



HAL
open science

Comparaisons quantitatives de résultats de problèmes directs en EEG

Emmanuel Olivi

► **To cite this version:**

Emmanuel Olivi. Comparaisons quantitatives de résultats de problèmes directs en EEG. [Rapport de recherche] RR-6364, 2007, pp.19. inria-00189515v2

HAL Id: inria-00189515

<https://inria.hal.science/inria-00189515v2>

Submitted on 22 Nov 2007 (v2), last revised 9 Jan 2010 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

*Comparaisons quantitatives
de résultats de problème direct EEG*

Emmanuel Olivi

N° ????

Novembre 2007

Thème NUM

*R*apport
de recherche



Comparaisons quantitatives de résultats de problème direct EEG

Emmanuel Olivi* †

Thème NUM — Systèmes numériques
Projets Geometrica et Odysée

Rapport de recherche n° ???? — Novembre 2007 — 19 pages

Résumé : Ce document fournit des comparaisons de plusieurs méthodes de résolution du problème direct en EEG en comparant leur précision relative sur un modèle de tête sphérique à trois couches puis sur un modèle de tête réaliste. Les méthodes exposées sont des éléments finis de trois types : surfaciques (Boundary Element Method), volumiques tétraédriques, volumiques implicites basés sur des level-sets

Mots-clés : MEG, EEG, MEEG, problème direct, CGAL, éléments finis, éléments finis implicites, maillage, Méthode éléments frontière, modèle sphérique

* Stagiaire Geometrica et Odysée

† Responsables de stage : Mariette Yvinec ; Maureen Clerc ; Theodore Papadopoulos

Quantitative comparisons of forward problem in EEG

Abstract: This document gives comparisons between several methods that solve the forward problem in EEG by comparing their relative precision on a 3-layer spherical model of the head and then on a realistic model. These methods are based on finite element methods which either use surfacic meshes with triangles, volumic meshes with tetrahedra, or implicit elements deduced by levelsets

Key-words: MEG, EEG, MEEG, forward problem, CGAL, FEM, BEM, implicit finite elements, mesh generation, Boundary element method, spherical model

Table des matières

1	Introduction	4
2	Génération de maillage	4
2.1	Le modèle sphérique trois couches	4
2.1.1	Maillage volumique avec Head_mesher	4
2.1.2	Maillage surfacique avec Surface_mesher	7
2.2	Maillage réaliste	8
3	Comparaisons des méthodes implicite, tétraédrique et surfacique	11
3.1	Éléments finis implicites et éléments finis tétraédriques	11
3.2	Influence de la position du dipôle dans le voxel pour le code implicite	14
3.3	Méthode des éléments de frontière	15
3.4	Modèle Réaliste	17
3.5	Récapitulatif pour le modèle sphérique	18
4	Conclusion	19

1 Introduction

La MEEG (Magnéto-Électro EncéphaloGraphie) est un outil essentiel dans l'étude de l'activité électrique du cerveau de par sa haute résolution temporelle qui la distingue de l'IRM fonctionnelle. L'acquisition de données en EEG et MEG fournit respectivement le potentiel électrique et le champ magnétique sur le scalp. À partir de cette acquisition nous pouvons retrouver les sources qui sont responsables de ce champ électromagnétique. C'est un problème inverse de localisation dont la résolution passe par celle du problème direct, qui à partir d'une simulation de sources à l'intérieur du cerveau calcule le champ résultant sur le scalp. Ce document se propose de comparer trois méthodes de résolution du problème direct, la première utilisant des éléments de frontière (BEM), une autre utilisant des éléments finis tétraédriques sur des maillages volumiques, enfin une nouvelle méthode d'éléments finis implicites ne nécessitant aucun maillage et travaillant directement sur les voxels de l'image. Nous avons donc comparé la précision de ces différentes méthodes sur un modèle sphérique à trois couches pour lequel la solution analytique est connue. Enfin des comparaisons ont pu être effectuées sur un modèle de tête réaliste. Nous nous proposons dans un premier temps d'aborder la génération de maillages effectuée grâce à la librairie CGAL, puis nous verrons les différentes comparaisons effectuées.

2 Génération de maillage

CGAL¹ est une bibliothèque développée par un consortium Européen dont l'équipe Geometrica fait partie. CGAL propose un logiciel de génération automatique de maillages. Elle nous permet de générer des maillages surfaciques et volumiques à partir d'images définies par des niveaux de gris ou par des fonctions implicites.

2.1 Le modèle sphérique trois couches

Le modèle sphérique est une grossière modélisation de la tête constitué de trois sphères concentriques de rayon 0.87, 0.92 et 1 représentant respectivement le cortex, le crâne et le scalp (voir figure 1).

2.1.1 Maillage volumique avec Head_mesher

Le code de Head_mesher développé à partir du mailleur de CGAL prend pour entrée des images en niveaux de gris et fournit un maillage volumique compatible avec une bonne approximation d'une ou plusieurs surfaces définies par un niveau de gris de l'image. Dans un premier temps un raffinement de Delaunay ajoute des sommets en suivant des critères de taille et de forme sur les éléments du maillage, mais aussi de distance aux surfaces à approximer. Enfin un balayage de tous les tétraèdres est effectué afin de modifier les slivers, qui sont les tétraèdres plats responsables d'erreurs dans les méthodes à éléments finis, en

¹Computational Geometry Algorithms Library, <http://www.cgal.org>

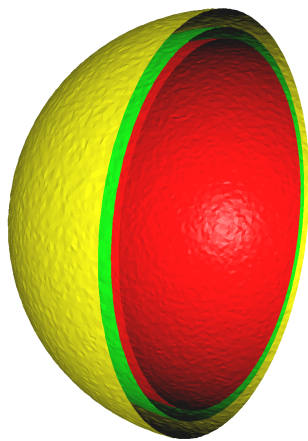


FIG. 1 – Surfaces décrivant le modèle sphérique

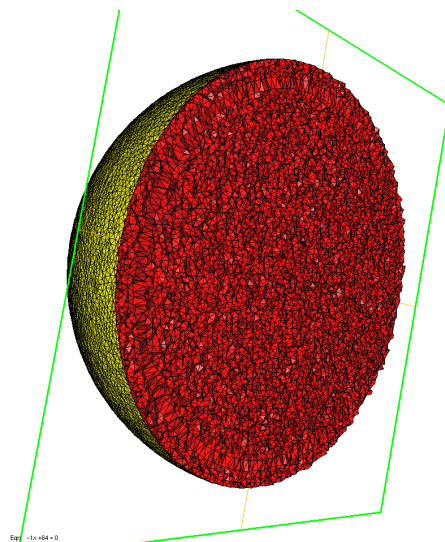


FIG. 2 – Maillage volumique de sphères

assignant un poids à certains sommets du tétraèdre. La quantité finale de sommets du maillage est contrôlée par le choix d'une taille maximale d'arêtes de triangle. Nous avons ainsi pu générer des maillages allant de 9 000 à 600 000 sommets (voir figure 2).

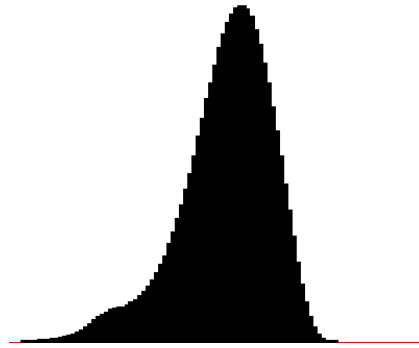


FIG. 3 – Répartition des angles dièdres de 0 à 90°

La figure 3 nous montre la répartition des angles dièdres du maillage, ce qui constitue une bonne mesure de la qualité du maillage, nous constatons que même si l'angle dièdre minimal est 4.7° pour notre maillage de 310 000 sommets, les autres angles sont largement situés entre 10° et 70°. Ceci-dit l'élimination des slivers peut être prolongée.

2.1.2 Maillage surfacique avec `Surface_mesher`

Pour le code surfacique, il est nécessaire de récupérer le maillage des surfaces, or les maillages des surfaces issus de `Head_mesher` étaient trop importants pour OpenMEEG. Nous avons donc utilisé une autre possibilité du mailleur de CGAL, celle de mailler des surfaces à partir de la définition d'une fonction implicite de sphère (figure 4) : $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$, avec $r \in \{0.87, 0.92, 1\}$. Les maillages homothétiques apportant une amélioration dans les résultats², nous avons généré différents maillages pour chacune des trois sphères.

²«[l'utilisation de trois maillages sphériques homothétiques conduit à des erreurs significativement moins importantes.]» Anne Crouzeix

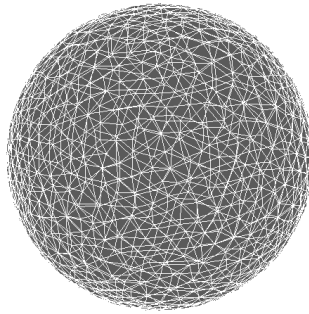


FIG. 4 – Maillage surfacique à partir d’une fonction implicite

2.2 Maillage réaliste

Nombre de sommets	57 000	320 000	584 000
Temps total	6.62	205.34	615.46
Temps de raffinement	0.71	7.08	17.32
Temps d’élimination	4.94	183.28	544.20
Temps de validation	0.20	1.25	2.31
Temps d’écriture	0.75	13.57	51.34

TAB. 1 – Temps de maillage en minutes

La tête humaine et sa géométrie complexe constitue un défi pour un mailleur. Le modèle de tête que nous avons utilisé est constitué de quatre surfaces : la matière grise (gm), le crâne défini par une surface intérieure et extérieure (innerskull et outerskull), puis le scalp. Les différentes surfaces sont très proches comme nous le montre la figure 5. Nous avons pu générer un maillage de un maillage de 57 000 sommets en 6 minutes, 320 000 sommets en 3 heures, et 584 000 sommets en 10 heures (voir figure 6). Le tableau 1 nous indique que la

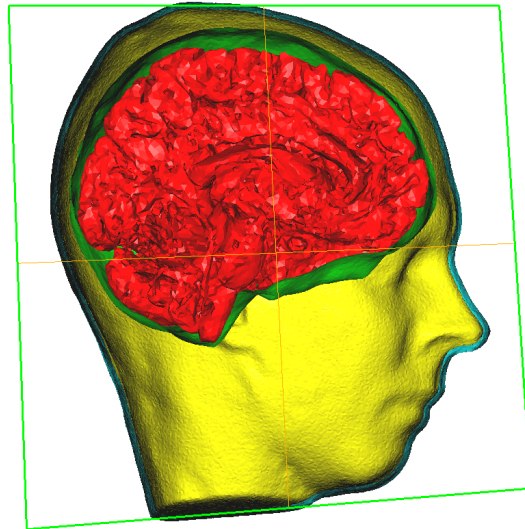


FIG. 5 – Surfaces décrivant un modèle réaliste de 584 000 sommets

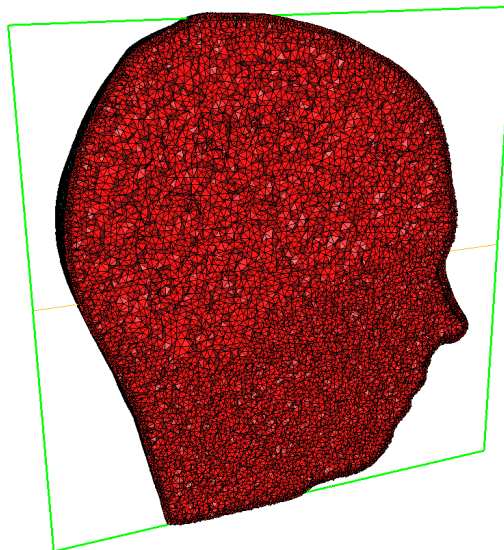


FIG. 6 – Maillage volumique réaliste de 584 000 sommets

majorité du temps de maillage³ est dû à l'élimination des slivers et peut donc être amélioré en changeant le critère d'arrêt.

³Calcul effectué sur une machine 4 processeurs xéon 3.20 GHz 2 MB Cache

3 Comparaisons des méthodes implicite, tétraédrique et surfacique

Le modèle sphérique à trois couches est très utilisé en EEG, car la solution analytique y est connue⁴. Nous pouvons ainsi comparer le potentiel électrique simulé sur le scalp par les codes d'éléments finis à ceux calculés de manière analytique qui utilise des fonctions de Green. Les conductivités choisies sont de 1 pour le volume intérieur (cortex) et le volume extérieur (scalp) et 1/80 pour le crâne. Nous avons calculé le potentiel U en chaque points x_i du maillage du scalp et avons mesuré deux erreurs : La RDM (Relative Difference Measure) qui est une erreur topographique et la MAG (MAGnification) qui mesure l'amplitude de l'erreur.

$$RDM = \left\| \frac{U_{analytique}}{\|U_{analytique}\|} - \frac{U_{calculé}}{\|U_{calculé}\|} \right\| \quad MAG = \frac{\|U_{analytique}\|}{\|U_{calculé}\|} \quad (1)$$

$$\text{où } \|U\| = \|U\|_2 = (\sum |U_i|^2)^{\frac{1}{2}}$$

3.1 Éléments finis implicites et éléments finis tétraédriques

Nous avons comparé les résultats des deux codes avec la solution analytique en simulant un dipôle à différentes positions et orientations. Pour ce faire, nous avons généré trois maillages : 118 000, 310 000, 590 000 points, pour le code tétraédrique et travaillé avec des images de dimension : 128x128x128, 200x200x200, 256x256x256 pour le code implicite.

Sur les figures 7 à 9, on voit que le code tétraédrique est plus précis que le code implicite, par exemple pour le maillage a 590 000 points qui requit 2.4 Go de mémoire RAM lors de l'exécution du code tétraédrique, sa précision est inférieure à 2 % tandis qu'à mémoire vive équivalente, le code implicite, sur une image de dimension 256, a une RDM constamment supérieure. En contre-partie, on voit que les résultats de la méthode implicite sont plus linéaires et moins dépendants de l'orientation que ceux de la méthode tétraédrique. La MAG de la méthode implicite étant fautive pour le moment, nous afficherons la MAG du code tétraédrique en comparaison de celle du code surfacique au chapitre 3.5.

⁴Zhi Zhang : "A fast method to compute surface potential generated by dipoles within multilayer anisotropic spheres", in Phys. Med. Biol. 40 (1995), pages 335-349

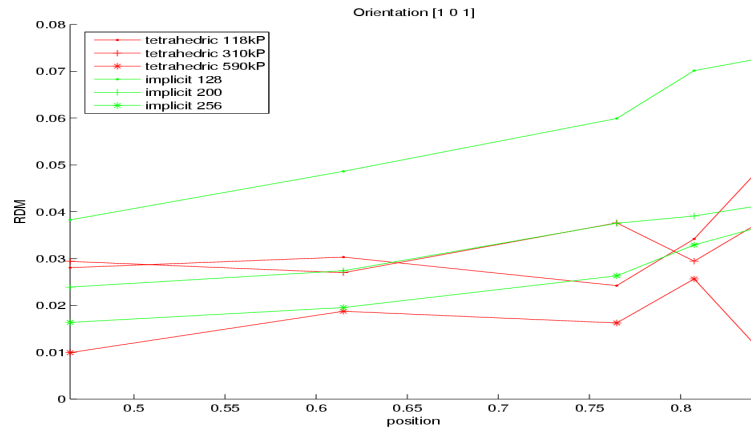


FIG. 7 – RDM avec orientation 1 0 1

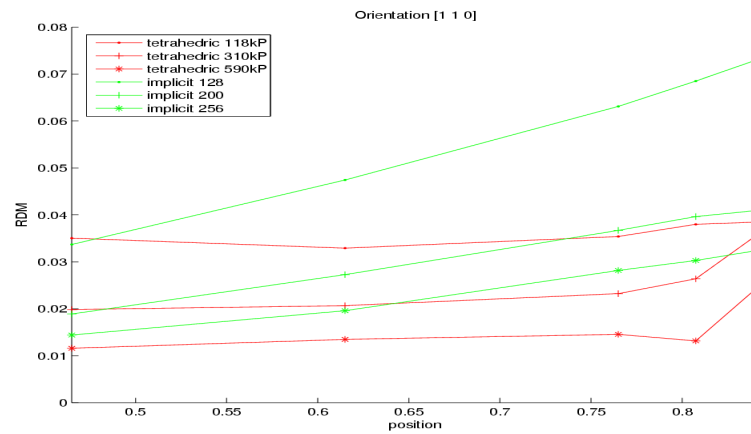


FIG. 8 – RDM avec orientation tangentielle

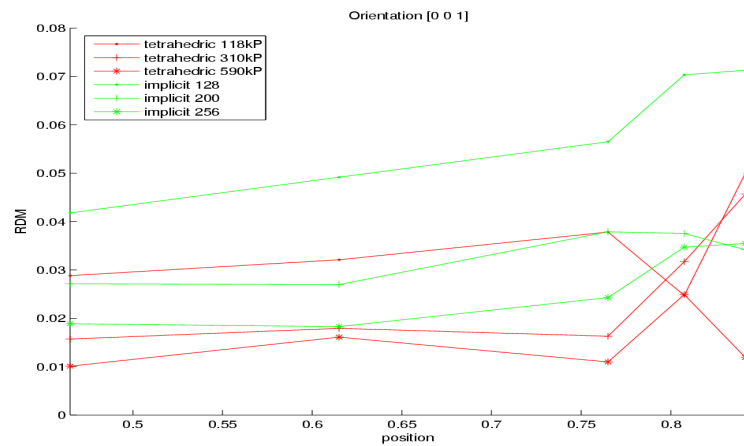


FIG. 9 – RDM avec orientation radiale

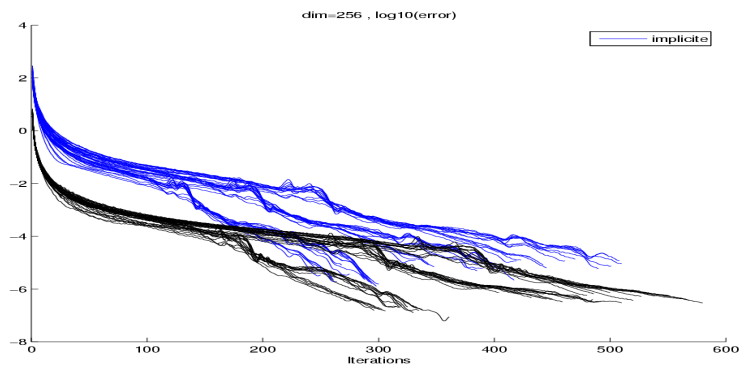


FIG. 10 – Décroissance de l'erreur au fil des itérations $\text{Log}(\text{erreur})$

La figure 10 représente le logarithme de l'erreur au cours des itérations des deux codes. En bleu, le code implicite pour les trois dimensions d'images et en noir le code tétraédrique. On voit qu'il y a un facteur de décroissance de l'erreur entre les deux méthodes. Aussi l'on remarque que l'on pourrait interrompre les calculs plus tôt; l'erreur décroît peu à partir d'un certain nombre d'itérations.

3.2 Influence de la position du dipôle dans le voxel pour le code implicite

Nous avons des doutes sur la qualité de la simulation du dipôle dans un voxel pour la méthode implicite. Nous avons donc évalué la précision en simulant un dipôle allant du centre du voxel 110 à son bord.

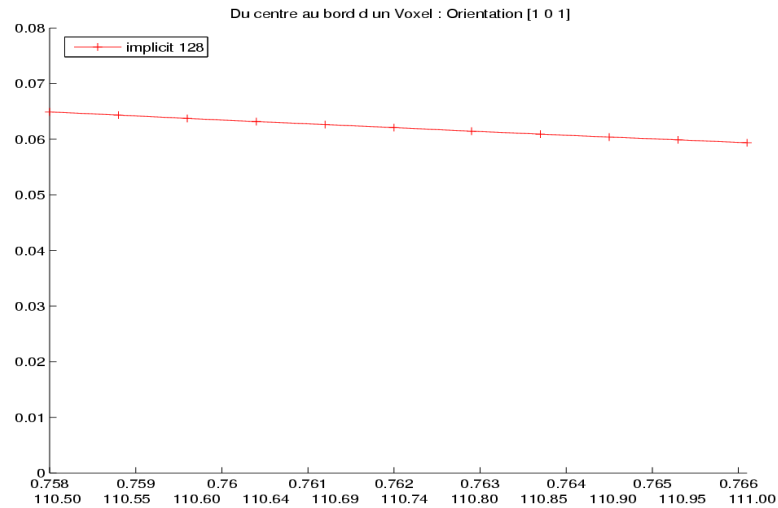


FIG. 11 – Précision relative à la position du dipôle dans un voxel

La figure 11 nous indique une différence de la précision qui signifie que le dipôle est mieux simulé près des bord d'un voxel, mais toutefois cette influence est négligeable.

3.3 Méthode des éléments de frontière

La méthode des élément de frontière qui a été développée dans OpenMEEG⁵, utilise des maillages surfaciques. Nous avons généré des maillages de 228, 2262, 6121, 7289 points.

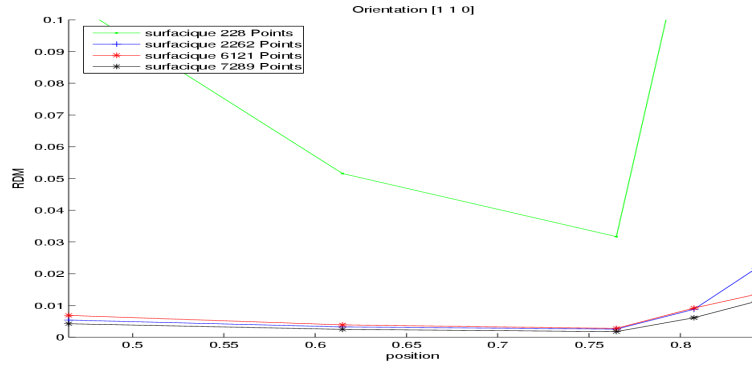


FIG. 12 – RDM avec orientation tangentielle

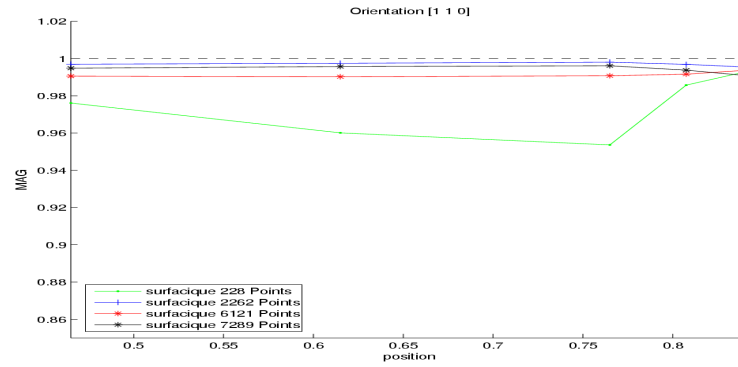


FIG. 13 – MAG avec orientation tangentielle

Nombre de points	228	2262	6121	7289
Temps de calcul	9 s	18 min	5 h 30	7 h

TAB. 2 – Temps de calcul en fonction de la taille du maillage

⁵<http://openmeeg.gforge.inria.fr>

Nous y voyons une RDM inférieure à 2 % en toutes positions pour les maillages de 6121 et 7289 points. Enfin la table 2, nous donne les temps de calcul⁶, nécessaires à la résolution du problème pour les différentes taille de maillage, on y voit qu'il y a une grande différence dans les temps de calcul avec les maillages de 2262 et 6121 points, tandis leurs précisions sont du même ordre.

⁶Calcul effectué sur une machine 4 processeurs xéon 3.20 GHz 2 MB Cache 8 GB de RAM

3.4 Modèle Réaliste

Sur le modèle réaliste, nous n'avons pas de solution analytique, nous avons comparé la précision des différentes méthodes avec les résultats donnés par la FEM tétraédrique pour un maillage comportant de 584 000 points.

3.5 Récapitulatif pour le modèle sphérique

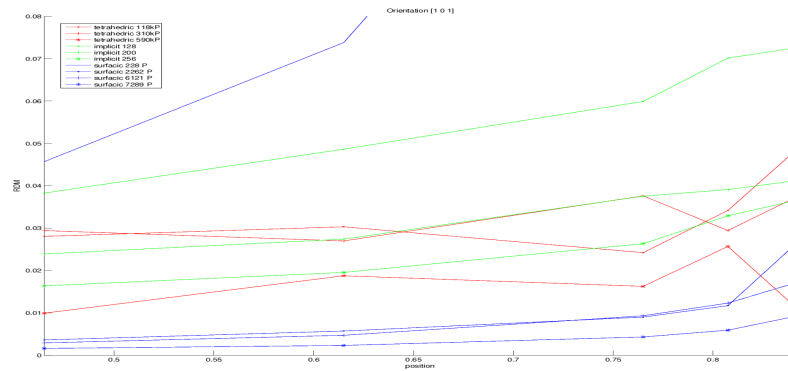


FIG. 14 – RDM de toutes les methodes

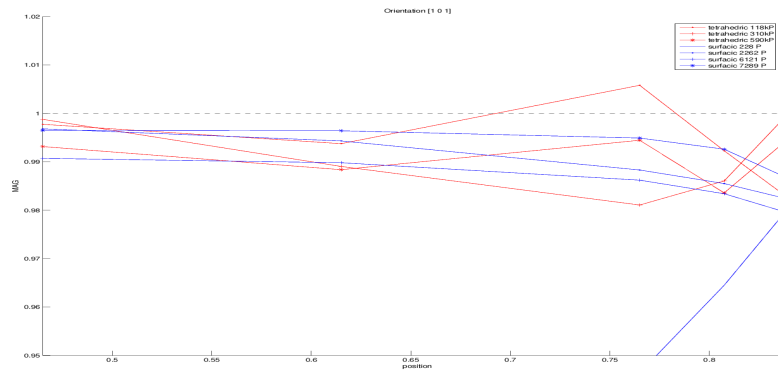


FIG. 15 – MAG de toutes les méthodes

Figures 14 et 15 sont regroupés les résultats des précisions des trois méthodes pour le modèle sphérique.

4 Conclusion

Nous avons vu que le code surfacique obtient les meilleurs résultats sur le modèle sphérique. Mais il est resté encore limité au niveau de la taille de ses maillages. Des essais complémentaires restent à faire sur des modèles réalistes afin de quantifier les comparaisons. Bien que le code tétraédrique reste meilleur en précision, le code implicite est néanmoins le plus simple à utiliser et est aisément parallélisable. Le code `Head_mesher` pourrait être optimisé davantage en réduisant le temps d'élimination des slivers qui est responsable de plus de 90 % du temps de maillage. Enfin un maillage adaptatif apporterait une nette amélioration à tous les résultats.



Unité de recherche INRIA Sophia Antipolis
2004, route des Lucioles - BP 93 - 06902 Sophia Antipolis Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Futurs : Parc Club Orsay Université - ZAC des Vignes
4, rue Jacques Monod - 91893 ORSAY Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Lorraine : LORIA, Technopôle de Nancy-Brabois - Campus scientifique
615, rue du Jardin Botanique - BP 101 - 54602 Villers-lès-Nancy Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Rennes : IRISA, Campus universitaire de Beaulieu - 35042 Rennes Cedex (France)

Unité de recherche INRIA Rhône-Alpes : 655, avenue de l'Europe - 38334 Montbonnot Saint-Ismier (France)

Unité de recherche INRIA Rocquencourt : Domaine de Voluceau - Rocquencourt - BP 105 - 78153 Le Chesnay Cedex (France)

Éditeur
INRIA - Domaine de Voluceau - Rocquencourt, BP 105 - 78153 Le Chesnay Cedex (France)
<http://www.inria.fr>
ISSN 0249-6399