Maillage 3D de structures anatomiques pour la simulation électromagnétique et thermique

J. Dardenne, S. Valette, N. Siauve, N. Burais, R. Prost

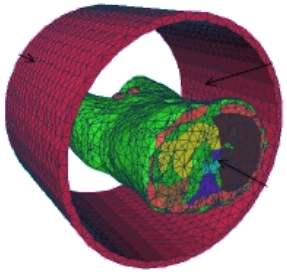
9 novembre 2009

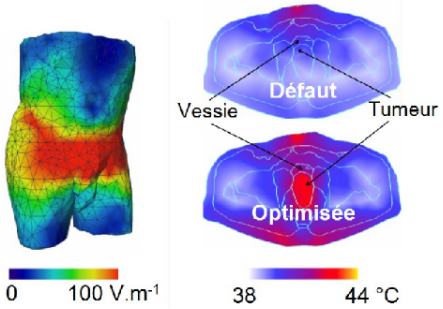
ANR BioRfMod

But

Quantifier les phénomènes électromagnétiques et thermiques induits dans le corps humain lors de son exposition à un rayonnement radiofréquence : 1 MHz à 3 GHz [Siauve04]

- Exposition volontaire : hyperthermie, IRM, ...
- Exposition involontaire : téléphonie mobile, wifi, applications industrielles (soudeuses RF), ..

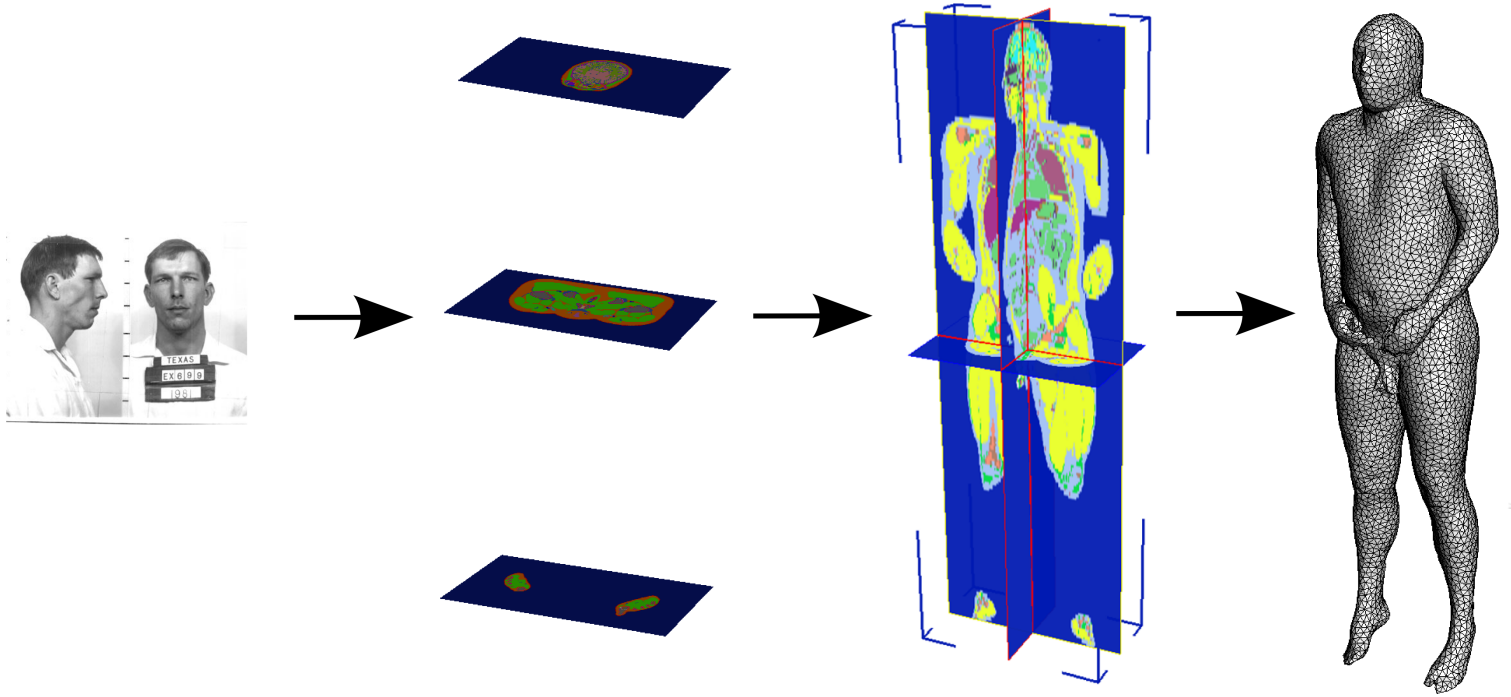




Objectifs

Notre approche

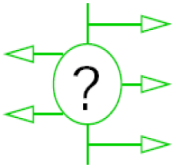
- Représentation volumique directe munie de "bonnes propriétés" pour le calcul par MEF.
- Densité locale du maillage en fonction de critères prédéfinis.



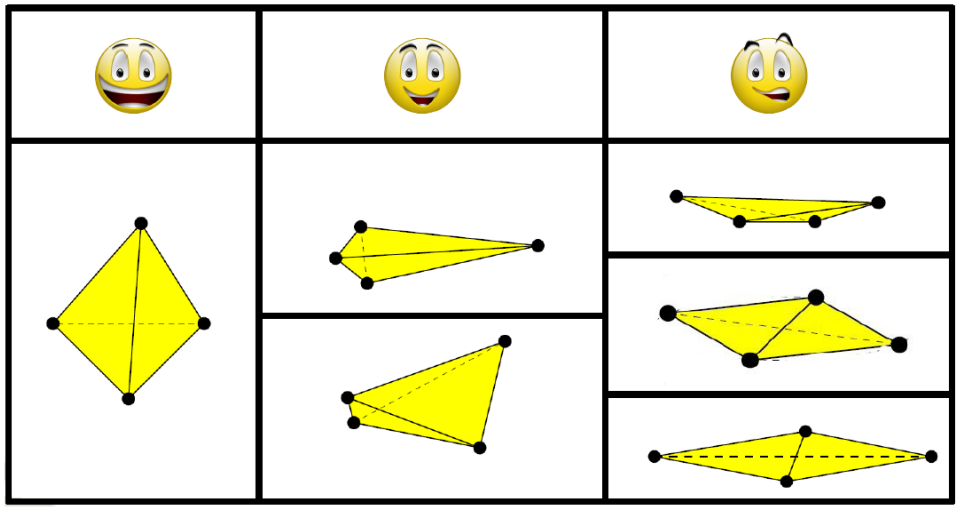
Influence sur la simulation

Qu'est ce qu'un bon élément pour les éléments finis ?
[Shewchuk02]

- Taille et forme des éléments



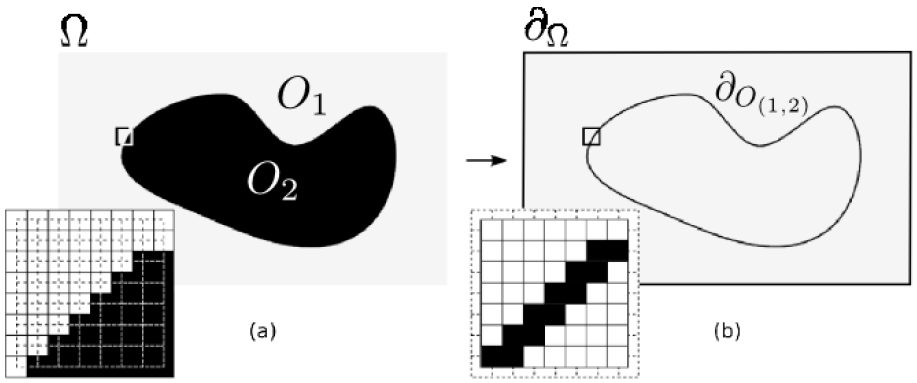
- Erreur d'interpolation
- Erreur de discrétisation
- Conditionnement de la matrice

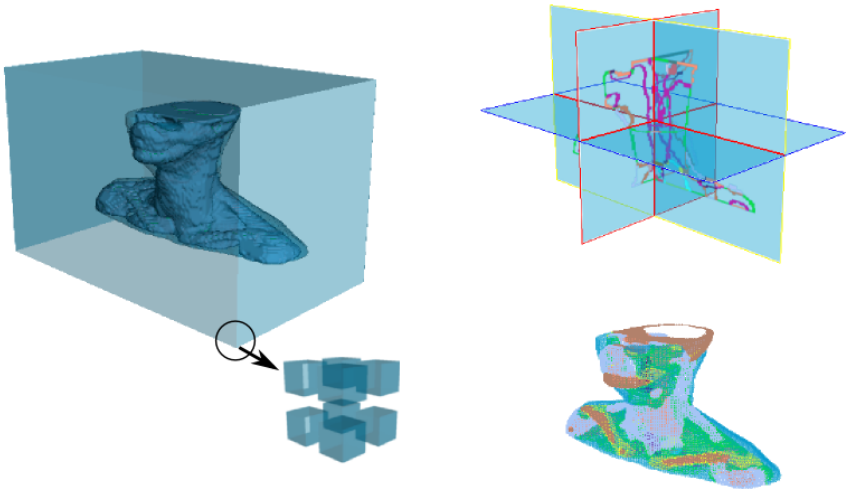


Données d'entrées

Objets discrets

- Objets discrets : sous-ensemble de pixels ou de voxels (ex. : images médicales).
- Graphe primaire : voisinages (a).
- Graphe dual : inter-pixels (b).

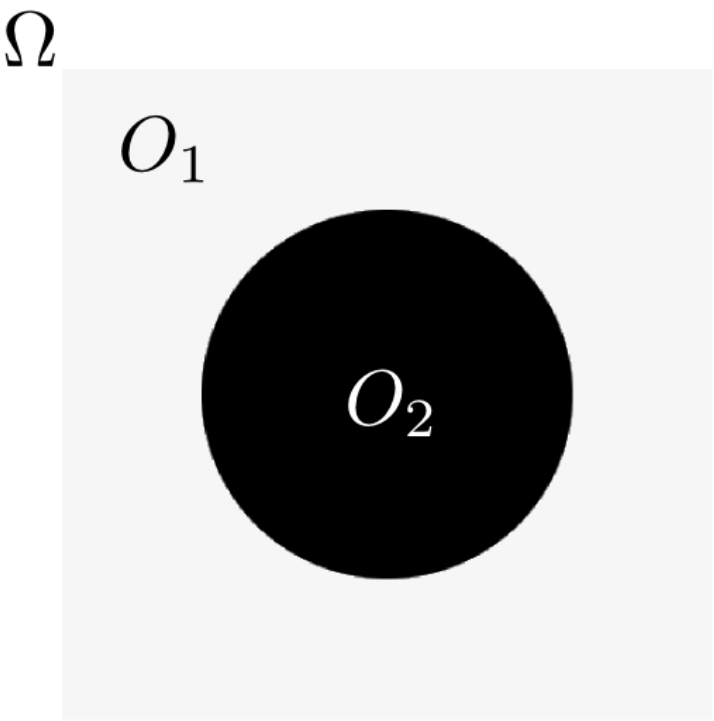




Partition du domaine

Principe

Répartir N points dans l'espace en préservant les frontières du domaine.



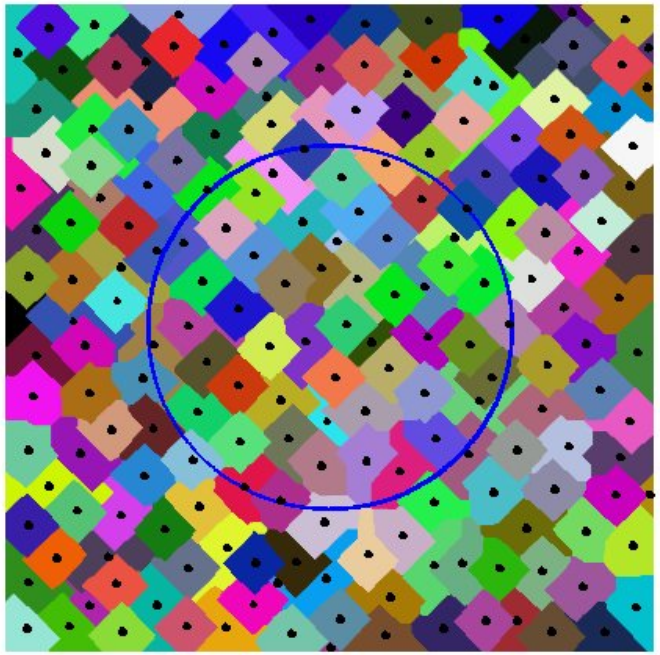


Diagramme de Voronoï Centroïdal

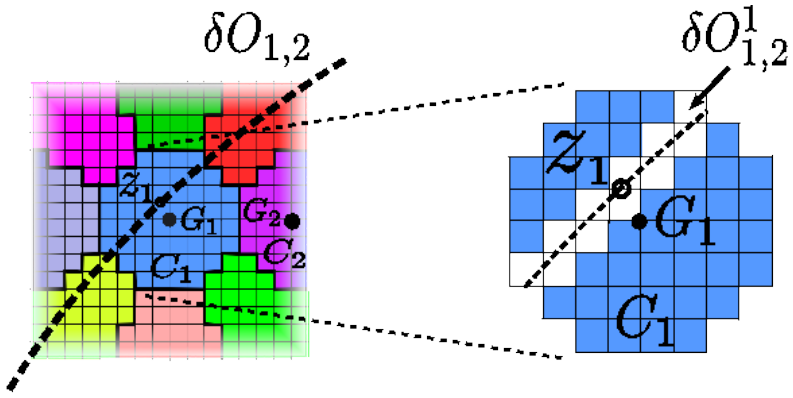
Approche variationnelle

Maximiser la compacité des cellules en minimisant un terme d'énergie [Valette04] :

$$E_V = \sum_{i=1}^{n} \left[\sum_{p_j \in C_i} \rho_j {z_i}^T (z_i - 2\,\gamma_j) \right] \tag{1}$$

Position de chaque site :

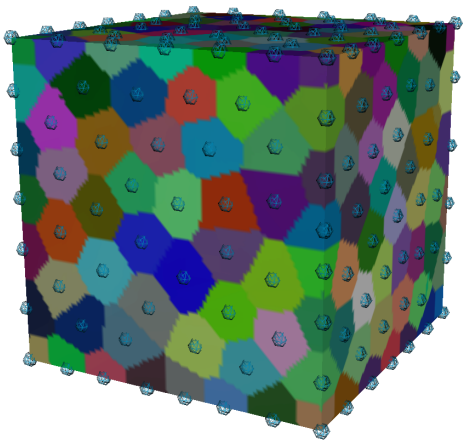
- Cas non-contraint : z_i est fixé au barycentre de sa cellule.
- Cas contraint : z_i est fixé au barycentre de l'intersection de sa cellule avec la frontière.

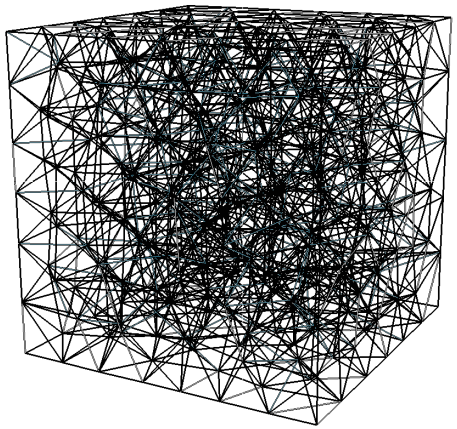


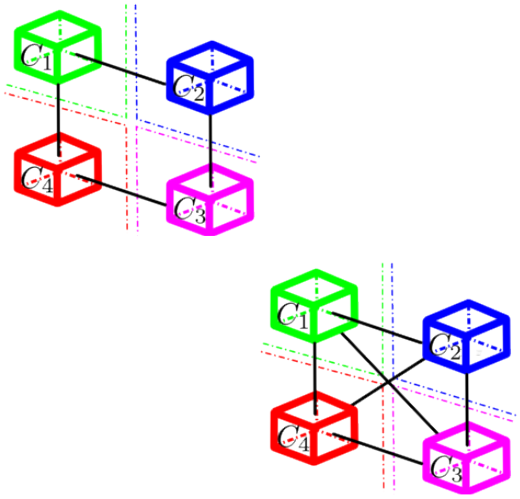
Maillage

Approximation du dual

- Création d'un graphe G_c de connexité basé sur l'adjacence des cellules de Voronoï. Deux types d'ambiguïtés dues au partitionnement d'un espace discret.
- Construction d'un ensemble Γ des tétraèdres admissibles à partir de G_c.



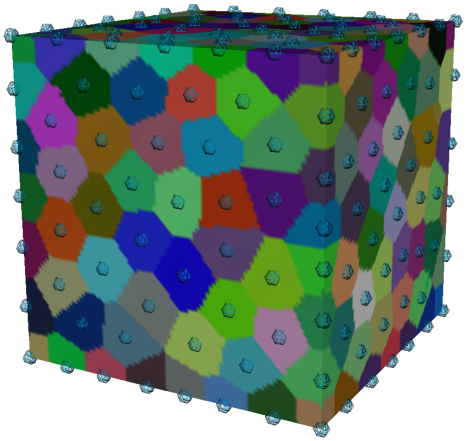


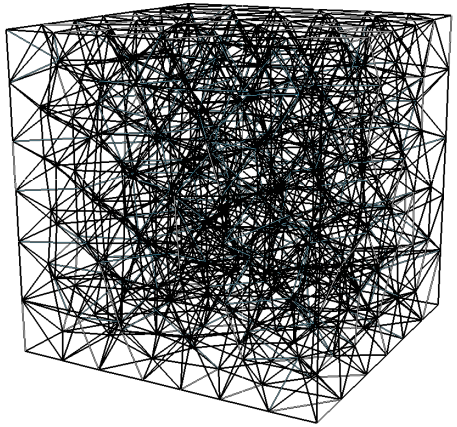


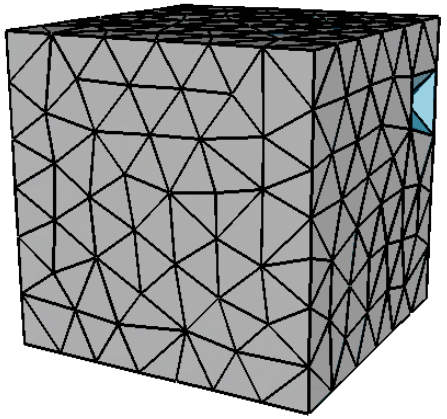
Maillage

Approximation du dual

- Création d'un graphe G_c de connexité basé sur l'adjacence des cellules de Voronoï. Deux types d'ambiguïtés dues au partitionnement d'un espace discret.
- Construction d'un ensemble Γ des tétraèdres admissibles à partir de G_c.



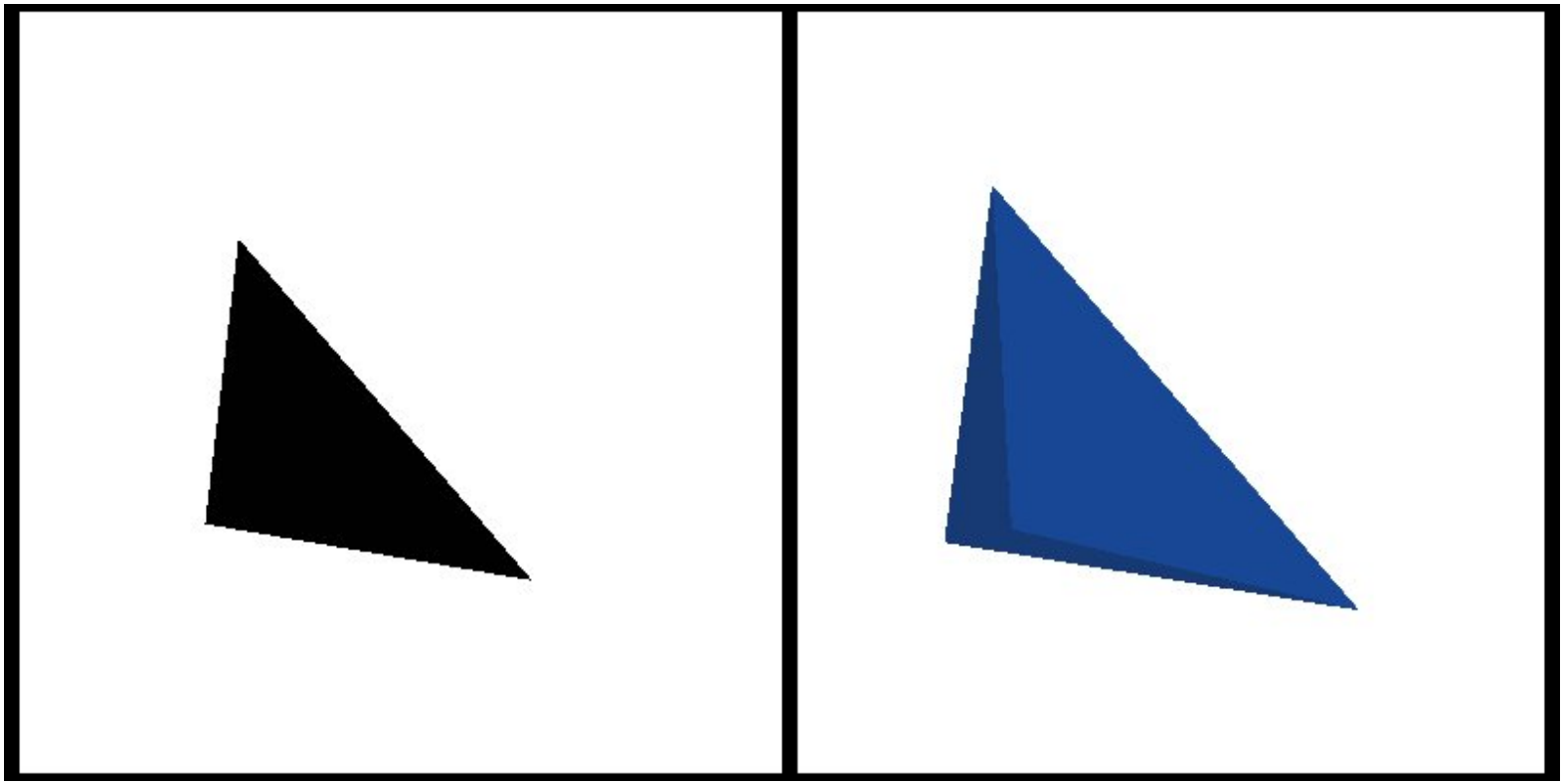




Maillage

Approximation du dual

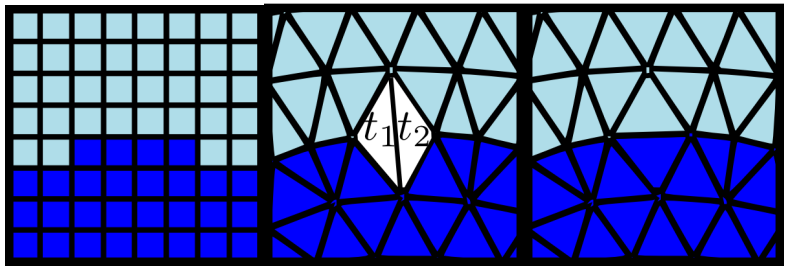
- Construction du maillage par propagation d'un front d'onde en se basant sur Γ.

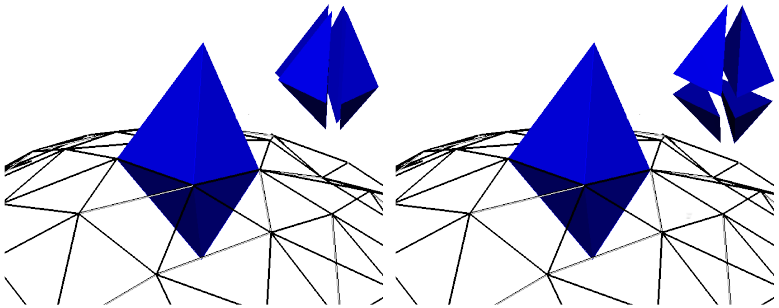


Allocation et restauration des frontières

Principe

- Chaque tétraèdre est alloué à un objet en comptabilisant les voxels qu'il contient.
- Permet de résoudre les ambiguïtés topologiques en détectant les tétraèdres appartenant initialement à deux régions du domaine.

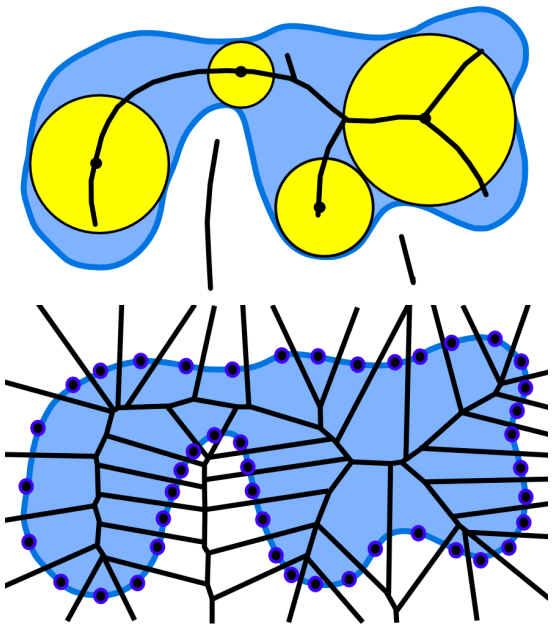




Axe médian

Définitions

- L'axe médian est l'union des centres des cercles maximaux.
- L'axe médian est un sous ensemble du graphe de Voronoï .



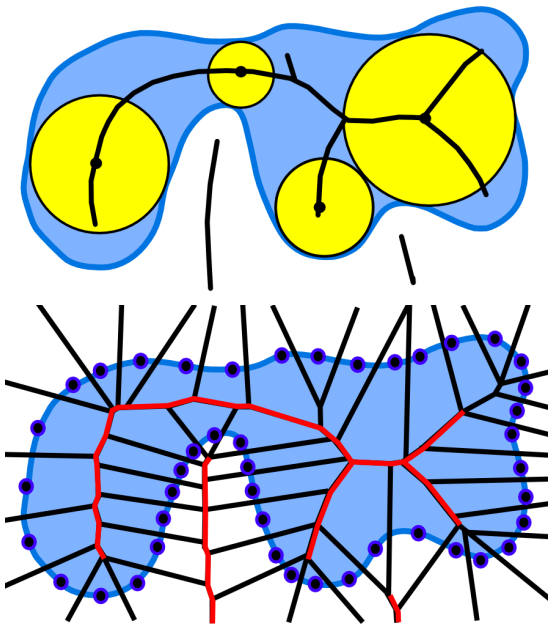
Utilité

- Reconstruction de surface à partir d'un nuage de points.
- Création de maillages adaptatifs (LFS : largeur locale) [Alliez05].

Axe médian

Définitions

- L'axe médian est l'union des centres des cercles maximaux.
- L'axe médian est un sous ensemble du graphe de Voronoï .



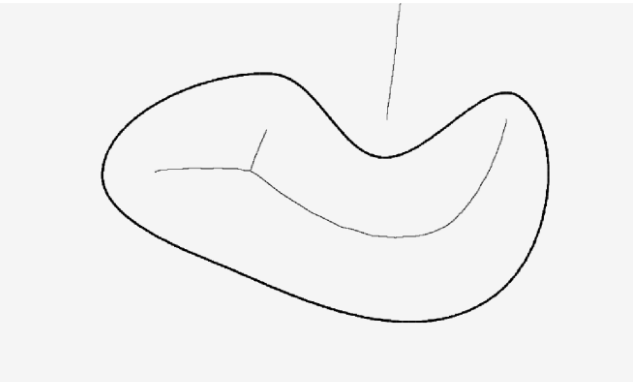
Utilité

- Reconstruction de surface à partir d'un nuage de points.
- Création de maillages adaptatifs (LFS : largeur locale) [Alliez05].

Challenges

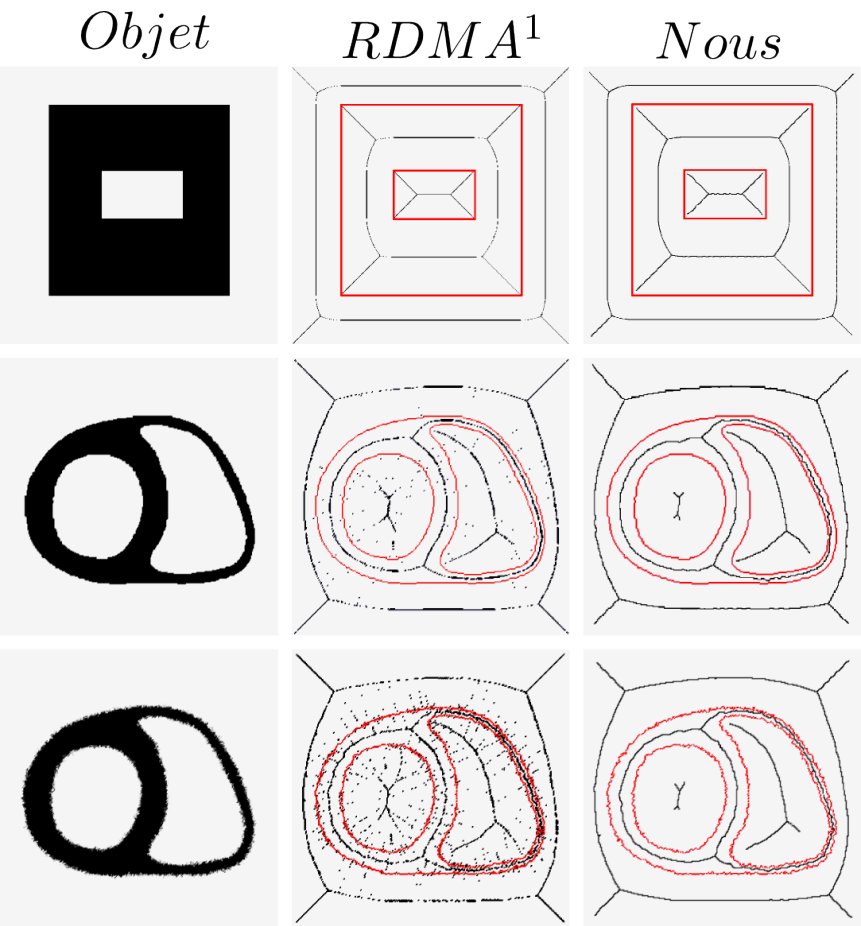
- L'axe médian est hautement sensible aux petits détails dans la forme.
- Généralement, on construit une approximation discrète de l'axe médian qui dépend de la distribution originale.

Image originale



Approximation de l'axe médian

Résultats : Axe médian



[1] Coeurjolly, D., Montanvert, A. : Optimal separable algorithms to compute the reverse euclidean distance transformation and discrete medial axis in arbitrary dimension.
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **29**(3), 437–448 (2007)

Générations de maillages adaptatifs

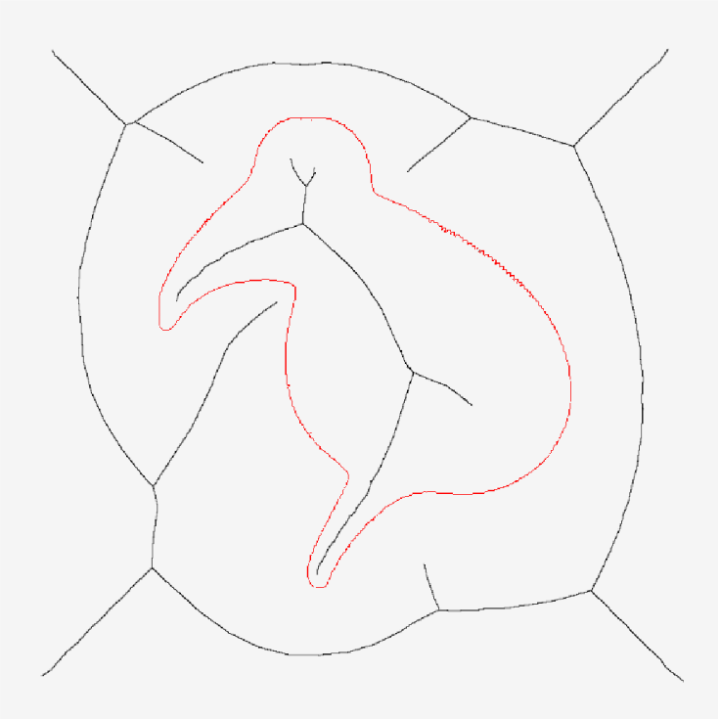
Image Originale

Principe

Obtenir des maillages adaptatifs en mesurant une information géométrique.

[2] Dardenne, J., Valette, S., Siauve, N., Prost, R. : Génération de maillages triangulaires adaptatifs 2D avec des Diagrammes de Voronoï Centroïdaux. In : Gretsi '09.

Générations de maillages adaptatifs



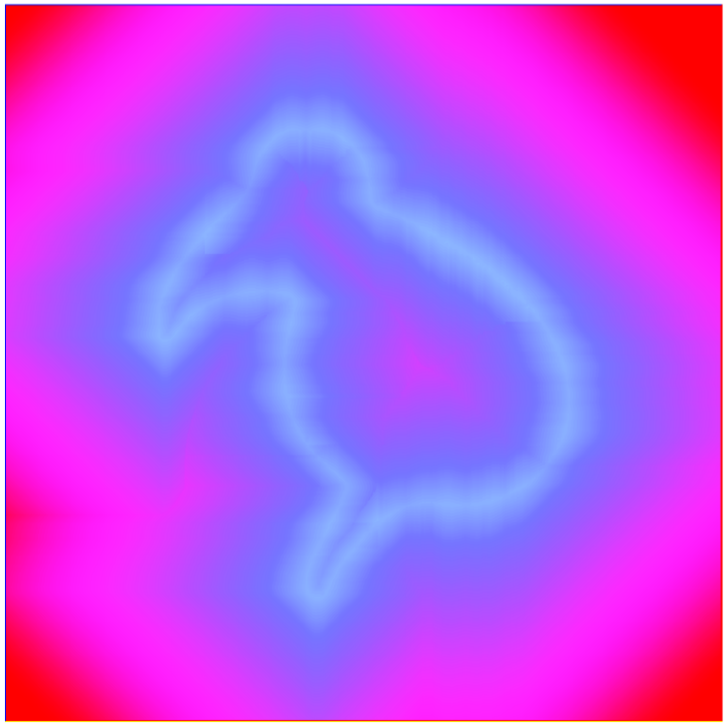
Axe médian

Axe médian

L'axe médian permet de définir une carte de densité ρ basée sur la largeur locale (Local Feature Size).

[3] J. Dardenne, S. Valette, N. Siauve and R. Prost. Medial axis approximation with constrained centroidal voronoi diagrams on discrete data. In Computer Graphics International, pages 299–306, June 2008.

Générations de maillages adaptatifs



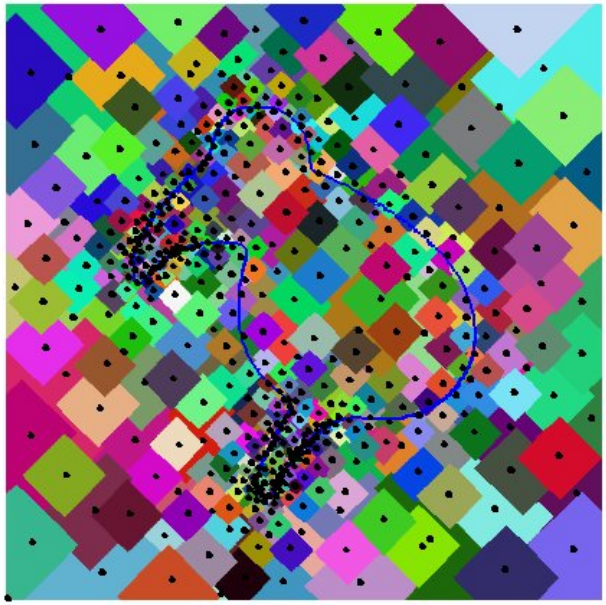
Carte de densité

Carte de densité

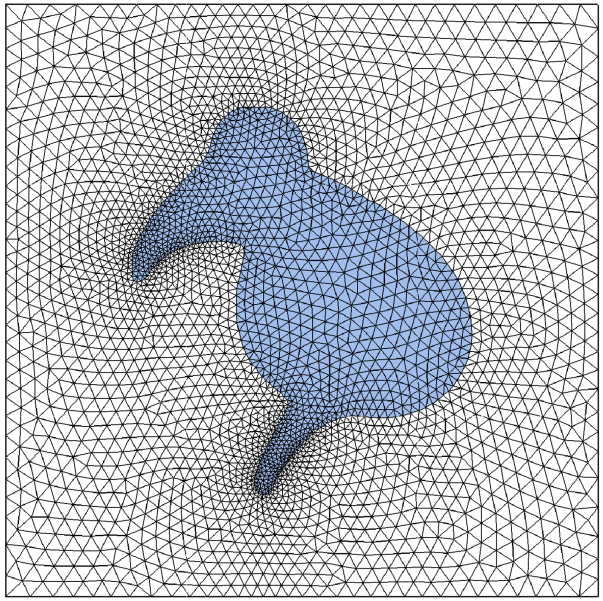
Ajouter une carte de densité permet de mailler plus finement certaines régions de l'image en imposant une densité souhaitée.

Générations de maillages adaptatifs

Partitionnement

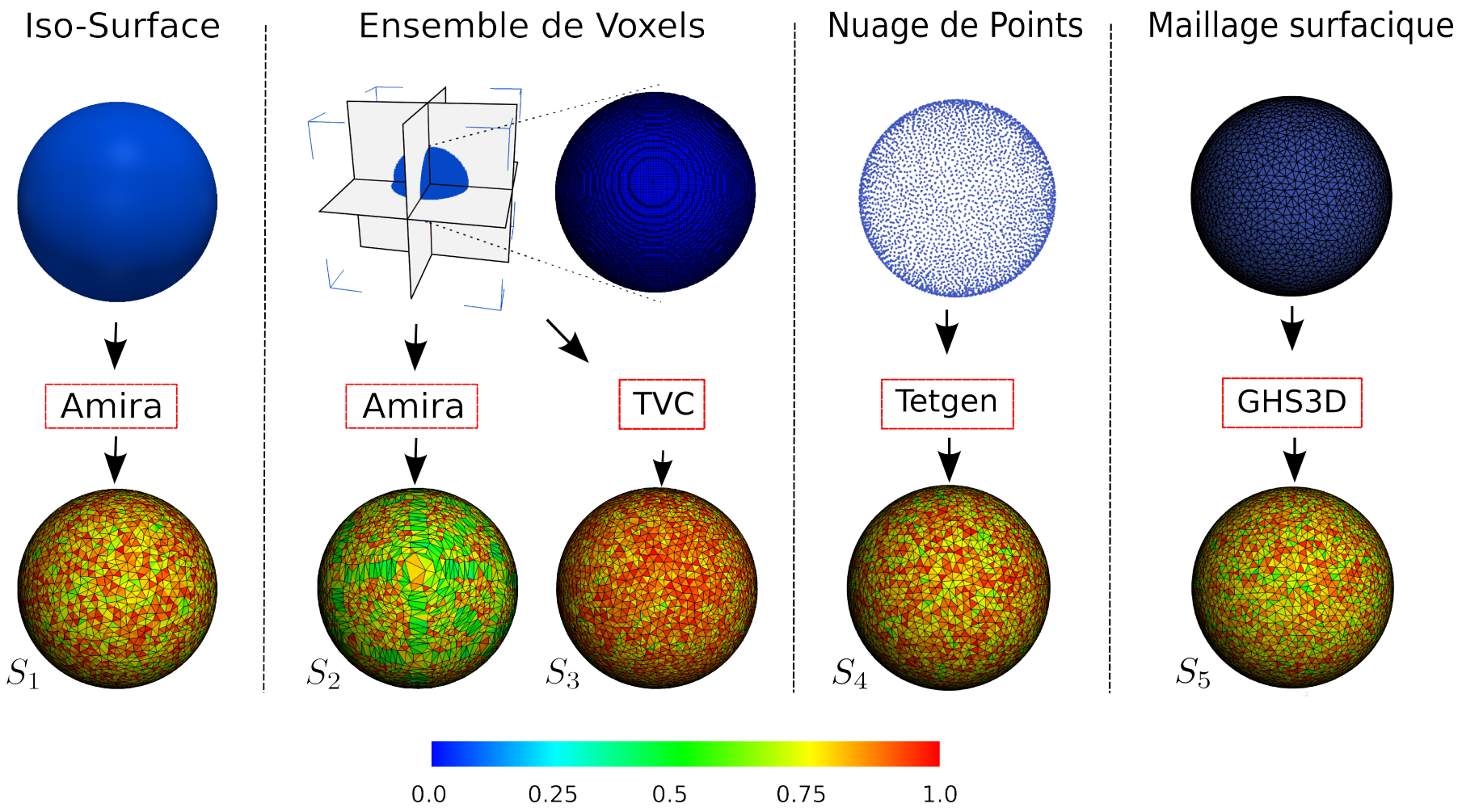


Triangulation



[2] Dardenne, J., Valette, S., Siauve, N., Prost, R. : Génération de maillages triangulaires adaptatifs 2D avec des Diagrammes de Voronoï Centroïdaux. In : Gretsi '09.

Qualité de la modélisation

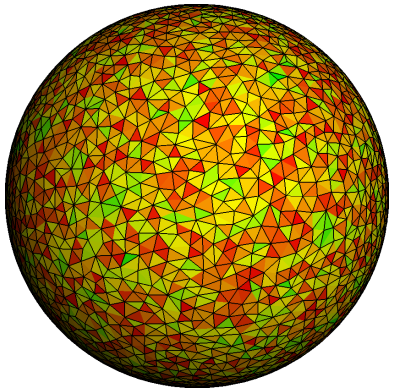


Qualité de la modélisation

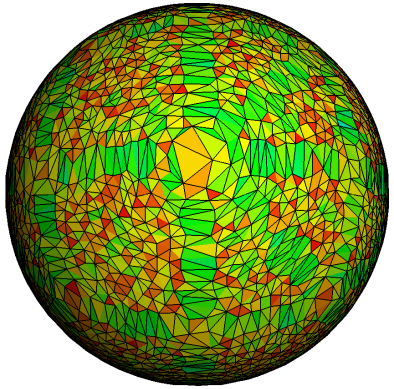
Modélisation thermique

Résolution de l'équation de bio chaleur par éléments finis :

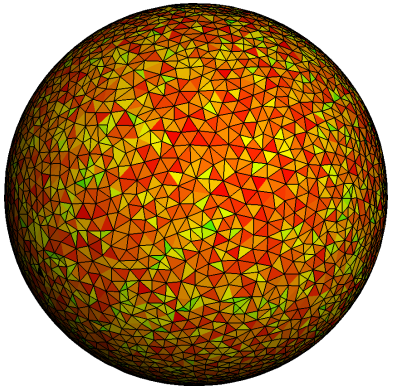
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(k \nabla T) - C_b \omega_b (T - T_a) + Q_{em} + Q_m \tag{2}$$



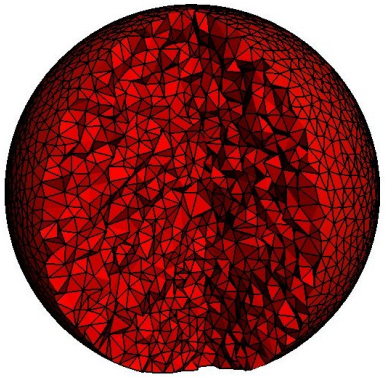
S_1



S_2



S_3



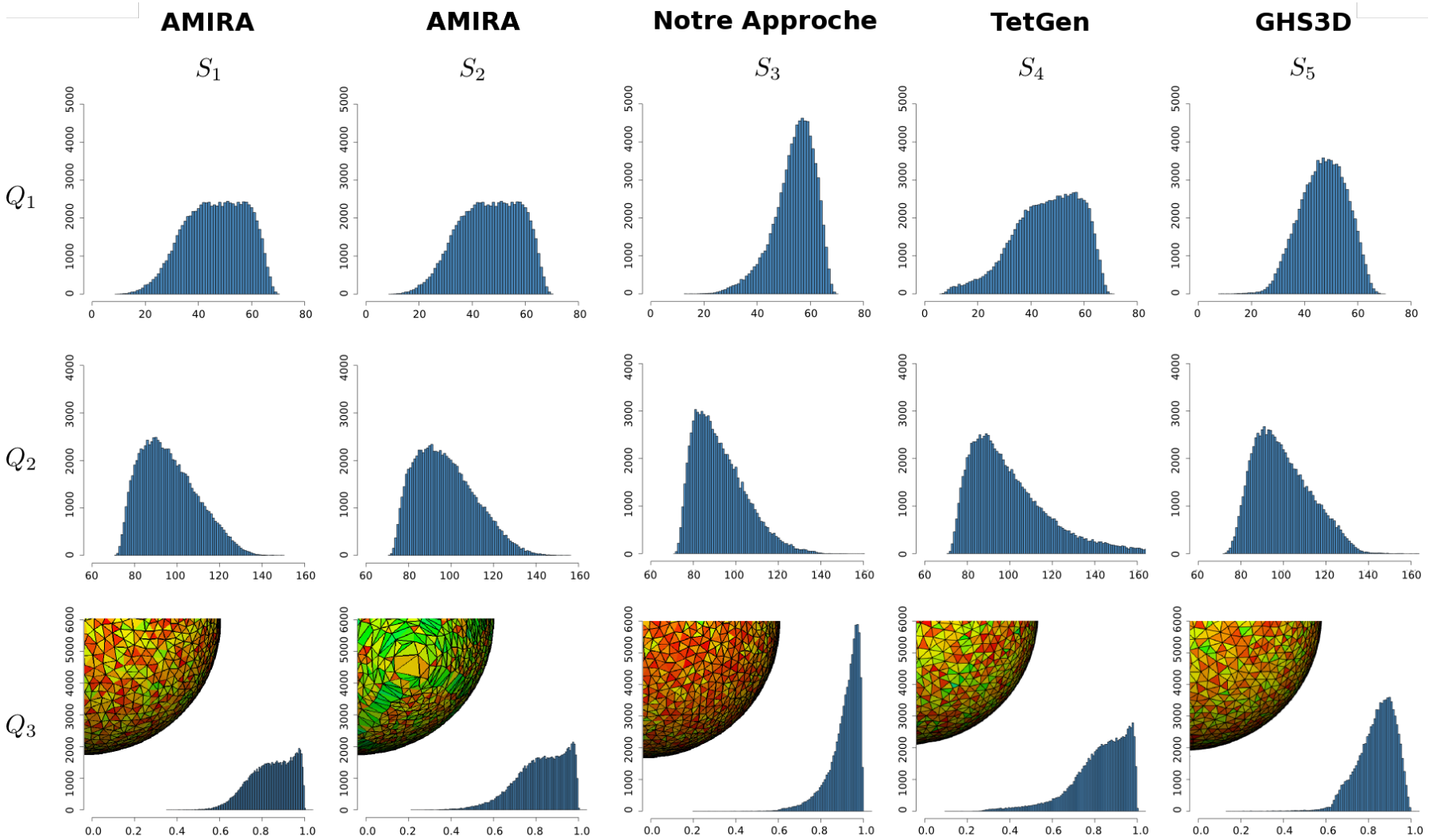
Simulation

Qualité Vs Précision

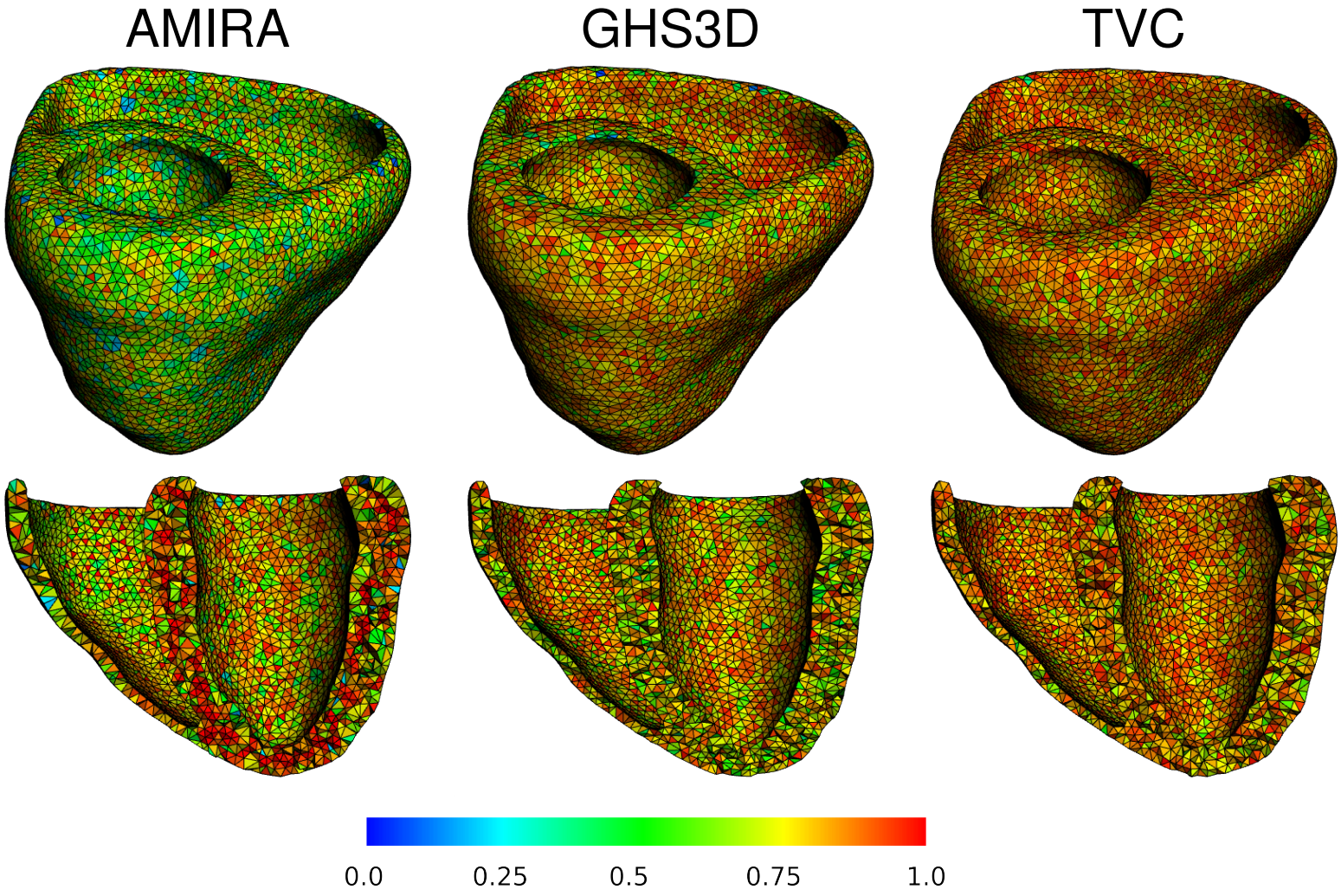
Résultats pour la résolution par MEF en électromagnétisme (1) et en thermique (2). AMIRA : S_1, S_2. Notre approche (TVC) : S_3. TetGen : S_4. GHS3D : S_5

Mailleurs	AMIRA	AMIRA	TVC	TetGen	GHS3D
Critères	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
$\overline{Q_1}$	51.97°	50.88°	56.32°	47.07148°	46.00°
$\overline{Q_4}$	0.843	0.824	0.911	0.838	0.823
$\min(Q_1)$	13.41°	10.12°	16.31°	8.00°	6.72°
$\min(Q_4)$	0.362	0.282	0.376	0.20	0.176
ε_{max} (1)	0.035°C	0.094°C	0.047°C	0.075°C	0.033°C
ε_{rms} (1)	0.010	0.061	0.025	0.011	0.010
# arêtes	100875	102274	101027	100972	101014
# itérations (1)	171	205	121	158	169
# itérations (2)	5002	5004	4004	4970	5001

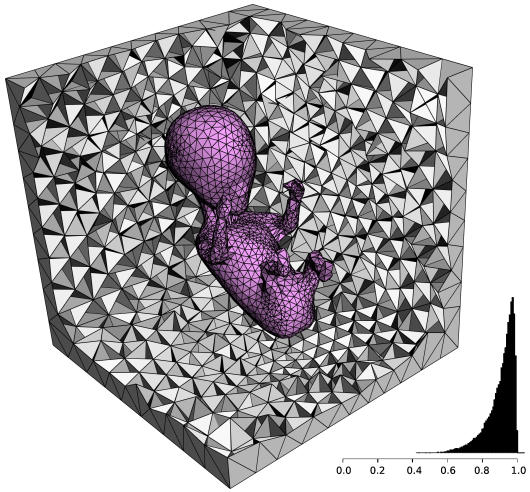
Qualité du maillage

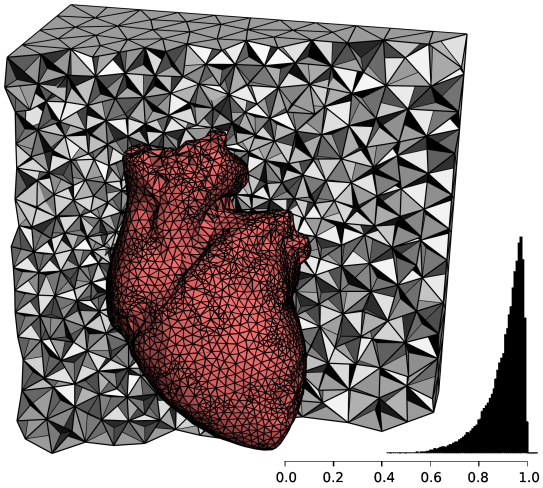


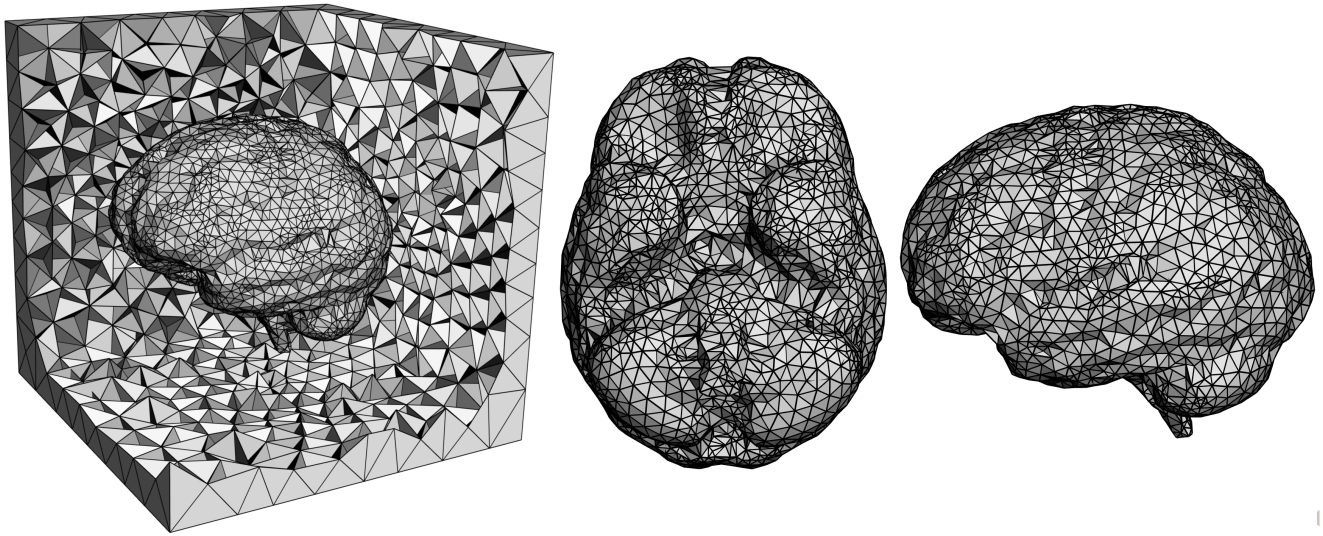
Modèles Anatomiques



Structures Anatomiques



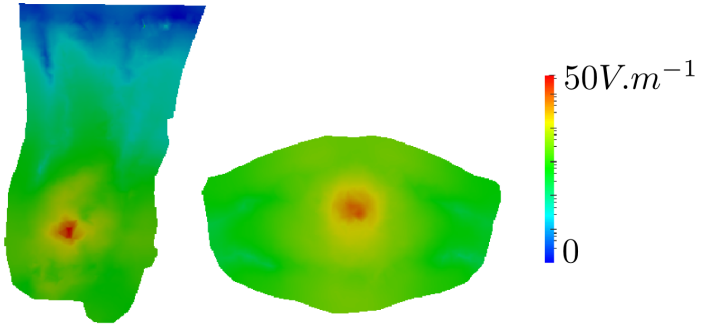


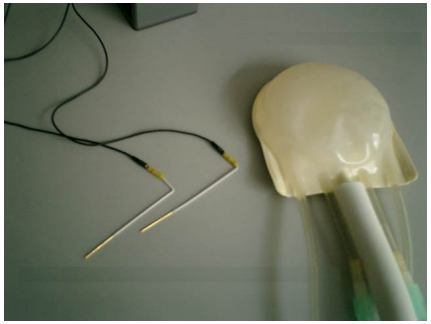


Comparaison dans le cadre de l'hyperthermie

Dispositif d'hyperthermie

Configuration réaliste utilisée en hyperthermie basée sur une antenne interstitielle reliée à un générateur émettant à 433 MHz.

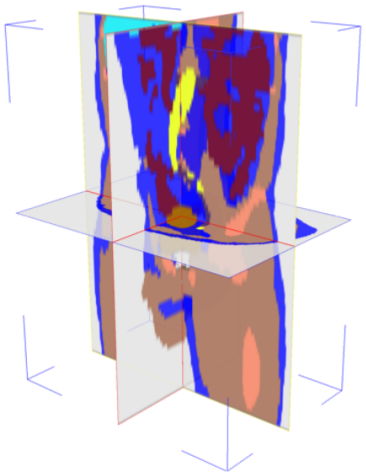


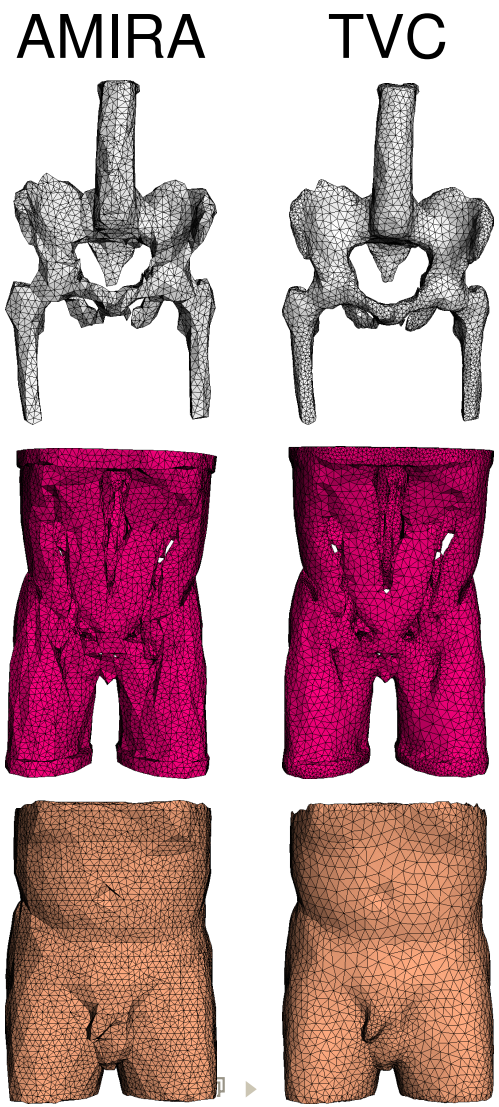


Comparaison dans le cadre de l'hyperthermie

Modèle patient

Neuf organes : muscle, graisse, os, intestin, reins, foie, vessie, artères et tumeur.
Dimensions : 256*512*65



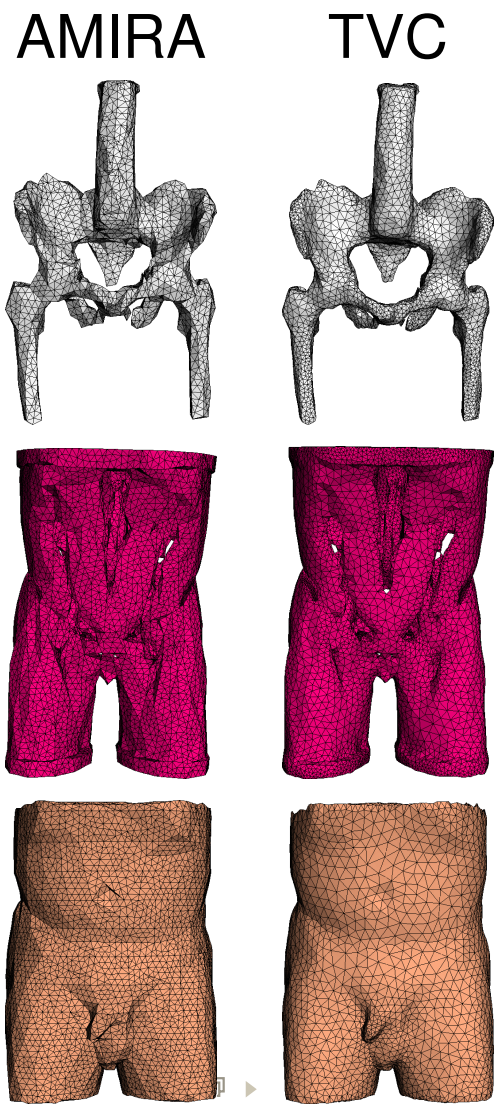


Comparaison dans le cadre de l'hyperthermie

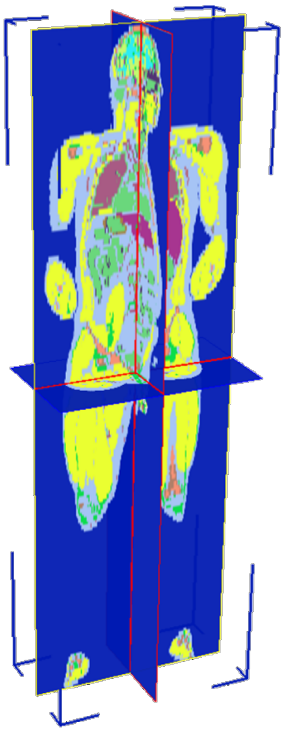
Problème couplé

simulation électromagnétique (1) et thermique (2)

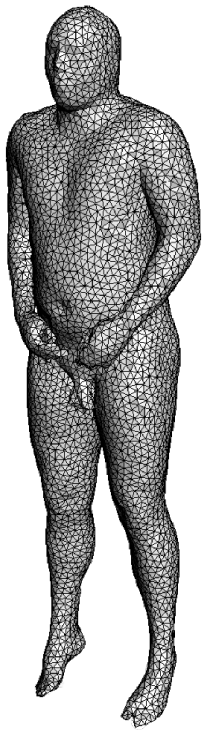
Critères	AMIRA	TVC
$\overline{Q_1}$	46.32°	52.28°
$\overline{Q_4}$	0.804	0.862
$\min(Q_1)$	0.19°	10.01°
$\min(Q_4)$	0.03	0.278
# points	39052	39100
# itérations (1)	166	128
# itérations (2)	130	82



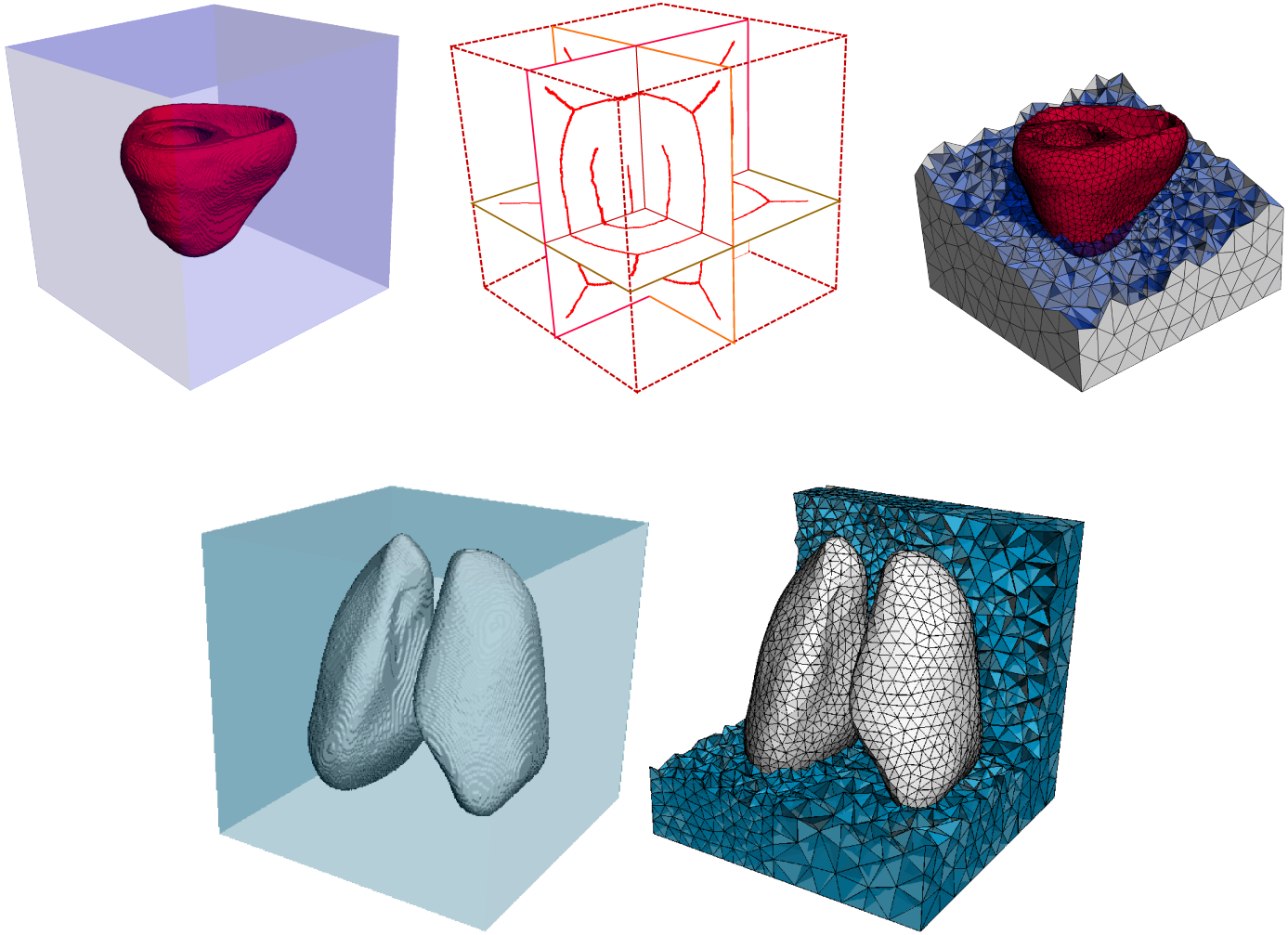
Conclusions



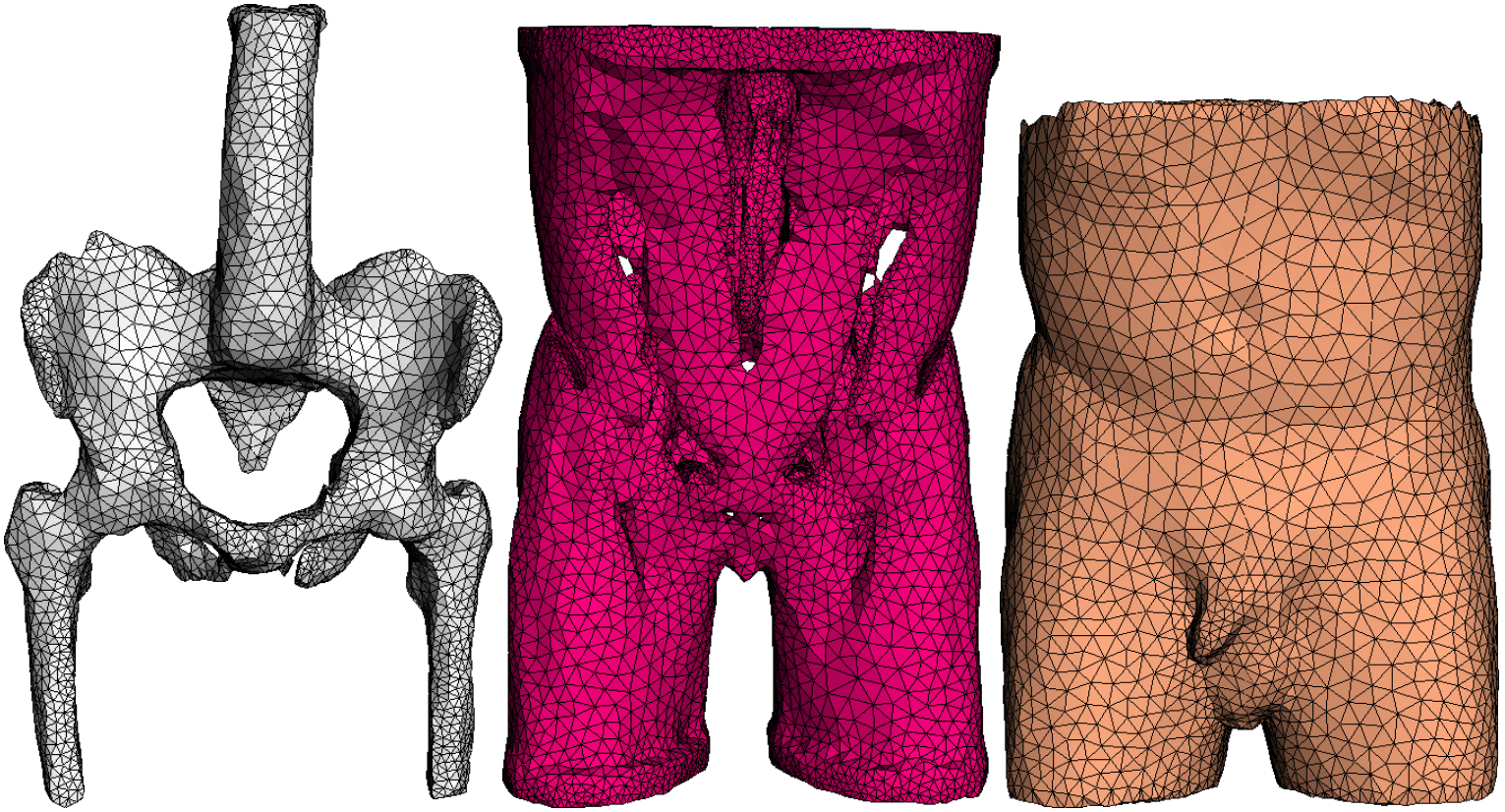
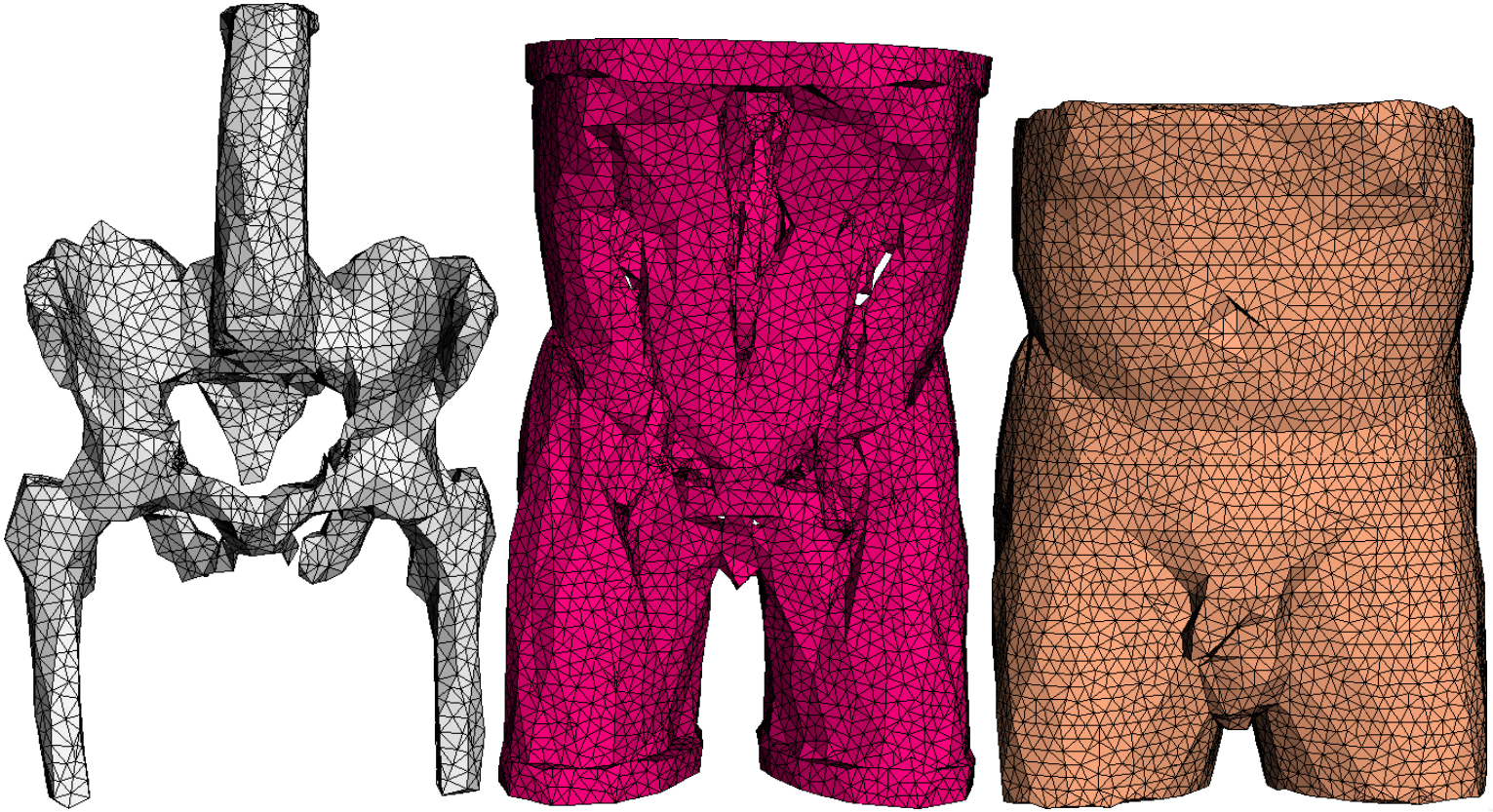
- Approche discrète : traitement direct des voxels.
- Approche variationnelle : Obtention de maillage avec une densité non uniforme de tétraèdres de très bonne qualité.



Merci pour votre attention.



TVC



Amira