- [44] A. LOSEILLE, A. DERVIEUX, F. ALAUZET. *A 3D Goal-Oriented Anisotropic Mesh Adaptation Applied to Inviscid Flows in Aeronautics*, in "48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit", AIAA-2010-1067, Orlando, FL, USA, Jan 2010.
- [45] A. LOSEILLE, R. LOHNER. *Adaptive anisotropic simulations in aerodynamics*, in "48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit", AIAA-2010-169, Orlando, FL, USA, Jan 2010.
- [46] G. OLIVIER, F. ALAUZET. *A mesh topology change ALE framework for efficient body large displacement adaptive simulations*, in "Proceedings of ECCOMAS CFD", June 2010.
- [47] G. OLIVIER, F. ALAUZET. *A New Changing-Topology ALE Scheme for Moving Mesh Unsteady Simulations*, in "49th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit", AIAA-2011-0474, Orlando, FL, USA, Jan 2011.
- [48] J. ZHANG, A. CHEROUAT, H. BOROUCHEKI. *3D metal drilling thermo-mechanical simulation coupled with finite element adaptive remeshing procedure*, in "AMPT 2011 - International Conference on Advanced Materials & Processing Technologies", July 2011.
- [49] J. ZHANG, A. CHEROUAT, H. BOROUCHEKI. *3D thermo-mechanical simulation coupled with adaptive remeshing for metal milling*, in "ADMOS", Paris, 2011.

Scientific Books (or Scientific Book chapters)

- [50] P. LAUG. *Maillage de qualité pour le calcul*, Éditions Universitaires Européennes, Sarrebruck, Allemagne, 2010, ISBN 978-613-1-51309-1, 156 pages.

References in notes

- [51] J. D. BOISSONNAT, M. YVINEC. *Géométrie algorithmique*, Ediscience, 1995.
- [52] P. G. CIARLET. *Basic Error Estimates for Elliptic Problems*, Ciarlet, P. G. and Lions, J. L., North Holland, 1991, vol. II.
- [53] P. FREY, P. GEORGE. *Maillages. Applications aux éléments finis*, Hermès Science Publications, Paris, 1999.
- [54] P. GEORGE, H. BOROUCHEKI. *Triangulation de Delaunay et maillage. Applications aux éléments finis*, Hermès, 1997.
- [55] A. GEORGE. *Computer implementation of the finite element method*, Dep. of Computer Science, Stanford, 1971.

- [56] R. LOHNER. *Progress in grid generation via the advancing front technique*, in "Engineering with computers.", 1996, vol. 12, p. 186-210.
- [57] F. PREPARATA, M. SHAMOS. *Computational geometry, an introduction*, Springer-Verlag, 1985.
- [58] M. S. SHEPHARD, M. K. GEORGES. *Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Finite Octree Technique*, in "Int. J. Numer. Methods Eng.", 1991, vol. 32, n^o 4, p. 709-749.
- [59] R. VERFURTH. *A review of a posteriori error estimation and adaptive refinement techniques*, Wiley-Teubner, 1996.