

Med-mesh (Medical meshes) Proposition d'action COLOR

Projets Géométrica, Caiman, Asclépios, Odysée

February 21, 2006

1 Objet et durée

Le projet Géométrica travaille depuis plusieurs années sur le développement d'un générateur de maillages. L'outil développé est capable de générer des maillages surfaciques ou volumiques, il est suffisamment flexible pour s'adapter à de multiples types de données en particulier aux données issues des techniques d'imagerie médicales. Pour devenir vraiment utile, cet outil, en cours de finalisation, a besoin d'être testé sur des données réelles, confronté et adapté aux contraintes de l'utilisation pratique et comparé à des solutions alternatives. Le but de cette action COLOR est d'associer Géométrica aux projets utilisateurs de maillages que sont Caïman, Asclépios, Odysée et le laboratoire de Neurophysiologie et Neuropsychologie de la Timone, pour mener cette étude.

Durée de l'action COLOR demandée : 1 an.

2 Équipes concernées

- Géométrica, INRIA Sophia Antipolis
- Caiman, INRIA Sophia Antipolis
- Asclépios, INRIA Sophia Antipolis
- Odysée, INRIA Sophia Antipolis
- Laboratoire de Neurophysiologie et Neuropsychologie, Faculté de Médecine de Marseille, Timone.

3 Descriptif scientifique

3.1 Le mailleur de Géométrica

Le mailleur de Géométrica est un mailleur simplicial basé sur deux notions fondamentales : les triangulations de Delaunay restreintes et le raffinement de Delaunay. Le maillage généré est de type Delaunay. Le raffinement de Delaunay, consiste à ajouter de nouveaux sommets au maillages pour casser les mauvais tétraèdres. Les triangulations de Delaunay restreintes sont utilisées pour extraire du maillage tridimensionnel les facettes qui constituent l'approximation des surfaces de contraintes, limites du domaine ou subdivision internes. La stratégie de raffinement est guidée par un double but : assurer un bon échantillonnage (et donc une bonne approximation) des surfaces de contraintes et contraindre les éléments du maillage à satisfaire les critères de forme et de taille requis.

Le raffinement de Delaunay est devenue une méthode classique pour la génération de maillages. La phase de raffinement est toujours suivie d'un post traitement (pompage ou optimisation locale) pour éliminer les "slivers", seule catégorie de tétraèdres mal formés qui ne sont pas éliminés par le raffinement de Delaunay.

Ce mailleur peut s'appliquer à des domaines bornées par des surfaces courbes (lisses ou lisses par morceaux). Le mailleur tire parti de travaux récents sur la reconstruction de surfaces, et en particulier la thèse de Steve Oudot .

Le mailleur de Géométrica est suffisamment flexible pour s'adapter à différentes formes de données. Il lui suffit en effet de disposer d'un oracle permettant de tester et calculer les intersections de segments de droites avec les surfaces de contraintes. En particulier, il est possible de mailler des domaines définis par des niveaux de gris dans une image 3D.

3.2 Asclépios

Un des axes de recherche de l'équipe Asclépios concerne la modélisation de la déformation des tissus mous (parenchyme hépatique ou cérébral, . . .) et la modélisation de la physiologie (croissance de tumeurs cérébrales, contraction cardiaque ou respiration). Ces modèles requièrent de résoudre des problèmes de simulation numérique généralement sur des maillages non-structurés volumiques, principalement sous la forme de maillages tétraédriques. Asclépios, et en particulier M. Sermesant et H. Delingette, est également fortement impliquée dans l'Action d'Envergure Nationale CardioSense3D qui cherche à modéliser la fonction mécanique et électrophysiologique du cœur, le domaine de calcul des deux chambres ventriculaires étant là encore représenté par des maillages tétraédriques.

Dans tous les cas, la création de maillages non structurés adaptés au calcul numérique à partir de données médicales reste problématique, avec souvent de nombreuses manipulations manuelles et pour un résultat qui reste parfois non satisfaisant. Les outils utilisés actuellement (GHS3D/GAMHIC3D et YAMS) découplent le raffinement/déaffinement de la surface triangulaire avec celui du volume tétraédrique générique ce qui est parfois difficile à gérer. Et les critères utilisés dans ces logiciels pour évaluer la qualité du maillage ne correspondent pas toujours aux critères propres à nos problématiques.

De manière plus précise, nous souhaiterions avoir à disposition un mailleur tétraédrique qui satisfasse les conditions suivantes :

1. Contrôle strict de la qualité du maillage (borne supérieure et inférieure) au dépend du nombre d'éléments. Ici, la qualité du maillage peut s'exprimer de plusieurs manières. Par exemple le rapport entre les rayons de la sphère inscrite et circonscrite, mais aussi les valeurs des angles dièdres (inférieures à $\pi/2$ par exemple) ou d'autres critères géométriques (permettant d'obtenir une M-Matrice de rigidité).
2. Contrôle strict du nombre d'éléments générés (borne supérieure et inférieure) au dépend des critères de qualité du maillage.
3. Contrôle local de la taille des éléments en fournissant une carte de valeurs souhaitées.
4. Possibilité de créer des maillages tétraédriques à partir d'images volumiques, le maillage correspondant à la région interne d'une isosurface.
5. Possibilité de propager des étiquettes depuis la surface vers le volume.

Nous avons déjà travaillé avec l'équipe Géométrica pour la génération de maillages de la tête dans le cadre de l'ARC HeadExp. L'approche proposée par Géométrica nous semble intéressante et pourrait correspondre à nos besoins dans les projets de simulation de croissance tumorale et l'activité électromécanique du cœur. Nous pourrions tester l'adéquation entre les solutions développées et nos problématiques en simulant par exemple un circuit de réentrée dans le myocarde, ce qui demande un raffinement local autour de zones infarctées définies dans l'image, et en calculant les isochrones de la dépolarisation cardiaque avec l'approche eikonale, ce qui demande certains critères sur les angles du maillages.

3.3 Caiman

Les activités de l'équipe Caiman portent sur la mise au point de méthodes numériques en maillages non-structurés, principalement en maillages tétraédriques, pour la résolution de systèmes d'EDP modélisant des phénomènes de propagation d'ondes en milieux hétérogènes. Les domaines d'application considérés concernent, d'une part, l'électromagnétisme (conception d'antennes, vulnérabilité des systèmes d'arme, compatibilité électromagnétique, etc.) et, d'autre part, la géosismique (risque sismique). Courant 2003, l'équipe Caiman a démarré une direction de recherche sur la modélisation numérique de l'interaction champ électromagnétique/tissus vivants. Cette problématique était au cœur de l'ARC Head-Exp: <http://www-sop.inria.fr/caiman/personnel/Stephane.Lanteri/headexp/headexp.html>

Dans cette ARC, des modèles géométriques des tissus de la tête de l'utilisateur d'un téléphone mobile ont été construits à partir d'outils développés par les équipes Epidaure, Geometrica et Odyssée partant d'images médicales. Néanmoins, l'interaction avec ces équipes portait sur la génération de triangulations surfaciques des tissus. Les maillages volumiques sont ensuite générés en utilisant l'outil GHS3D/GAMHIC3D de l'équipe Gamma (INRIA Rocquencourt). La procédure globale est loin d'être automatique et nécessite la mise au point de plusieurs procédures (notamment pour l'assemblage des maillages volumiques de chaque tissus qui sont générés séparément). Enfin, l'équipe maîtrise peu ou pas le comportement de GHS3D/GAMHIC3D vis-à-vis des contraintes souhaitées sur les maillages volumiques en question. En particulier, deux points méritent une attention particulière:

- la génération simultanée des maillages surfaciques et volumiques de plusieurs tissus,
- le raffinement local de maillage.

Par ailleurs, l'équipe s'intéresse maintenant à des méthodes numériques reposant sur des maillages non-conformes. De tels maillages permettent une grande flexibilité dans la gestion du raffinement local. En termes de maillages, il s'agit, dans un premier temps, de pouvoir générer des maillages triangulaires non-conformes s'appuyant sur une même surface. Par exemple, la surface en question peut-être l'interface crâne intérieur/LCR et on souhaite construire deux surfaces triangulées (crâne intérieur et LCR) avec des résolutions différentes et recollables (i.e sans trou).

Enfin, côté applications, l'équipe Caiman cherche à appliquer les méthodologies numériques qu'elle développe à différents contextes où il est nécessaire de traiter de l'interaction champ électromagnétique/tissus vivants. La problématique de l'ARC Head-Exp est l'étude des effets sanitaires du rayonnement issu d'un téléphone mobile. Une autre application potentielle serait la planification de techniques thérapeutiques par hyperthermie micro-ondes qui s'utilisent pour le traitement de certaines tumeurs cancéreuses. Sur ce sujet, des contacts avaient été pris début 2004 avec un radiologue du CAL, pour étudier la possibilité de mettre au point une telle technique applicable au traitement de tumeurs cérébrales. Avant d'aller plus loin dans cette recherche de partenariat sur ce sujet, il serait souhaitable d'avoir des résultats préliminaires. Dans le contexte de la présente proposition, nous pourrions réaliser une première étude de faisabilité sur des maillages des tissus de la tête incluant une tumeur.

3.4 Odyssée

L'équipe Odyssée s'intéresse aux maillages dans le cadre de son pôle 2 qui consiste à développer des méthodes basées sur l'imagerie fonctionnelle (notamment l'IRM fonctionnelle, l'EEG et la MEG) pour l'observation de l'activité du cerveau. Que ce soit pour des fins de visualisation ou pour des fins de traitement, ces méthodes nécessitent des représentations géométriques de la tête. C'est le cas, en particulier, pour les méthodes d'EEG et de MEG qui visent à reconstruire l'activité électrique du cerveau à partir des équations de Maxwell et de mesures situées à la surface du scalp.

Une particularité de ce domaine de recherche est que les événements d'intérêts correspondant à l'activité du cerveau se trouvent essentiellement dans le ruban cortical. Ce ruban qui correspond à la matière grise est délimité par deux surfaces assez proches. Or s'il est relativement facile d'extraire ces surfaces, obtenir un maillage volumique cohérent de la tête incluant ces surfaces s'avère assez difficile. Nous avons essayé plusieurs approches (notamment celle développée dans l'ARC HeadExp décrite à la section précédente) sans trouver de solution optimale. En effet, on se trouve confronté soit à des maillages très volumineux, soit à des maillages pour lesquels il est difficile de garantir qu'il couvre la totalité des volumes visés (problèmes de topologie), soit enfin à des maillages incohérents (interpénétration de surfaces) liés à des simplifications indépendantes des différentes surfaces interfaces. Ainsi, il est souvent arrivé que les temps nécessaires au maillage de la tête soient supérieurs aux temps de calculs nécessaires à la localisation des sources, notamment parce que les opérations de simplifications requièrent des interactions avec un utilisateur.

Face à ce problème, le projet a développé une nouvelle méthode de représentation de la géométrie de la tête qui permet de passer directement des descriptions des interfaces par ensembles de niveaux (méthode de description des surfaces utilisée pour l'extraction des interfaces à partir des IRM anatomiques et qui permet d'avoir des garanties de topologies) aux matrices de structures impliquées dans les méthodes par éléments finis utilisées pour résoudre le problème direct EEG/MEG. Ceci est rendu possible par l'usage de maillages structurés hexaédriques (type images volumiques) avec gestion des problèmes de domaines partiels lorsqu'un voxel se trouve à cheval sur deux domaines géométriques. A l'heure actuelle, cette méthode a été implémentée et montre des résultats partiels prometteurs et des perspectives intéressantes : complexité des matrices de structures bornable a priori, implémentation très simple des techniques multi-échelle, méthode complètement automatique et relativement rapide par rapport aux approches semi-automatiques que nous avons utilisées jusque là. . . .

Dans le contexte de la présente proposition, nous pourrions utiliser le mailleur Géométrica pour mailler la tête avec les interfaces qui nous sont nécessaires (maillages de surface ou maillages volumiques), puis :

- Vérifier si les maillages obtenus sont compatibles avec nos méthodes (problèmes de topologie pour les maillages volumique, de taille pour les maillages surfaciques).
- Comparer la qualité des maillages simpliciaux ainsi obtenus avec les maillages structurés hexaédriques que nous utilisons (à taille égale, à mémoire utilisée égale ou à temps de calcul égal). On pourrait par exemple utiliser les maillages pour calculer des propriétés intégrales connues (volumes, moments) de domaines simples, par exemple sphériques.
- Comparer la précision et la rapidité de nos problèmes directs selon les deux modalités soit sur des modèles sphériques, soit (si la taille des maillages le permet) sur des modèles réalistes de la tête.

3.4.1 Laboratoire de Neurophysiologie et Neuropsychologie, La Timone, INSERM U751

Cette équipe s'intéresse aux processus cognitifs en rapport avec l'anatomie cérébrale, et développe une recherche fondamentale et appliquée à la chirurgie de l'épilepsie. Ces applications nécessitent une localisation précise de l'activité électrique cérébrale, au cours de différentes tâches cognitives ou pendant une activité pathologique. Pour ceci, l'équipe dispose d'accès à l'imagerie IRM, et à des dispositifs d'électrophysiologie (EEG et sEEG - électrodes implantées à même le cerveau chez les patients épileptiques candidat à une chirurgie qui constitue une opportunité unique d'obtenir des enregistrement au sein même des structures cérébrales). Elle bénéficiera bientôt d'un dispositif de magnéto-encéphalographie (MEG). La localisation spatio-temporelle de l'activité corticale à partir

de mesures externes que sont la MEG ou l'EEG nécessite une connaissance précise du champ électromagnétique à l'intérieur de la tête. Ceci repose sur des modèles simples de conductivité pour les tissus de la tête (par exemple constant par morceaux), et sur un solveur de l'électrostatique, par éléments finis, surfacique ou volumique. L'équipe serait particulièrement intéressée par l'amélioration de la qualité des maillages volumiques de la tête, pour les rendre compatibles avec des calculs précis et rapides pour l'électrostatique, puisque la qualité des localisations d'activité cérébrale en dépend. De plus, elle sera en mesure de fournir des données et d'aider à valider les algorithmes.

4 Modalité de la collaboration

Les personnes impliquées dans ce color sont

- Géométrica
 - Mariette Yvinec (triangulations et maillages, développements de la librairie CGAL).
 - Pierre Alliez, (maillages variationnels, remaillage compression et paramétrage).
 - Laurent Rineau (maillages, développement du mailleur de CGAL).
- Asclépios
 - Hervé Delingette (Modélisation cardiaque et simulation de chirurgie).
 - Maxime Sermesant (Modélisation cardiaque).
 - Olivier Clatz (Croissance de tumeurs).
- Caiman
 - Loula Fezoui (méthodes numériques en maillages non-structurés pour l'électromagnétisme et en particulier, méthodes de type Galerkin discontinu en maillages non-conformes).
 - Stéphane Lanteri (méthodes numériques en maillages non-structurés pour l'électromagnétisme, modélisation numérique de l'interaction champ électromagnétique/tissus vivants).
- Odyssée
 - Théodore Papadopoulo (méthodes numériques de résolution de problèmes direct et inverses en EEG et MEG par éléments finis volumiques, méthodes d'extraction des interfaces de la tête par ensembles de niveaux).
 - Maureen Clerc (méthodes numériques de résolution de problèmes direct et inverses en EEG et MEG par éléments de surface, problèmes inverses de conductivité).
- Laboratoire de Neurophysiologie et Neuropsychologie
 - Jean-Michel Badier (expertise sur l'utilisation des méthodes numériques pour l'EEG et la MEG en milieu hospitalier, acquisition et traitement de données).

La collaboration entre les projets Géométrica, Asclépios, Caiman, Odyssée et le Laboratoire de Neurophysiologie et Neuropsychologie pourrait prendre la forme de stages co-encadrés au cours du printemps et de l'été 2006. Chaque stage s'attachera à résoudre avec le mailleur de Géométrica un ou plusieurs problèmes de maillages proposés par Asclépios, Caiman et Odyssée et pourra comparer le maillage obtenu avec ceux qui résultent d'autres mailleurs et d'autres techniques.

La coopération entre les projets engagés dans cette action devrait se prolonger au-delà de la COLOR, par exemple à travers un postdoc au cours de l'année 2006-2007.

5 Ressources demandées

Rémunération de stagiaires : 2×6 mois = 16800 euros

6 Interaction avec les autres actions

Un color sur le thème de génération de maillages tétraédriques (Tech-Mesh) a déjà eu lieu en 2001, impliquant les projets Caiman, Epidaure et Prisme. A cette époque le développement de maillages chez Prisme en était à ses balbutiements et il s'agissait pour les membres de Prisme de s'initier aux problématiques des utilisateurs de maillages afin de guider le développement du mailleur. Aujourd'hui le mailleur de Géométrica existe, est en cours de finalisation et demande à être testé et utilisé dans des conditions réelles.

Odyssée et le Laboratoire de Neurophysiologie et Neuropsychologie ont déjà obtenu une color en 2005 (EEG++) sur le problème du calcul des conductivités de la tête à base de tomographie par impédance électrique. Ce sujet est très différent de la présente proposition, il ne s'occupe pas du tout de maillages mais d'estimation de paramètres physiques de la tête. Seul Odyssée était impliqué dans EEG++ et la présente proposition permettra de faire collaborer le Laboratoire de Neurophysiologie et Neuropsychologie avec les autres équipes de l'INRIA. Dans EEG++, le Laboratoire de Neurophysiologie et Neuropsychologie amenait essentiellement des compétences d'acquisition de données alors que dans MedMesh, son rôle est davantage d'évaluer les qualités des résultats obtenus à partir des différents maillages proposées dans MedMesh à partir de données cliniques déjà enregistrées. Leur compétence dans MedMesh relève donc plus de l'expertise sur l'interprétation des résultats que de l'acquisition.