

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITÉ FRANÇOIS RABELAIS DE TOURS

Département Informatique

64 avenue Jean Portalis

37200 Tours, France

Tél. +33 (0)2 47 36 14 14

[www.polytech.univ-tours.fr](http://www.polytech.univ-tours.fr)

**Projet Recherche & Développement  
2015-2016**

**Reconstitution du modèle d'une glène**

**Tuteurs académiques**

Julien BERHOUEZ

Mohamed SLIMANE

Christian PROUST

**Étudiants**

Min JIANG (DI5)

# Liste des intervenants

Nom	Mail	Qualité
Min JIANG	<a href="mailto:min.jiang@univ-tours.fr">min.jiang@univ-tours.fr</a>	Étudiant DI5
Julien BERHOUET	<a href="mailto:julien.berhouet@gmail.com">julien.berhouet@gmail.com</a>	Tuteur académique, Hôpital Trousseau
Mohamed SLIMANE	<a href="mailto:mohamed.slimane@univ-tours.fr">mohamed.slimane@univ-tours.fr</a>	Tuteur académique, Département informatique
Christian PROUST	<a href="mailto:christian.proust@univ-tours.fr">christian.proust@univ-tours.fr</a>	Tuteur académique, Département informatique

# Avertissement

Ce document a été rédigé par Min JIANG susnommé l'auteur.

L'école polytechnique de l'université François Rabelais de Tours est représentée par Julien BERHOUE, Mohamed SLIMANE et Christian PROUST susnommés les tuteurs académiques.

Par l'utilisation de ce modèle de document, l'ensemble des intervenants du projet acceptent les conditions définies ci-après.

L'auteur reconnaît assumer l'entière responsabilité du contenu du document ainsi que toutes suites judiciaires qui pourraient en découler du fait du non respect des lois ou des droits d'auteur.

L'auteur atteste que les propos du document sont sincères et assument l'entière responsabilité de la véracité des propos.

L'auteur atteste ne pas s'approprier le travail d'autrui et que le document ne contient aucun plagiat.

L'auteur atteste que le document ne contient aucun propos diffamatoire ou condamnable devant la loi.

L'auteur reconnaît qu'il ne peut diffuser ce document en partie ou en intégralité sous quelque forme que ce soit sans l'accord préalable des tuteurs académiques.

L'auteur autorise l'école polytechnique de l'université François Rabelais de Tours à diffuser tout ou partie de ce document, sous quelque forme que ce soit, y compris après transformation en citant la source. Cette diffusion devra se faire gracieusement et être accompagnée du présent avertissement.

## Pour citer ce document :

Min JIANG, *Reconstitution du modèle d'une glène*, Projet Recherche & Développement, Ecole Polytechnique de l'Université François Rabelais de Tours, Tours, France, 2015-2016.

```
@mastersthesis{
  author={JIANG, Min},
  title={Reconstitution du modèle d'une glène: },
  type={Projet Recherche \& Développement},
  school={Ecole Polytechnique de l'Université François Rabelais de Tours},
  address={Tours, France},
  year={2015-2016}
}
```

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction et Remerciements</b>	<b>1</b>
1	Introduction.....	1
2	Remerciements .....	1
<b>I</b>	<b>Recherche</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Présentation du contexte</b>	<b>3</b>
1	Réalité augmentée : perspectives dans le domaine de la santé .....	3
2	Présentation du grand projet " Omoplate " et se sous-projets.....	3
2.1	Epaule, omoplate, glène .....	4
2.2	Projet " Omoplate " et ses sous-projets.....	5
<b>3</b>	<b>Définition du projet " Reconstitution d'une glène "</b>	<b>11</b>
1	Objectif du projet .....	11
2	Découpages des tâches .....	11
<b>4</b>	<b>Les états de l'art nécessaires et suffisants</b>	<b>13</b>
1	Notions des images & modélisation 3D, modèle en maillage et fichier .obj.....	13
2	Logiciel Blender.....	16
3	Logiciel 3DReshaper.....	16
4	Logiciels de modélisation de nuage de points .....	17
5	Clustering hiérarchique.....	17
6	Évaluation de la technique Morphing à l'égard de mon projet.....	19
7	Triangulation de Delaunay.....	20

<b>5</b>	<b>Description &amp; réalisation du projet</b>	<b>21</b>
1	Calculer le nuage de points & Construire un modèle de maillage.....	21
1.1	Calculer les distances entre Y.....	21
1.2	Calculer les coordonnées des points sur la glène.....	22
2	Déformation de la glène construite à la glène générique .....	24
2.1	Obtention d'un premier modèle d'une glène à partir du nuage de points .....	24
2.1.1	Obtention de la glène B .....	24
2.1.2	Obtention de la glène B' .....	25
2.2	Déformation de la glène générale A.....	25
2.3	Obtention de la glène reconstituée de A et B.....	26
2.3.1	Déformation de B' vers A' avec " Shrinkwrap ".....	26
2.3.2	Le taux de déformation : Shape Keys .....	27
3	L'ensemble du processus de reconstitution de glène.....	27
<b>II</b>	<b>Développement</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>Mise en oeuvre de l'algorithme : calculer X</b>	<b>31</b>
1	Préparation des données .....	31
2	Description du programme.....	31
<b>7</b>	<b>Campagne de tests et résultats d'application des tests</b>	<b>34</b>
1	Tests : reconstitution de modèle grossière à partir de nuage de point.....	34
2	Tests : Généralisation d'une glène générique .....	36
2.1	Introductions des fichiers référencés .....	36
2.2	Etablissement des groupes d'omoplate suite à une analyse des dendrogrammes .....	36
2.3	Découpage des glènes.....	39
2.3.1	Pré-traitement des omoplastes .....	39
2.3.2	Découpage d'une glène .....	39
2.4	Fusionner les glènes.....	41
3	Observation des résultats .....	41
<b>8</b>	<b>Méthodologie de suivi et de gestion du projet</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>44</b>
1	Conclusion pour la partie de la recherche.....	44
2	Conclusion pour la partie du développement .....	44
	<b>Annexes</b>	<b>46</b>
<b>A</b>	<b>Ma deuxième annexe</b>	<b>47</b>

# Table des figures

<b>2</b>	<b>Présentation du contexte</b>	
1	Une opération chirurgicale utilisant la technologie réalité augmentée .....	4
2	Omoplate gauche, vue antérieure .....	5
3	Omoplate droite, vue latérale .....	6
4	Des points représentatifs sur une omoplate, vue antérieure et postérieure .....	7
5	Des points représentatifs sur une omoplate, vue latéral .....	8
6	exemples d'équations attendues.....	9
7	La partie atrophiée sur une omoplate.....	9
8	La glène à reconstruire .....	10
9	Relations entre les trois sous-projets d"Omoplate" .....	10
<b>3</b>	<b>Définition du projet " Reconstitution d'une glène "</b>	
1	Diagramme de flux de données.....	12
<b>4</b>	<b>Les états de l'art nécessaires et suffisants</b>	
1	Un exemple du maillage d'une sphère.....	14
2	Logo : 3DReshaper.....	16
3	Le plug-in PointCloud Skinner sous Blender .....	18
4	Résultat de modélisation d'une glène avec PointCloud Skinner.....	18
5	Résultat de modélisation d'une glène avec 3DReshaper .....	19
<b>5</b>	<b>Description &amp; réalisation du projet</b>	
1	Le résultats des équation régression multiple de David BOAS .....	22
2	Modifier Subdivision surface .....	25
3	Les distances dans les deux glènes.....	26
4	Le modifier Shrinkwrap .....	27
5	La donnée d'objet : Shape Keys .....	28
6	L'ensemble du processus de la reconstitution de la glène .....	29

<b>6</b>	<b>Mise en oeuvre de l'algorithme : calculer X</b>	
1	Exemple d'un fichier .csv .....	32
2	Résultats des calculs .....	33
3	Relations entre classes .....	33
<b>7</b>	<b>Campagne de tests et résultats d'application des tests</b>	
1	12 Points importés .....	35
2	Glène grossière .....	35
3	Glène "Smoothin" .....	35
4	Configuration de repère lors de l'importation .....	36
5	Dendrogramme avec la méthode « Ward+Euclidien » .....	37
6	Dendrogramme avec la méthode « saut maximum + euclidien » .....	37
7	Dendrogramme avec la méthode « ward+manhattan » .....	37
8	Dendrogramme avec la méthode «saut maximum + manhattan » .....	38
9	Classifications de omoplates .....	38
10	Numéros des glène à regrouper .....	38
11	Fixer son origine .....	39
12	Mesurer la distance entre deux points .....	40
13	Découpage d'une glène .....	40
14	Découpage d'une glène .....	41
15	Modèles de 5 glènes découpées .....	41
16	Fusionnement de la glène C et la glène 25 .....	42
17	Glène finale.....	42
<b>8</b>	<b>Méthodologie de suivi et de gestion du projet</b>	
1	Diagramme de Gantt .....	43



# Liste des tableaux

## 5 Description & réalisation du projet

1	Les distances significatives sur les glènes.....	26
---	--	----

# 1

## Introduction du projet et remerciements

Dans le cadre d'enseignements du département d'informatique de Polytech Tours, les étudiants de la 5ème année sans contrat professionnalisation sont tenus d'effectuer un projet de recherche et de développement. Ce rapport concerne donc un projet et développement : Reconstitution du modèle en 3D d'une glène.

### 1 Introduction

Ce projet fait partie du projet " Omoplate " à la demande du Dr Julien Berhouet (équipe du Pr Favard, Hôpital Trousseau), qui cherche à reconstituer une partie d'omoplate depuis quatre ans. Ce projet a pour but d'améliorer les opérations chirurgicales d'omoplates en optimisant les formes des prothèses des glènes et en augmentant la précision des localisations des nouvelles glènes. Le projet " omoplate " vise à se servir de nouvelles technologies dans le domaine de la réalité augmentée : 3D modélisation et les lunettes connectées. Son aboutissement nécessite des données dont les mesures dureront plusieurs années. Dans ce rapport, nous supposons disposer déjà de certaines d'entre elles.

### 2 Remerciements

Je souhaiterais avant tout remercier mes encadrants et mes camarades de m'avoir assisté et aidé tout au long de mon projet.

Je remercie d'abord M.SLIMANE Mohamed et M.PROUST Christian pour leurs encadrements et leurs conseils à fin de mener à bien ce projet. Ils sont toujours patients, encourageants et sans réserve.

Je remercie également M.BERHOUET d'être intervenu pour toutes mes questions et toutes ses suggestions.

Je remercie M.ROUSSEAU Mickael, qui s'est occupé lors de la demande de licences pour des logiciels utilisés dans mon projet.

Je voudrais aussi remercier l'entreprise TECHNODIGIT de m'avoir fourni leur application 3DReshaper, et M.LANDRIVON Nicolas d'avoir répondu rapidement à mes questions ainsi que m'avoir offert les licences pour utiliser leur application.

Enfin, je remercie M.VOISIN Théo et M.ZHANG Minghui, deux étudiants dans notre équipent travaillant sur le projet « Epaule ». Nous nous sommes aidés et avons échangé nos opinions pendant nos travaux.

## Première partie

# Recherche

La première partie du PR&D est consacrée à étudier des documents, à comprendre la problématique, à lire des ouvrages nécessaires à l'appréhension de la problématique, à apprendre à utiliser divers logiciels, et enfin, à proposer une solution faisable pour reconstituer un modèle d'une glène.

# 2

## Présentation du contexte

### 1 Réalité augmentée : perspectives dans le domaine de la santé

Le projet " omoplate " est un projet concret ayant des significations en et en pratique qui exploite des techniques du domaine de la réalité augmentée. Il est le résultat de la combinaison entre la réalité augmentée et la médecine chirurgicale moderne.

La réalité augmentée est intégrée dans notre vie après plusieurs phases de développements. Avec l'avancement des techniques, la réalité augmentée a été appliquée non seulement dans les domaines militaire et la simulation d'espace, mais aussi dans les domaines du divertissement, de la santé, ou encore du design d'intérieur, . . . etc.

Bien que la technologie de la réalité augmentée continue à être améliorée, et est appliquée à de nombreux domaines, il y a encore beaucoup de gens qui maintiennent une attitude attentiste et doutent de la pérennité et de la fiabilité de cette technologie. Cependant, en suivant le domaine du jeu, de plus en plus d'industries ont fabriqué de nouveaux produits grâce à la réalité augmentée, spécialement en domaine de la santé.

La santé a toujours été une industrie très spéciale parce qu'une opération mineure au cours d'une intervention chirurgicale est liée à la vie du patient, le chirurgien est donc amené à pratiquer continuellement les outils servis pendant les opérations. Le système virtuel peut mieux aider les chirurgiens à pratiquer des exercices avant d'effectuer de telles opérations en conditions réelles. En même temps, les technologies de modélisation et d'impression 3D aident également à la reconstitution des organes ainsi qu'à améliorer le taux de réussite des opérations chirurgicales.

Dans un tel contexte où les conditions techniques et de l'équipement sont satisfaites, le projet " omoplate " est donc né en temps opportun.

### 2 Présentation du grand projet " Omoplate " et se sous-projets

Le projet complet consiste à pouvoir modéliser, en 3D, une omoplate. Plus précisément, c'est une partie atrophiée au bout de l'omoplate qu'il est intéressant de reconstruire, dite une glène. En réalité, nous voulons être capables de reconstituer virtuellement une omoplate à laquelle il manquerait une partie, la glène en particulier. La glène est souvent usée par des maladies ou des accidents divers, ou bien le vieillissement notamment lors de la pratique intensive de certains sports ou de certains métiers physiques.



**Figure 1** – Une opération chirurgicale utilisant la technologie réalité augmentée

## 2.1 Epaule, omoplate, glène

- En médecine, une **épaule** est la partie qui permet la jonction du tronc avec le membre supérieur au niveau du bras. Elle comporte plusieurs articulations qui concourent à en faire l'articulation la plus mobile du corps humain.
- Une **omoplate** est aussi appelée une scapula, elle est la partie d'os essentielle dans cette articulation. Elle est un os plat, pair, symétrique et de forme triangulaire. Elle est distinguée en : deux faces, antérieure et postérieure ; trois bords, médial, latéral et supérieur ; trois angles, inférieur, supéro-médial et supéro-latéral. **Figure 2** et **Figure 3** ci-dessous illustrent les structures anatomiques d'une omoplate gauche vue antérieure et d'une omoplate droite vue latérale (source d'images : wikipédia).
- Une cavité glénoïde, ou dans ce rapport, une **glène**, est une cavité articulaire de certains os. Elle est généralement peu profonde voire presque plane qui reçoit la tête d'un autre os. Cela est par définition une caractéristique de certaines articulations, comme le cas de l'omoplate. Elle peut cependant être assez profonde, allant jusqu'à la demi-sphère comme dans l'articulation de la hanche.

La glène de l'omoplate s'articule avec la tête de l'humérus. Des ligaments et tendons maintiennent la tête de l'humérus dans la cavité de l'omoplate.

Les articulations constituées de la glène et de la tête de l'humérus font parties des articulations les plus utilisées dans le corps humain. Une glène est donc souvent atrophiée en une variété de raison comme le sport et le vieillissement. A cet effet, la chirurgie cherche depuis longtemps à réparer, ou opérer la glène malade. Une des façons cherchées par l'équipe de l'hôpital Trousseau est de construire une prothèse de la glène malade est de la placer à la place appropriée afin d'être au plus proche de la glène lorsqu'elle était saine (sans avoir de données sur cette glène saine).

La position de la glène est indiquée dans **Figure 2** et **Figure 3**, affichée en tant que "cavité glénoïde".

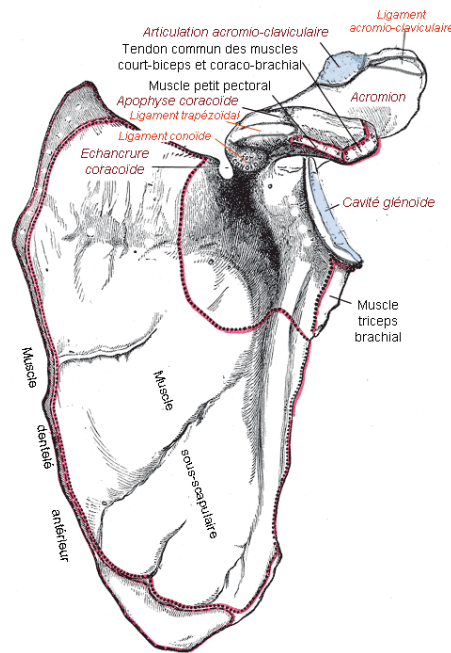


Figure 2 – Omoplate gauche, vue antérieure

## 2.2 Projet " Omoplate " et ses sous-projets

Le chirurgien nous fournit des coordonnées des points sur une omoplate malade. Les coordonnées sont des coordonnées tridimensionnelles et sont les résultats d'un scanner préopératoire. Limitée par l'exactitude du scanner et par le temps, jusqu'à présent nous ne pouvons obtenir qu'environ 70 000 points sur une omoplate.

Le projet " Omoplate " peut être divisé en 3 sous-projets :

### — Typologie des omoplastes

Ce projet a été attribué à M.BOAS David de 2014 à 2015 et a été continué par M.VOISIN Théo en 2015 – 2016. Le projet porte sur l'étude de la structure géométrique d'une omoplate. Grâce à l'analyse d'omoplastes saines, ce projet cherche des formules mathématiques permettant de reconstituer la morphologie initiale et saine d'une omoplate malade (à laquelle il manque la glène). Une quarantaine de fichiers 3D sous format .obj sont à la disposition pour la , chacun de ces fichiers décrit une omoplate saine en donnant toutes les coordonnées de ces points.

Le but est d'étudier ces données afin de trouver, via une analyse de données, des traits communs, des formules mathématiques de distances euclidiennes sur une omoplate permettant de reconstituer une omoplate saine à partir d'une omoplate endommagée. Autrement dit, après une série d'analyses, abstractions et généralisation d'une base de données qui contient des coordonnées géométriques complètes des omoplastes saines, nous voulons pouvoir connaître des coordonnées d'une autre omoplate quelconque à laquelle il manque une partie (la partie endommagée par l'usure ou une malformation).

Pour chacune des omoplastes, 20 points caractéristiques et représentatifs sont pris en considération. **Figure 4** et **Figure 5** nous montrent la répartition des points. L'accent est donc mis sur les distances entre les points ainsi que les angles composés par les arêtes reliant ces points. En considérant la demande de précision et pour améliorer la qualité des mesures, le nombre de points étudiés devra augmenter dans les années qui viennent.

Les notations utilisées dans le travail de BOAS et de VOISIN sont comme ci-dessous : La variable  $Y$  est une distance euclidienne entre deux points de l'omoplate dont un, au moins, est sur

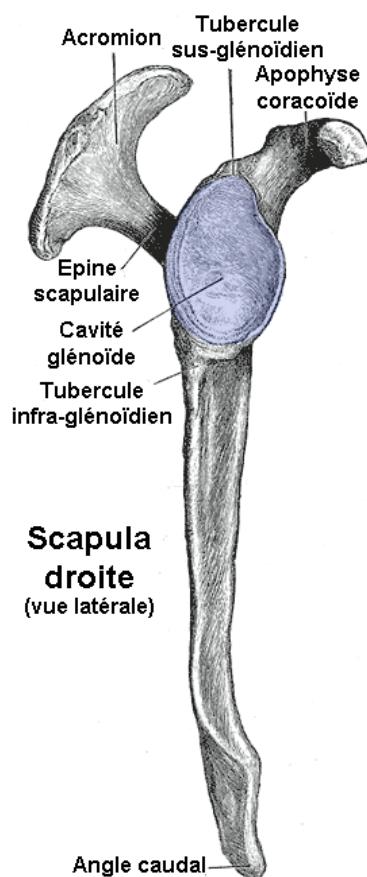


Figure 3 – Omoplate droite, vue latérale

la glène. La variable  $X$  est une distance euclidienne entre deux points de l'omoplate dont aucun n'est sur la glène.

Pour aller, plus loin, les distances étudiées sont :

Les 31 distances  $Y$  :  $Y_{1,2}$ ,  $Y_{3,4}$ ,  $Y_{1,7}$ ,  $Y_{2,7}$ ,  $Y_{3,7}$ ,  $Y_{4,7}$ ,  $Y_{7,8}$ ,  $Y_{7,14}$ ,  $Y_{7,15}$ ,  $Y_{7,16}$ ,  $Y_{7,17}$ ,  $Y_{7,18}$ ,  $Y_{7,19}$ ,  $Y_{7,20}$ ,  $Y_{2,13}$ ,  $Y_{13,14}$ ,  $Y_{13,15}$ ,  $Y_{6,14}$ ,  $Y_{6,15}$ ,  $Y_{1,12}$ ,  $Y_{2,12}$ ,  $Y_{3,12}$ ,  $Y_{4,12}$ ,  $Y_{8,12}$ ,  $Y_{12,14}$ ,  $Y_{12,15}$ ,  $Y_{12,16}$ ,  $Y_{12,17}$ ,  $Y_{12,18}$ ,  $Y_{12,19}$ ,  $Y_{12,20}$ .

Les 13 distances  $X$  :  $X_{5,6}$ ,  $X_{5,7}$ ,  $X_{5,10}$ ,  $X_{5,11}$ ,  $X_{6,7}$ ,  $X_{6,9}$ ,  $X_{6,11}$ ,  $X_{7,9}$ ,  $X_{7,10}$ ,  $X_{7,12}$ ,  $X_{9,10}$ ,  $X_{9,11}$ ,  $X_{9,12}$ .

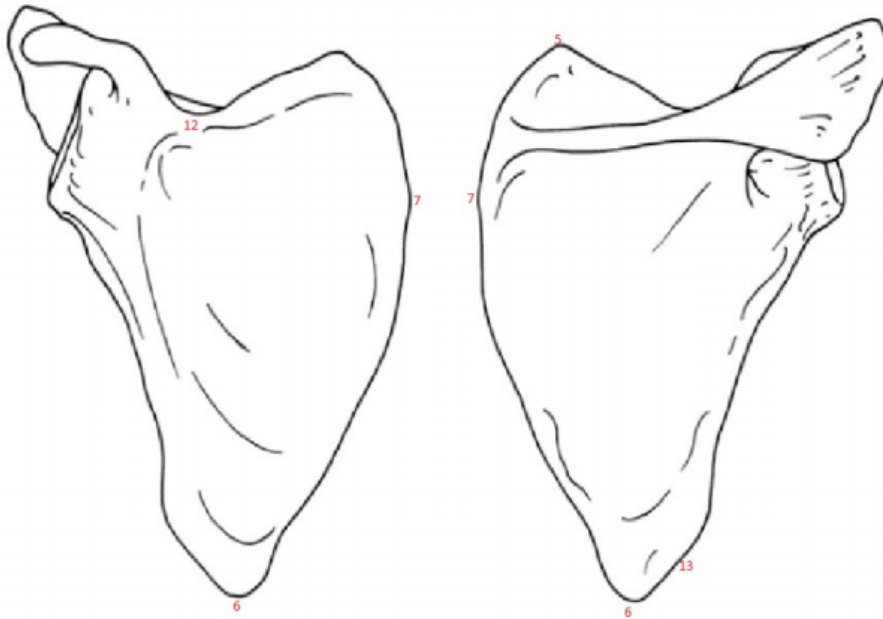
Les angles étudiés sont :

**Angle A** : l'angle entre  $\overrightarrow{V_{p1,p2}}$  et  $\overrightarrow{V_{p2,p6}}$   
**Angle E** : l'angle entre  $\overrightarrow{V_{p2,p6}}$  et  $\overrightarrow{V_{p5,p6}}$   
**Angle F&G** : l'angle entre  $\overrightarrow{V_{p5,p7}}$  et  $\overrightarrow{V_{p6,p7}}$

A la sortie du projet, des équations comme Figure 6 sont attendues.

#### — Reconstitution virtuelle d'une glène manquante sur une omoplate

Etant donné une omoplate endommagée spécifique, également des équations qui sont les résultats du projet « Typologie des omoplates », nous pouvons calculer les coordonnées des points sur la glène de l'omoplate. Nous souhaitons reconstituer en 3D un modèle concret d'une glène sous forme de maillage. Nous ajoutons aussi un modèle 3D d'une glène générique pour rendre plus réaliste le modèle à construire. Figure 7 et Figure 8 visualise en 3D la partie manquante (partie en rouge) à reconstruire. Les deux images sont des résultats du projet PIL 2014-2015.



**Figure 4** – Des points représentatifs sur une omoplate, vue antérieure et postérieure

Il s'agit donc de concevoir une démarche qui permet de réaliser une telle reconstitution avec les éléments mentionnés.

Ceci est un nouveau projet qui n'a jamais été étudié.

#### — Opération d'omoplate à l'aide des lunettes 3D

En 2014 un premier travail a dressé un état de l'art des lunettes électroniques 3D. En 2015, un premier prototype est réalisé sur des lunettes BT200 de Epson issus des PFE de M.FACOMPRES Maxime 2014 – 2015 et Projet d'option de M.BOAS David et M.FACOMPRES Maxime. Le système actuel est capable de transmettre aux lunettes 3D portées par le chirurgien un dessin 3D de l'omoplate malade mais reconstituée. Dans la scène des lunettes, la partie existante de l'omoplate apparaît en couleur verte, la partie à réparer, c'est-à-dire la glène disparue, est affichée en couleur rouge. Le chirurgien superpose l'acquisition 3D des lunettes avec la partie de l'os réel vu pendant l'opération, il spécifie cette position initiale. Il pourra ensuite supposer l'état idéal de la partie manquante grâce à la visualisation permanente. L'image sur les lunettes se déforme de façon adéquate selon la position du regard du chirurgien.

En 2015-2016 ce projet se poursuit pour d'une part réaliser le logiciel dans un environnement libre et générique, et, d'autre part, caractériser scientifiquement la qualité des appariements et des poursuites de scène 3D sur des lunettes électroniques.

Ces trois sous-projets font l'objet de trois PR&D en 2015-2016. Ils prennent comme entrées les sorties d'un autre projet. Les relations entre les trois sous-projets sont présentées dans **Figure 9**. Les équations qui sortent du projet « typologie des omoplates » décrivent les relations de distances entre les points. Le modèle sortant du projet « reconstitution d'une glène » est demandé sous format .obj.

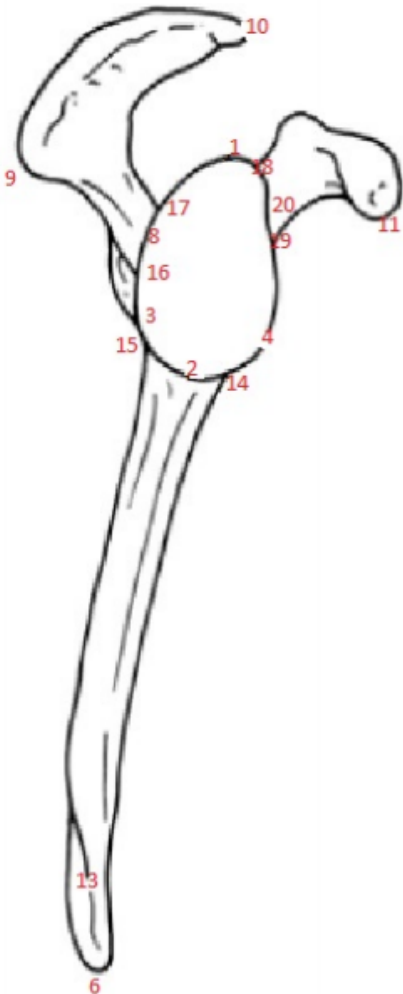


Figure 5 – Des points représentatifs sur une omoplate, vue latéral

Numéro	Equations : Globales	$R^2$ ajusté	Moyenne écarts
1	$Y_{2,7} = 0.20493X_{5,6} + 0.21845X_{5,11} - 0.14519X_{6,9} + 0.32906X_{7,9} + 44.30713$	0.75	2,207208681
2	$Y_{2,7} = 0.16677X_{5,6} - 0.21552X_{6,9} + 0.409X_{7,9} + 0.20905X_{10,11} + 0.37066X_{11,12} + 43.65133$	0.74	2,277961791
3	$Y_{7,19} = 0.19232X_{7,9} + 0.68508X_{7,12} + 0.2721X_{10,11} - 2.84573Cote : Gauche + 20.46473$	0.70	2,830316559
4	$Y_{7,20} = -0.19232X_{5,6} + 0.38258X_{5,7} + 0.32238X_{5,11} + 0.3768X_{6,11} + 22.47661$	0.80	2,067701798
5	$Y_{7,20} = 0.34367X_{5,6} + 0.35101X_{5,11} - 0.50902X_{6,7} + 0.41118X_{6,11} - 0.39408AngleFG + 65.88903$	0.79	2,004535864
Equations : Droites			
6	$Y_{6,15} = 0.2884X_{5,6} + 0.6886X_{10,11} + 55.4357$	0.60	4,85480406
7	$Y_{7,15} = 0.5912X_{6,11} + 0.7243X_{7,12} + 0.7593AngleA - 78.8028$	0.79	3,307961385
8	$Y_{7,18} = 0.37517X_{5,7} + 0.36305X_{5,11} + 0.25027X_{7,9} + 22.00914$	0.78	2,332626996
Equations : Gauches			
9	$Y_{6,15} = 0.6325X_{5,10} - 0.5173X_{5,11} + 0.5497X_{6,7} + 44.7412$	0.68	5,100982419
10	$Y_{2,7} = 0.33915X_{5,10} + 6.50045Sexe : M + 72.06428$	0.69	2,621014844
11	$Y_{2,7} = 0.26879X_{6,11} + 0.43752X_{7,12} + 33.89137$	0.71	2,417446834
12	$Y_{4,7} = 0.36682X_{5,10} + 6.93717Sexe : M + 65.95487$	0.70	2,774849672
13	$Y_{7,14} = 0.34765X_{5,10} + 6.08704Sexe : M + 67.52523$	0.64	3,213130291
14	$Y_{7,18} = 0.49845X_{7,10} - 0.30714AngleA + 52.0671$	0.89	2,266570769
15	$Y_{7,19} = 0.4635X_{7,12} + 0.5267X_{11,12} + 5.1708Sexe : M + 39.2793$	0.67	3,007456304
16	$Y_{12,14} = 0.1848X_{5,10} + 3.83626Sexe : M + 26.65591$	0.46	2,534198598
Equations : Hommes			
17	$Y_{6,15} = 0.25173X_{6,7} + 0.39499X_{7,9} + 54.16319$	0.40	4,829307601
18	$Y_{1,7} = 0.3816X_{7,9} + 0.5704X_{9,10} + 34.4586$	0.50	3,193075208
19	$Y_{1,7} = 0.265X_{5,6} - 0.2809X_{6,9} + 0.5162X_{7,9} + 50.4346$	0.42	3,332367091
20	$Y_{1,7} = -0.19132X_{6,7} + 0.48875X_{7,9} - 0.65296AngleA + 104.41555$	0.53	3,549652313
21	$Y_{7,20} = 0.31385X_{7,9} + 0.5103X_{9,10} + 0.44196AngleE + 30.11052$	0.58	2,834658829

Figure 6 – exemples d'equations attendues

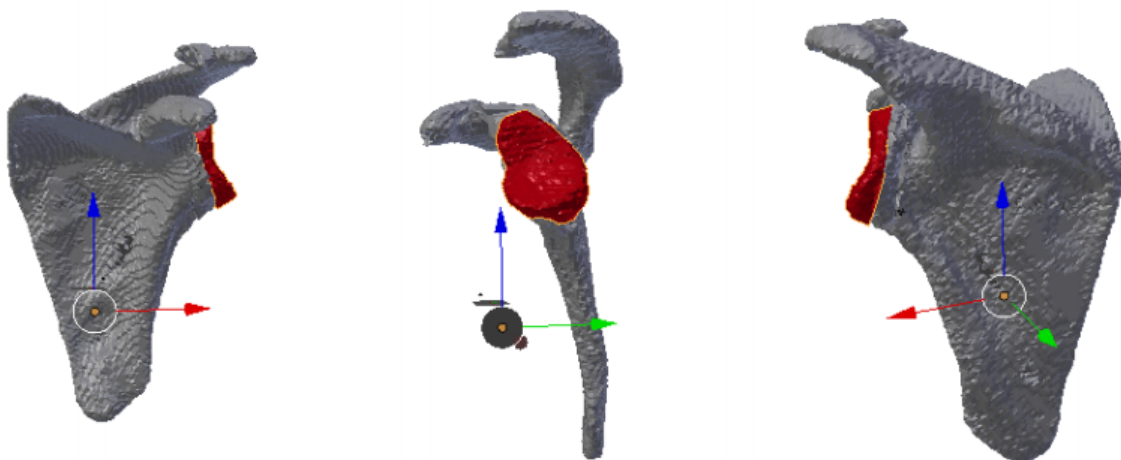


Figure 7 – La partie atrophiée sur une omoplate

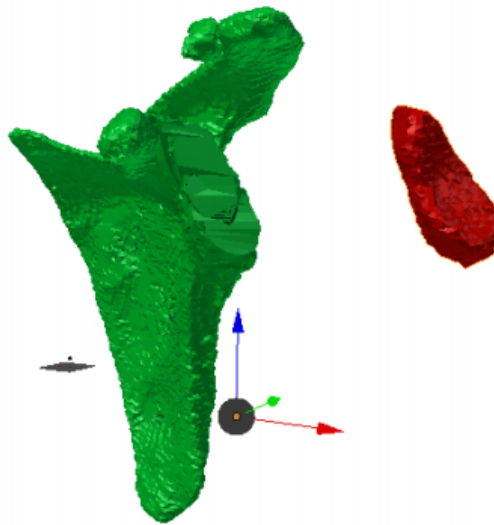


Figure 8 – La glène à reconstruire

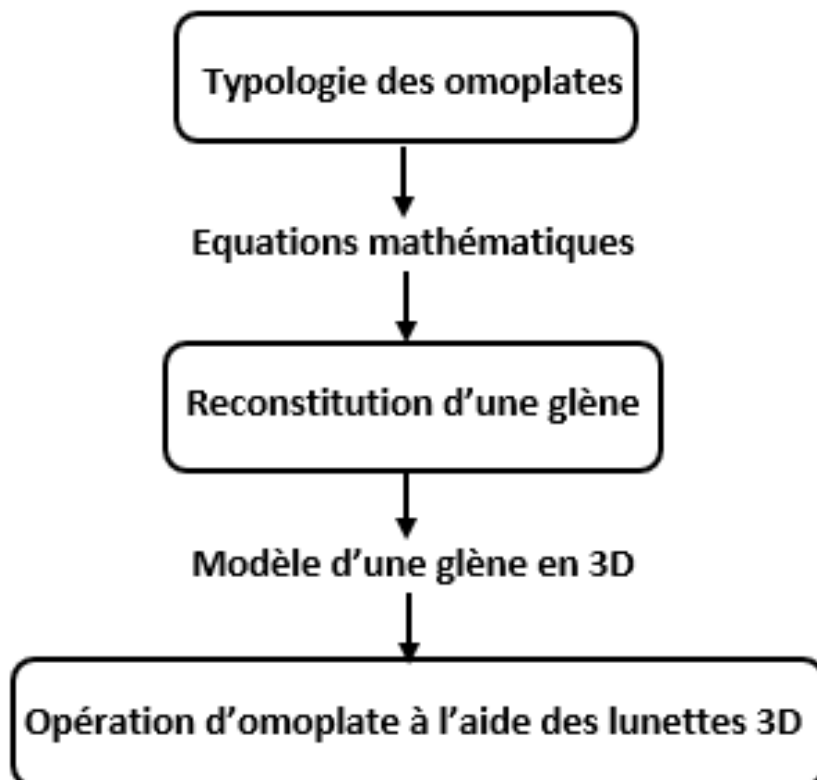


Figure 9 – Relations entre les trois sous-projets d'"Omoplate"

# 3

## Définition du projet " Reconstitution d'une glène "

### 1 Objectif du projet

Le sujet de mon PR&D est la deuxième partie susmentionnée dans le chapitre précédé. A la fin du projet, pour chaque omoplate malade, on devrait pouvoir construire un modèle en 3D de la glène prête pour une opération chirurgicale spécifique.

Plus précisément, ce projet dispose comme entrées :

- . Des équations de régression multiple à partir desquelles nous sommes capable de calculer les coordonnées des points sur la glène ; les coordonnées des points sur l'omoplate malade d'un patient spécifique. Les points nous donne une première déduction de la position dans l'ensemble de la partie à réparer, ainsi qu'une forme approximative de la glène à construire.
- . D'une base de données de glènes contenant une quarantaine de fichiers sous format .obj issues des résultats du scanner.

En sortie du projet, nous voudrons :

- . Un modèle 3D d'une glène adaptée au patient sous format .obj.

En générale, en fonction de différents patients, donc différentes omoplates, nous souhaitons pouvoir reconstruire une glène pour tous les patients.

### 2 Découpages des tâches

Selon la démarche proposée précédemment, il est donc conseillé par mes encadrants de découper mon PRD en 3 tâches principales :

- Calculer les coordonnées des points nécessaires à partir de des équations qui ne donne que la distance entre les points en obtenant un nuage de points. Ensuite, construire un modèle de maillage à partir du nuage de points obtenu. Le nombre de points idéal dépend au final des fichiers fournis par le chirurgien, et aussi de l'algorithme de modélisation ci-après.  
Par parenthèse, le nuage de points dont nous parlons dans le rapport est issue d'un ensemble de points calculer, le nombre de points est limité par le nombre d'équation donné. En réalité, géométriquement, un nuage de points est souvent un ensemble de coordonnées, sous forme de  $(x, y, z)$  dans un repère 3D, qui sont les résultats obtenus par un appareil de mesure.
- Générer une glène générique à partir d'une base de données de glène. Ou bien extraire la glène générique adéquate d'une base de données de glènes génériques préalablement construite.

- Chercher une glène intermédiaire (i.e. un maillage) entre le modèle construit lors de la tâche 1 (pas suffisamment précis, mais à la bonne échelle) et la glène générique obtenue lors de la tâche 2 (pas à la bonne échelle).

En fait ces trois étapes n'ont pas de contraintes de précédences, nous pouvons supposer tout simplement que les points et la glène générique sont déjà obtenus pour réaliser d'abord la tâche 3 car elle a la plus haute priorité.

Figure 1 est le " data flow diagram " montrant les flux des données entre les tâches.

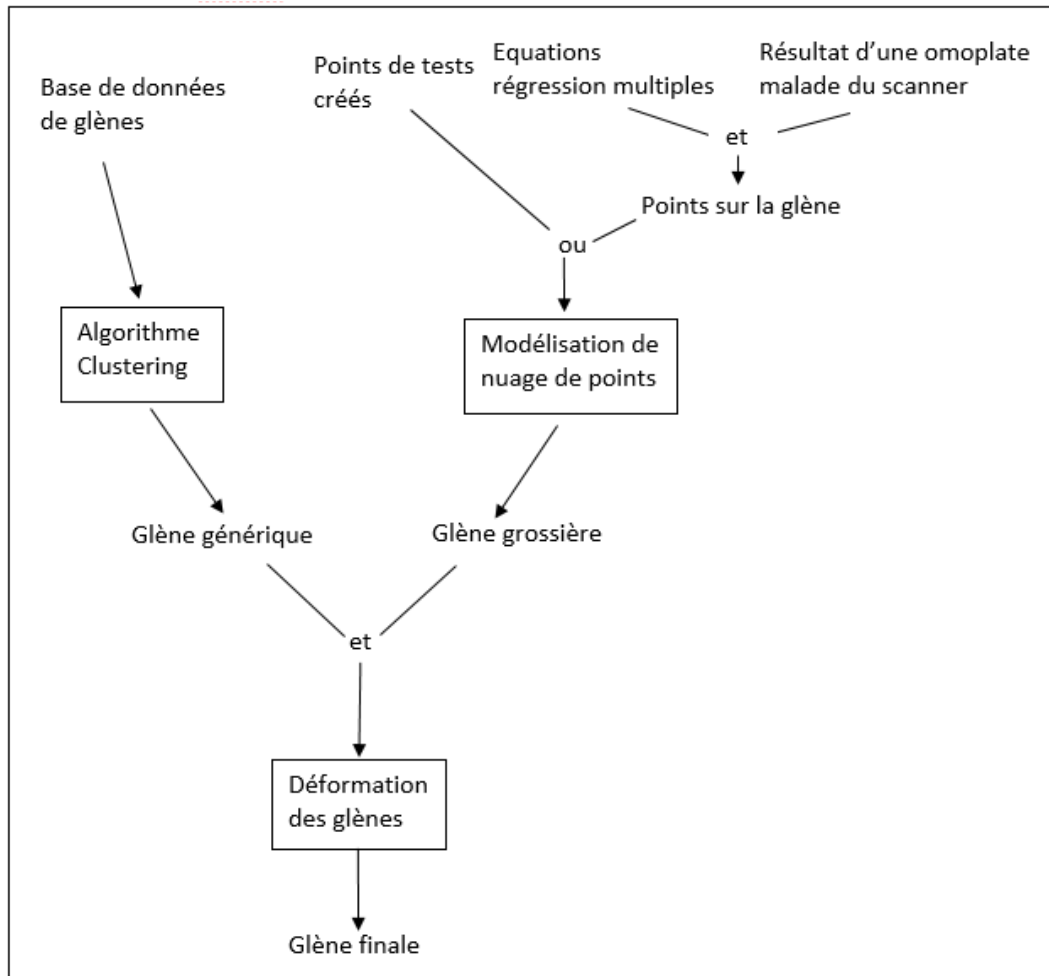


Figure 1 – Diagramme de flux de données

# 4

## Les états de l'art nécessaires et suffisants

### 1

## Notions des images & modélisation 3D, modèle en maillage et fichier .obj

### — Image 3D

3D est l'abrégié de l'infographie tridimensionnelle. Différent d'une image 2D, les coordonnées des points sont représentées dans un repère orthonormé de la géométrie dans l'espace. La technique 3D est l'ensemble de techniques issues de la CAO (conception assistée par l'ordinateur) qui permet la représentation d'objets en perspective sur un moniteur d'ordinateur. Par rapport aux images 2D, les images 3D sont plus riches en expression et en animation, et en même temps, plus coûteuses en temps de calcul.

La synthèse d'images tridimensionnelles fait appel à un espace vectoriel. Cet espace est décomposé en trois dimensions sur les axes cartésiens, nommés souvent X, Y et Z.

La synthèse d'images 3D se décompose essentiellement en deux étapes :

Modéliser ce que nous voulons visualiser ou représenter. Cette étape est appelée modélisation.

Effectuer la visualisation de ce que nous avons modélisé. Cette étape est appelée rendu.

Dans chacune de ces étapes, un grand nombre de techniques existent.

### — Modélisation 3D

La modélisation tridimensionnelle consiste à créer, dans un logiciel de modélisation 3D, un objet en trois dimensions, par des ajouts, soustractions et modifications nécessaires.

Il y a plusieurs formes de modélisation, la plus commune est la modélisation polygonale. L'objet modélisé est composé par un ensemble de polygones, le modèle 3D est donc présenté par une liste des sommets et des arêtes reliant ces sommets. Dans la plupart des cas, les polygones sont uniquement des triangles pour éviter l'ambiguïté apportée par des polygones non plans. Sans effet de lissage ("smoothing"), le modèle construit est souvent anguleux si le nombre de sommets n'est pas assez grand.

La modélisation peut se réaliser avec la plupart des logiciels de modélisation 3D existants. Parmi ces logiciels en existe des connus comme 3DS MAX, Maya, Blender, Rhino, Xara 3D, LightWave 3D, ... etc.

### — Maillage

Un maillage ou un mesh est un ensemble de sommets et polygones formés par ces sommets qui représente un polyèdre. Il est aussi appelé un maillage non structuré. Ces polygones sont souvent

des triangles, quadrilatère ou d'autres polygones convexes simples. Cela simplifie le processus de rendu, mais en tous cas, un maillage peut aussi contenir des polygones avec des trous.

Des exemples de représentation d'un maillage :

Une liste de sommets. Ces sommets contiennent encore des listes d'informations de polygones qu'ils forment, des informations de trous peuvent aussi être incluses.

Une liste de sommets + une liste d'arêtes + une liste de polygones.

La structure de « winged edge ». Cette structure décrit la géométrie et topologie des surfaces, arêtes et sommets quand trois ou plus de surfaces rencontrent une arête en commun. Les surfaces sont ordonnées dans le sens antihoraire par rapport à l'orientation originale du bord d'intersection.

Selon différentes applications, le choix de représentation de maillage est différent. La manipulation des triangles est plus simple que celle des autres polygones, notamment en géométrie algorithmique.

Figure 1 est un exemple d'un objet en maillage sous le logiciel Blender.

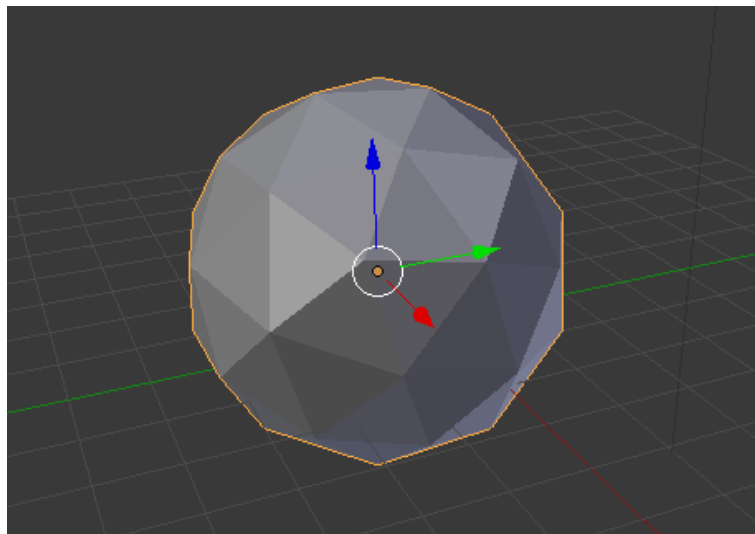


Figure 1 – Un exemple du maillage d'une sphère

## — Fichier .obj

### . Caractéristiques

Fichier de modèle OBJ est un format de fichier publié par la société Alisas|Wavefront, son extension du fichier est ".obj". Il en existe bien sûr d'autres formats : ".3ds", ".max", ".lw", ".mb", ".dxf", ... etc. Parmi eux le fichier .obj est un format de fichier modèle 3D standard, il est adapté pour l'importation et l'exportation de modèles entre différents logiciels. Nous avons donc choisi .obj comme format de livrables final. Par exemple si nous construisons un modèle sous 3dsMax ou sous LightWave, nous voulons l'importer dans Maya et puis le rendre en animation, l'exportation du modèle en .obj serait un bon choix. Presque tous les logiciels du marché manipulent les fichiers .obj, mais certains d'entre eux ont besoin du plug-in pour y arriver.

Malheureusement les logiciels 3D actuels ne sont pas cent pour cent parfaits en exportation, les cas où il manque des surfaces ou des arêtes arrivent souvent, donc il est nécessaire de connaître la structure de fichier .obj pour trouver et résoudre le problème.

Les fichiers .obj sont de nature des fichiers en format texte, nous pouvons donc les ouvrir, inspecter et éditer avec des outils de textes comme WordPad.

Le format .obj supporte polygones, droites, surfaces et courbes en forme libre. Les droites et les polygones sont souvent représentés par leurs sommets. Ces informations supportent les courbes régulières et irrégulières, y compris les courbes Bezier, les courbes B-spline, les courbes Cardinal/Catmull-Rom et les courbes des équations Taylor. En particulier, les fichiers .obj supporte les surfaces avec plus de 3 sommets.

### . Structure

Les fichiers .obj sont composés de texte. Les commentaires commencent par "#", les espaces sont ignorés. Toutes les lignes significatives commencent par un mot clé qui indique le type de donnée de cette ligne. Plusieurs lignes sont regroupées logiquement en une en ajoutant un "\" à la fin de chaque ligne.

Les mots clés dans les fichiers .obj sont les suivants :

- v** : sommets géométriques
- vt** : sommets de texture
- vn** : normales des sommets
- vp** : les sommets de l'espace des paramètres

Prenons un exemple d'un maillage d'un cube exporté depuis le logiciel Blender. Voici est le fichier .obj.

```

1  mtllib  untitled.mtl
2  o  Cube
3  v  1.461214  -1.461214  -1.461214
4  v  1.461214  -1.461214  1.461214
5  v  -1.461214  -1.461214  1.461214
6  v  -1.461213  -1.461214  -1.461215
7  v  1.461215  1.461214  -1.461213
8  v  1.461213  1.461214  1.461215
9  v  -1.461215  1.461214  1.461213
10 v  -1.461214  1.461214  -1.461214
11 v  -1.461214  -1.461214  -1.461214
12 v  -1.461214  -1.461214  1.461214
13 v  1.461214  -1.461214  1.461214
14 v  1.461213  -1.461214  -1.461215
15 v  -1.461215  1.461214  -1.461213
16 v  -1.461213  1.461214  1.461215
17 v  1.461215  1.461214  1.461213
18 v  1.461214  1.461214  -1.461214
19 vn  -0.000000  -1.000000  0.000000
20 vn  0.000000  1.000000  -0.000000
21 vn  1.000000  0.000000  0.000000
22 vn  -0.000000  -0.000000  1.000000
23 vn  -1.000000  -0.000000  -0.000000
24 vn  0.000000  0.000000  -1.000000
25 usemtl  Material.006
26 s  off
27 f  1//1  2//1  3//1  4//1
28 f  5//2  8//2  7//2  6//2
29 f  1//3  5//3  6//3  2//3
30 f  2//4  6//4  7//4  3//4
31 f  3//5  7//5  8//5  4//5
32 f  5//6  1//6  4//6  8//6
33 f  9//1  12//1  11//1  10//1
34 f  13//2  14//2  15//2  16//2
35 f  9//5  10//5  14//5  13//5
36 f  10//4  11//4  15//4  14//4
37 f  11//3  12//3  16//3  15//3
38 f  13//6  16//6  12//6  9//6

```

Dans ce fichier nous pouvons trouver les coordonnées de tous les sommets ainsi que leurs normales. " o Cube " veut dire que le nom de l'objet est " Cube ". " s off " indique que " smoothing " est désactivé. " usemtl Material.006 " nous raconte la matérielle utilisée lors du rendu de l'objet.

Dans une surface " f 1//1 2//1 3//1 4//1 " nous pouvons obtenir les informations des 4 points qui la composent. Chaque point est précisé sous forme de " index de sommet (v)/index de uv/index de vn ".

## 2 Logiciel Blender

Le logiciel Blender a été choisi comme outil de modélisation principal de mon projet. Il est un logiciel libre de modélisation, d'animation et de rendu en 3D qui apporte des fonctionnalités variées tout en étant gratuit.

Des notions importantes en réalisation du projet :

- **Maillage** Les objets (saufs les objets Nurbs, constitués avec des courbes Nurbs) sous Blender sont enregistrés en tant que maillage, c'est à dire une structure composée des sommets, des arêtes entre sommets et des surfaces entourées par les arêtes. Toutes les modifications sur les objets sont en fait effectuées sur leurs structures en maillage, le mesh.
- **Coordonnées** Il y a deux types de coordonnées dans un repère sous Blender : les coordonnées globales ou les coordonnées locales. Dans tous les fichiers dont nous disposons, les coordonnées sont des coordonnées **globales**.
- **Les centres d'un objet** Il y a trois "centres" sous Blender : le centre logique, dit "origine" ; deux centres physiques, le centre géométrique et le centre de masse. Nous pouvons toujours définir le centre géométrique comme l'origine, ou le centre de masse comme l'origine. Unifier les origines des objets avec les même centre physiques est important pour les manipuler dans le même contexte.

Une autre raison pour choisir Blender est que les anciens travaux du projet omoplate ont été réalisés sous Blender, donc cela évite des incompatibilités de versions ou de formats de fichier.

## 3 Logiciel 3DReshaper

Bien que Blender soit très puissant en modélisation 3D, des fonctionnalités associées aux manipulations de nuage de points ne sont toujours pas intégrées dans sa dernière version. Nous aurions la possibilité de développer en script python comme plug-in ou de chercher d'autre logiciels qui en sont capables.

Considérant la complexité de développer un tel script qui est potentiellement long, mes encadrants m'ont conseillé d'abord de me mettre à la de logiciels et m'ont proposé 3DReshaper (Figure 2). Le premier avantage de 3DReshaper est qu'il est gratuit avec un accord de licence d'éducation.

3DReshaper est une application développée par la société Technodigit située au sud de la France. C'est un logiciel simple d'utilisation dédié au traitement de nuages de points pour de nombreuses applications telles que la sauvegarde du patrimoine, l'art, l'architecture, la géologie, les mines et les carrières, la modélisation numérique de terrain, l'ingénierie civile et la construction navale.

Il comprend des fonctionnalités parmi lesquelles :

- **Traitement de nuages de points** 3DReshaper est dédié au traitement de nuages de points, peu importe leur origine. Il permet de réduire et nettoyer un nuage de points, de le découper, de mesurer les distances entre les points dans le nuage,...etc.
- **Maillage 3D** L'approche de 3DReshaper consiste à travailler en deux étapes : créer un maillage grossier afin d'obtenir la forme globale rapidement et raffiner ce maillage avec les points du nuage en ajoutant des triangles là où l'on veut plus de détails. Le maillage selon les courbures de 3DReshaper nous permet de réorganiser les triangles en fonction des courbures locales.
- **Script & Automatisation** 3DReshaper embarque un environnement JavaScript complet afin d'écrire nos propres fonctions et automatiser des tâches répétitives.



Figure 2 – Logo : 3DReshaper

## 4 Logiciels de modélisation de nuage de points

Une étape essentielle dans ce projet est de chercher à pouvoir reconstruire un modèle à partir d'un nuage de points.

En attendant d'obtenir les équations, résultats du travail de Théo Voisin, et de pouvoir ensuite obtenir le nuage de points, il a été indispensable de créer un nuage de points similaire pour tester divers logiciels. Pour cela, nous importons d'abord le fichier .obj d'une glène fourni par le chirurgien, et nous supprimons tous les surfaces et arêtes en mode Edit en ne gardant que les sommets. Nous exportons ensuite ce nuage de points en fichier .obj. Dans le cas particulier de ce test, le nombre de points de ce nuage est de 3096.

Après des recherches sur différents sites internet et les ouvrages pertinents, sans regarder plus loin dans les algorithmes sous-jacents, j'ai recensé des logiciels de modélisation orientés traitement des nuages de points qui seraient intéressants par rapport à la complexité de mon projet :

- Plug-in PointCloud Skinner pour Blender ([http://blenderartists.org/forum/showthread.php?241950-A-Script-to-Skin-a-Point-Cloud-\(for-Blender-2-6x-or-Later\)](http://blenderartists.org/forum/showthread.php?241950-A-Script-to-Skin-a-Point-Cloud-(for-Blender-2-6x-or-Later)))
- Meshlab (limité mais gratuit)
- RapidForm
- 3DReshaper (négociation de licence)
- Geomagic
- Polyworks

Le plug-in PointCloud Skinner serait idéal car il pourra s'intégrer dans Blender sans rajouter des logiciels supplémentaires. Mais avec très peu de paramètres à fixer, sa performance n'est pas assez satisfaisante. Pour rendre fonctionnel ce plug-in, il suffit de télécharger le script en python, le déplacer dans le fichier pour les plug-ins dans le répertoire de Blender, et puis activer ce plug-in dans « préférences utilisateur » dans Blender.

**Figure 3** nous montre ce plug-in, dont le paramètre " dist for skin " est un seuil utilisé dans la collecte de sommets. Cela signifie le rayon d'une sphère dans laquelle pointCloud Skinner les sommets. pointCloud Skinner construit ensuite des surfaces sur ces sommets ; le paramètre " Ratio for axis " est un taux de " dist for skin " par " dist for search ", il est un seuil utilisé dans la collecte des autres sommets, cela signifie le rayon de la région de la sphère dans laquelle pointCloud Skinner les sommets pour calculer la moyenne normale ; " Ration for Grid " est la taille des cellules de la grille utilisé pour contenir tous les sommets.

**Figure 4** est le résultat de la modélisation d'un nuage de point d'une glène. **Figure 5** est le résultat de la modélisation du même nuage de points de glène construit par 3DReshaper.

Une campagne de tests avec variation de paramètres sera faite dans la prochaine phase du projet.

## 5 Clustering hiérarchique

La méthode de Clustering hiérarchique a été proposée pour accomplir la tâche « Générer une glène générique à partir d'une base de données de glènes saines ».

En analyse des données, le Clustering hiérarchique est une méthode de classification qui cherche à construire une hiérarchie de classification. Pour résumer simplement, il existe deux approches : l'approche " bottom up " et l'approche " top down ". Chaque observation de l'approche " bottom up " commence dans sa propre classification, et les paires de classification sont fusionnées comme une seule. Dans l'approche " top down " toutes les observations commencent d'une seule classification, et divisée par deux.

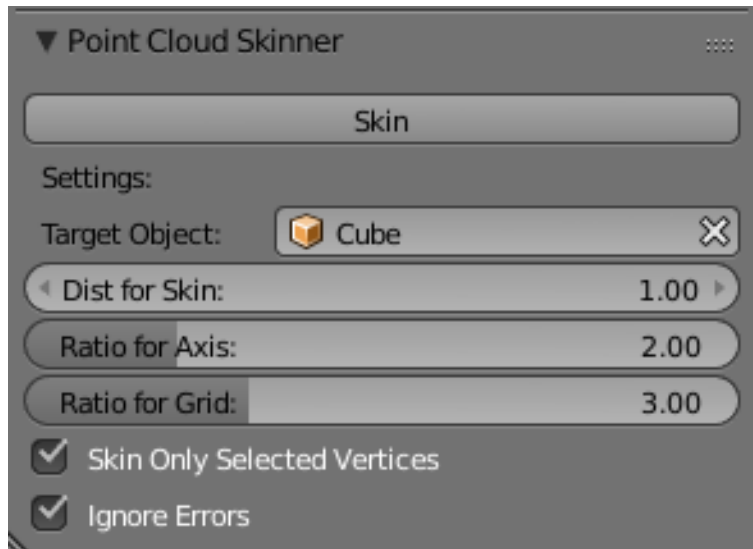


Figure 3 – Le plug-in PointCloud Skinner sous Blender

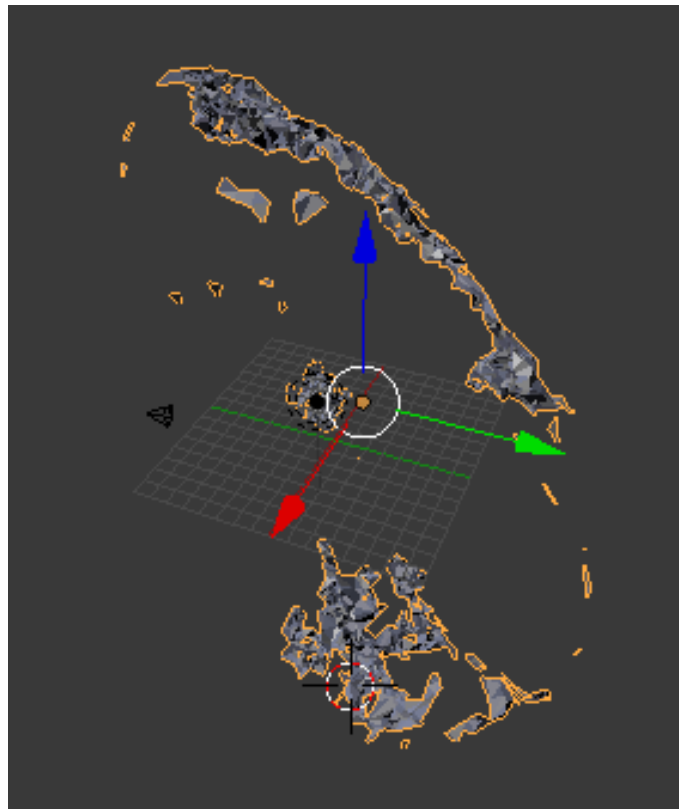


Figure 4 – Résultat de modélisation d'une glène avec PointCloud Skinner

Puisque nous disposons d'une quarantaine de glènes, l'approche « bottom up » serait adaptée. Nous travaillerons avec l'Analyse Ascendante Hiérarchique. L'idée est de créer une matrice de distances entre toutes les glènes dans la base de donnée, les regrouper par deux de façon que la distance entre deux glènes soient toujours la distance minimale entre toutes les paires possibles. Ensuite, par une méthode de déformation de maillage (étudiée ci-après), nous nous synthétisons chaque paire de glène en une seule glène.

Nous répétons cette démarche jusqu'à ce que nous obtenions un nombre satisfaisant, aux yeux du chirurgien, de glènes génériques. Le but sera donc de Ensuite, il faudra trouver un compromis entre une de ces glènes génériques, choisie par le chirurgien et la glène pathologique du patient afin de reconstituer virtuellement la glène originelle saine.

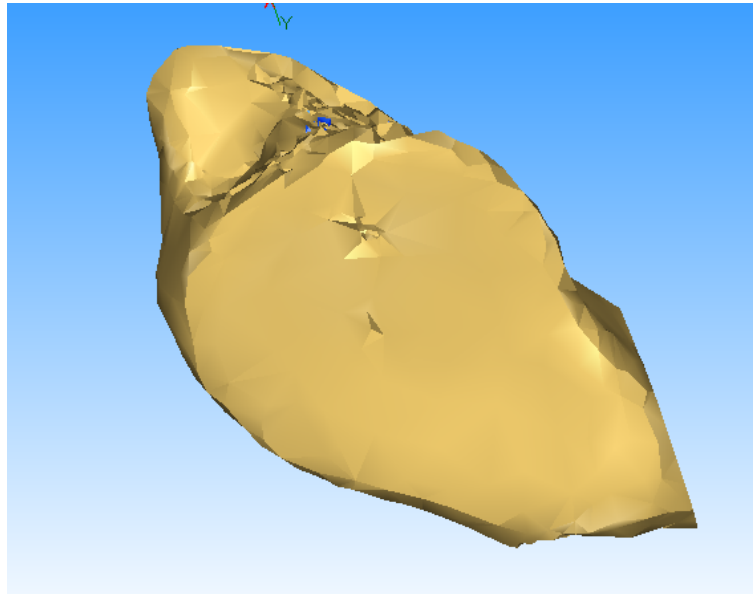


Figure 5 – Résultat de modélisation d'une glène avec 3DReshaper

## 6 Évaluation de la technique Morphing à l'égard de mon projet

Le problème originel est donc de "faire coller" ("matching") une des glènes génériques choisies par le chirurgien avec un nuage de points adjoint à la glène atrophiée du patient. En première approximation, une méthode Morphing a été proposée en considérant la tâche « Chercher un maillage cohérent entre l'objet construit à partir du nuage de points et une glène générique ». La déformation pourrait se faire soit de la glène construite à partir du nuage de points (i.e. une glène grossière mais à l'échelle) vers la glène générique (i.e. une glène précise mais pas à l'échelle), et nous cherchons un objet intermédiaire ; soit dans le sens inverse.

Morphing est la technique qui déforme d'une image à une autre ; qui met l'accent sur une transformation la plus naturelle et la plus fluide possible, il est souvent appliqué dans la déformation des visages humains.

Etant donné une image source et une image cible, l'essentiel dans la technique Morphing est le processus de déformation, cela demande donc de calculer le plus possible d'images intermédiaires et ensuite de les déplacer en succession entre l'image source et l'image cible afin de constituer un spectre de modèles intermédiaires (différents compromis). L'esprit de la méthode Morphing moderne se trouve en deux aspects : trouver des caractères clés bijectifs sur l'image source et l'image cible ; effectuer des algorithmes d'interpolation entre ces caractères bijectifs. Les caractères clés peuvent être des points, des segments, ou des maillages indépendants en divisant les deux images en une même structure de maillage.

Des logiciels sont disponibles pour réaliser la déformation Morphing entre images :

- Morphing 2D (Programme Gratuit et OpenSource pour réaliser des morphoses en 2D)
- FantaMorph
- Gryphon Software Morph
- Morpheus
- MorphThing

Pour l'appliquer dans mon projet, nous pourrions définir la glène générique et la glène construite à partir du nuage de points comme l'image source et l'image cible (ou dans le sens inverse), et choisir une des images intermédiaires comme le modèle de glène attendue.

## 7 Triangulation de Delaunay

Avant de chercher plus loin dans les détails d'algorithmes de reconstitution d'objets à partir de nuage de points, il m'a été recommandé de faire des lectures sur la triangulation Delaunay car cela est une technique de prétraitements important, et la base de beaucoup d'algorithmes en modélisation géométrique.

D'abord, une triangulation d'un ensemble de sommets est un graphe tel que :

- Toutes les arêtes dans le graphe ne contiennent que ces deux points d'extrémité (pas d'autre sommets sur la même arête) ;

- Les arêtes n'ont pas de parties en commun sauf les points d'extrémité ;

- Toutes les surfaces dans le graphe sont des triangles et l'ensemble de triangles entoure l'ensemble de ses sommets.

La triangulation de Delaunay est la triangulation la plus souvent utilisée. En mathématiques et plus particulièrement en géométrie algorithmique, la triangulation de Delaunay d'un ensemble  $P$  de points du plan est une triangulation  $DT(P)$  telle qu'aucun point de  $P$  n'est à l'intérieur du cercle circonscrit d'un des triangles de  $DT(P)$ . Les triangulations de Delaunay maximisent le plus petit angle de l'ensemble des angles des triangles, évitant ainsi les triangles « allongés ». Cette triangulation a été inventée par le mathématicien russe Boris Delaunay (1890 - 1980) en 1934.

D'après la définition de Delaunay<sup>1</sup>, le cercle circonscrit d'un triangle constitué de trois points de l'ensemble de départ est vide s'il ne contient pas d'autres sommets que les siens. Ainsi, les autres points sont autorisés sur le périmètre en lui-même mais pas à l'intérieur strict du cercle circonscrit.

La condition de Delaunay affirme qu'un réseau de triangles est une triangulation de Delaunay si tous les cercles circonscrits des triangles du réseau sont vides. Ceci constitue la définition originale en deux dimensions. En remplaçant les cercles par des sphères circonscrites, il est possible d'étendre la définition à la dimension trois.

Il n'existe pas de triangulation de Delaunay pour un ensemble de points alignés. De toute manière, la triangulation n'est dans ce cas pas définie.

Pour 4 points cocycliques, tels que les sommets d'un rectangle, la triangulation de Delaunay n'est pas unique. Trivialement, les triangulations utilisant chacune des deux diagonales satisfont la condition de Delaunay.

Il est possible de généraliser cette notion pour des mesures non euclidiennes, sans garantie de l'existence ou de l'unicité de la triangulation(wikipédia).

Une arête de Delaunay est une arête dans le graphe dont les points d'extrémité sont  $a$  et  $b$  : il existe une sphère qui traverse  $a$  et  $b$ , alors aucun d'autre sommet n'est dans cette sphère. Si la triangulation d'un ensemble de points ne contient que des arêtes comme décrites ci-dessus, cette triangulation est une triangulation de Delaunay.

Un grand nombre de graphes géométriques sont reliés avec la triangulation de Delaunay : le graphe de Voronoï, l'arbre EMST, le graphe Gabriel, ... etc.

Pour calculer la triangulation de Delaunay d'un ensemble de sommets dans un graphe, il y a plusieurs algorithmes proposés, dont l'algorithme Lawson et l'algorithme Bowyer-Watson sont les plus connus.

# 5

## Description & réalisation du projet

Pour chaque patient nécessitant une opération d'omoplate, nous construisons un modèle de glène qui lui est adapté. Ce modèle est l'intersection de la généralité et de la particularité.

Nous cherchons un intermédiaire, qui satisfait au maximum :

1. La généralité : elle doit avoir la forme qu'une glène doit avoir.
2. La particularité : elle doit s'adapter à la structure spécifique de l'omoplate pour qu'elle soit en harmonie avec le corps du patient.

Tous les modèles sont représentés en maillage et enregistrés sous forme de fichier .obj.

Toutes les coordonnées employées sont des coordonnées globales.

Les logiciels utilisés à ce stade sont :

Blender : gratuit et open source

3DReshaper : gratuit sous l'accord " éducation

### 1 Calculer le nuage de points & Construire un modèle de maillage

#### 1.1 Calculer les distances entre Y

Rappelons que les Y sont des distances euclidiennes entre deux points de l'omoplate dont un, au moins, est sur la glène. En attendant des résultats du travail de M.VOISIN Théo, nous reprenons les résultats du PFE 2014-2015 par M.BOAS David (cf [Figure 1](#)).

Y est fonction de variable X.  $R^2$  décrit la fiabilité statistique de cette équation. Nous disposons aussi d'un résultat préopératoire du patient qui donne les coordonnées des 20 points de son omoplate à opérer. Puisque celle-ci est une omoplate malade, le résultat ne contient donc pas de points sur la glène. Nous pouvons calculer les distances X grâce à l'équation suivante :

$$AB = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}$$

, dont A et B sont deux points dans l'espace, leurs coordonnées sont respectivement  $A(x_A, y_A, z_A)$ ,  $B(x_B, y_B, z_B)$ .

Numéro	Equations : Globales	$R^2$ ajusté	Moyenne écarts
1	$Y_{2,7} = 0.20493X_{5,6} + 0.21845X_{5,11} - 0.14519X_{6,9} + 0.32906X_{7,9} + 44.30713$	0.75	2,207208681
2	$Y_{2,7} = 0.16677X_{5,6} - 0.21552X_{6,9} + 0.409X_{7,9} + 0.20905X_{10,11} + 0.37066X_{11,12} + 43.65133$	0.74	2,277961791
3	$Y_{7,19} = 0.19232X_{7,9} + 0.68508X_{7,12} + 0.2721X_{10,11} - 2.84573Cote : Gauche + 20.46473$	0.70	2,830316559
4	$Y_{7,20} = -0.19232X_{5,6} + 0.38258X_{5,7} + 0.32238X_{5,11} + 0.3768X_{6,11} + 22.47661$	0.80	2,067701798
5	$Y_{7,20} = 0.34367X_{5,6} + 0.35101X_{5,11} - 0.50902X_{6,7} + 0.41118X_{6,11} - 0.39408AngleFG + 65.88903$	0.79	2,004535864
Equations : Droites			
6	$Y_{6,15} = 0.2884X_{5,6} + 0.6886X_{10,11} + 55.4357$	0.60	4,85480406
7	$Y_{7,15} = 0.5912X_{6,11} + 0.7243X_{7,12} + 0.7593AngleA - 78.8028$	0.79	3,307961385
8	$Y_{7,18} = 0.37517X_{5,7} + 0.36305X_{5,11} + 0.25027X_{7,9} + 22.00914$	0.78	2,332626996
Equations : Gauches			
9	$Y_{6,15} = 0.6325X_{5,10} - 0.5173X_{5,11} + 0.5497X_{6,7} + 44.7412$	0.68	5,100982419
10	$Y_{2,7} = 0.33915X_{5,10} + 6.50045Sexe : M + 72.06428$	0.69	2,621014844
11	$Y_{2,7} = 0.26879X_{6,11} + 0.43752X_{7,12} + 33.89137$	0.71	2,417446834
12	$Y_{4,7} = 0.36682X_{5,10} + 6.93717Sexe : M + 65.95487$	0.70	2,774849672
13	$Y_{7,14} = 0.34765X_{5,10} + 6.08704Sexe : M + 67.52523$	0.64	3,213130291
14	$Y_{7,18} = 0.49845X_{7,10} - 0.30714AngleA + 52.0671$	0.89	2,266570769
15	$Y_{7,19} = 0.4635X_{7,12} + 0.5267X_{11,12} + 5.1708Sexe : M + 39.2793$	0.67	3,007456304
16	$Y_{12,14} = 0.1848X_{5,10} + 3.83626Sexe : M + 26.65591$	0.46	2,534198598
Equations : Hommes			
17	$Y_{6,15} = 0.25173X_{6,7} + 0.39499X_{7,9} + 54.16319$	0.40	4,829307601
18	$Y_{1,7} = 0.3816X_{7,9} + 0.5704X_{9,10} + 34.4586$	0.50	3,193075208
19	$Y_{1,7} = 0.265X_{5,6} - 0.2809X_{6,9} + 0.5162X_{7,9} + 50.4346$	0.42	3,332367091
20	$Y_{1,7} = -0.19132X_{6,7} + 0.48875X_{7,9} - 0.65296AngleA + 104.41555$	0.53	3,549652313
21	$Y_{7,20} = 0.31385X_{7,9} + 0.5103X_{9,10} + 0.44196AngleE + 30.11052$	0.58	2,834658829

Figure 1 – Le résultats des équation régression multiple de David BOAS

## 1.2 Calculer les coordonnées des points sur la glène

Supposons que nous calculons les coordonnées du point  $p$  disparu de la glène atrophiée. Nous en choisissons d'abord quatre parmi toutes les équations qui contiennent le point  $p$  dans les  $Y$  à gauche des équations. Les 4 équations choisies sont celles dont  $R^2$  sont les plus grands. Nous calculons ensuite les valeurs des quatre  $Y$ , notés  $Y_{a,p}$ ,  $Y_{b,p}$ ,  $Y_{c,p}$  et  $Y_{d,p}$ , dont  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  sont quatre points sur la partie existante de l'omoplate.

Le point  $p$  que nous cherchons est donc un point qui satisfait que : sa distance aux points  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  sont respectivement  $Y_{a,p}$ ,  $Y_{b,p}$ ,  $Y_{c,p}$  et  $Y_{d,p}$ .

**Algorithme 1** précise la démarche de la des coordonnées du point  $X$  de la glène. Nous en calculerons

ensuite d'autres selon ce que demande le chirurgien.

```

Data : les coordonnées des  $Y_i$  ; l'ensemble des équations de régression linéaire multiple et
l'ensemble des coefficients de " fidélité " associés  $R^2$  ; l'identité du point X, de la glène, que
l'on souhaite caractériser.
Result : les coordonnées du point X
Calculer les 4 distances  $d(XY_i)$  et récupérer les  $R^2$  associés;
// On travaille avec les 4  $d(XY_i)$  dont les  $R^2$  associés sont les plus grands;
Trier les  $Y_i$  dans l'ordre des  $R^2$  décroissants :  $Y[Y_1, Y_2, Y_3, Y_4]$ ;
Créer une sphère dont le centre est  $Y_1$ , le rayon est  $d(XY_1)$ ;
Calculer  $d(Y_1 Y_2)$ ;
if ( $d(Y_1 Y_2) \geq d(XY_1) + d(XY_2)$ ) ou ( $0 < d(Y_1 Y_2) \leq |d(XY_1) - d(XY_2)|$ ) then
| Calculer l'équation de la droite  $Y_1 Y_2$ ;
| Relier l'équation  $Y_1 Y_2$  et l'équation de la sphère  $Y_1$ ;
|  $X \leftarrow$  la solution des équations // Il s'agit d'un seul point;
else
| //  $|d(XY_1) - d(XY_2)| < d(Y_1 Y_2) < d(XY_1) + d(XY_2)$ ;
| Créer une sphère dont le centre est  $Y_2$ , le rayon est  $d(XY_2)$ ;
| Relier les équations des sphères dont les centres sont  $Y_1$  et  $Y_2$ ;
|  $C \leftarrow$  la solution des équations (i.e. une équation d'un cercle dans l'espace);
| Calculer le centre  $C_0$  et le rayon du cercle C;
|  $i \leftarrow 3$ ;
| while  $Y_i$  est sur la droite  $Y_1 Y_2$  do
| | STOP;
| end
| Créer une sphère  $Y_3$  dont le centre est  $Y_3$ , le rayon est  $d(XY_3)$ ;
|  $M \leftarrow$  DistanceMax (),  $N \leftarrow$  DistanceMin ();
| // M est le point sur C qui est le plus loin du centre de la sphère  $Y_3$ , N le plus proche;
| switch  $d(XY_3)$  do
| | case  $d(XY_3) == d(NY_3)$  // C touche à l'extérieur la sphère  $Y_3$  do
| | |  $X \leftarrow -N$ 
| | end
| | case  $d(XY_3) == d(MY_3)$  // C touche à l'intérieur la sphère  $Y_3$  do
| | |  $X \leftarrow -M$ 
| | end
| | case  $d(XY_3) < d(NY_3)$  // C ne rencontre pas la sphère  $Y_3$  do
| | |  $X \leftarrow$  prendre M ou N (le point le plus proche du centre  $Y_3$ );
| | | // Ça revient à relaxer l'équation n°3 de la régression multiple linéaire pour le point X en
| | | cours
| | end
| | case  $d(XY_3) > d(MY_3)$  // C est à l'intérieur de la sphère  $Y_3$  do
| | |  $X \leftarrow$  prendre M ou N (le point le plus proche du centre  $Y_3$ )
| | end
| | case  $d(NY_3) < d(XY_3) < d(MY_3)$  // C et  $Y_3$  se coupent en deux points do
| | | Relier l'équation de la sphère  $Y_3$  et du cercle C;
| | |  $P, Q \leftarrow$  solutions des équations // on obtient 2 points;
| | | if  $|d(PY_4) - d(XY_4)| < |d(QY_4) - d(XY_4)|$  then
| | | |  $X \leftarrow -P$ 
| | | else
| | | |  $X \leftarrow -Q$  // ici il faut en choisir un des deux, on prend le point le plus proche de  $Y_4$ 
| | | end
| | end
| end
end

```

### Algorithme 1 : Trouver les coordonnées d'un point X de la glène

Notamment, quand il n'y a pas d'intersection entre les deux première sphères, on relaxe l'équation n°2 de la régression multiple linéaire pour le point X en cours ; ça revient à forcer la distance  $d(XY_2)$  à une valeur minimale pour obtenir les 2 sphères tangentes.

Une autre remarque, pour choisir  $Y_3$  il faudrait éviter de le prendre sur la droite  $Y_1 Y_2$ . Sinon, au mieux, l'intersection des 3 sphères serait un cercle. Note : dans la pratique il n'y a aucune chance que ça se produise, vu la nature des données (nombres réels, arrondis ...). Donc on ne va pas s'en occuper, mais si ça se produit, on arrête le programme.

Algorithme2 est l'algorithme qui calcule les coordonnées des points sur un cercle le plus proche et le plus loin d'une sphère.

Projeter perpendiculairement  $Y_3$  sur le plan auquel appartient C ; on obtient le point E sur ce plan;  
Calculer l'équation de droite  $C_0E$  Relier l'équation  $C_0E$  et l'équation du cercle C;  
Note : au retour, on fera : M, N <- solutions des équations // le résultat est 2 points

**Algorithme 2 :** DistanceMax () et DistanceMin ()

## 2 Déformation de la glène construite à la glène générique

Nous souhaitons obtenir le plus de points possibles sur la glène, chacun de ces points seront calculés selon Algorithme 1. Mais Pour la suite de nos travaux, ici, nous supposons disposer d'une centaine de ces points..

Nous supposons aussi disposer déjà d'une glène générique A, issue d'une base de données de glènes génériques, construites grâce à un dendrogramme d'Analyse Ascendante Hiérarchique.

### 2.1 Obtention d'un premier modèle d'une glène à partir du nuage de points

En attendant la mise au point des équations mathématiques, issues de la Régression Multiple Linéaire (réf : les travaux de David Boas et de Théo Voisin), voici la méthode suivie afin de construire une glène B pour nos tests :

#### 2.1.1 Obtention de la glène B

On dispose d'une glène Générique A", réduite à une échelle 0,3 - par exemple - à partir de l'originale A (qui est à l'échelle 3 par exemple).

- > Sous Blender, supprimer les arêtes et les faces ; on obtient un nuage de 3096 points.
- > Exporter un fichier nommé « nuagePointsGlène.obj » contenant ce nuage de points.
- > Importer « nuagePointsGlène.obj » dans 3DReshaper.
- > Réduire le nombre de points avec le module « Filtrer/Exploser Nuages » en trois fois :
  1. Garder des points uniformément espacés ; la distance moyenne entre les points est 0.4 unité (avec l'outil "Mesure" sous 3DReshaper, la distance moyenne entre les points est 0.4) ; il nous reste 474 points au lieu de 3096 points.
  2. Faire deux fois " Garder un certain nombre de points, nombre de points à garder est de 50% ". 50% du nombre total de points sont détruits à chaque fois. On passe donc de 474 points à 237 points puis à 118 points.
- > Appliquer la fonctionnalité " maillage 3D ", sous rubrique " Maillage ", sur le nuage réduit de points.  
Parce que la démarche de maillage n'est pas faite sur un grand nombre de points, il suffit de créer juste un maillage clos ("Essayer de créer un maillage clos").  
**Ceci est notre glène B simulée.**
- > Exporter un fichier nommé « petiteGlèneGrossière.obj » concernant le maillage créé B.
- > Importer « petiteGlèneGrossière.obj » B ainsi que le modèle A de la glène dans Blender.

Maintenant, sous Blender, nous disposons de deux glènes à déformer : une glène générique A, à l'échelle 3, avec une géométrie précise, et une autre B, qui respecte les contraintes de distances données par l'ensemble des équations mathématiques, issues de la Régression Multiple Linéaire, donc à la bonne échelle, mais trop grossière pour être considérée comme une glène viable. C'est entre les caractéristiques de ces deux glènes qu'il faudra trouver un compromis.

### 2.1.2 Obtention de la glène B'

On rajoute artificiellement des sommets (vertex) sur B qui n'a que 118 points (par exemple) pour la raffiner avant les prochaines déformations.

Un modificateur "Subdivision surface", dans Blender, permet de donner une apparence plus lisse, à la glène B, afin de réaliser une modélisation de maillage complexe à partir d'un maillage simple avec très peu de sommets (vertex). Un maillage "modifié" après l'application de "Subdivision surface" contient plus de surfaces et donc plus de sommets (vertex), sans changer sa structure de base.

A cet effet on peut maximiser sa cohérence avec les équations en obtenant plus de points.

Sous Blender, sélectionner B, dans le menu "add modifiers" (cf [Figure 2](#)), choisir "Subdivision surface". Dans les options qui apparaissent, on peut définir le degré de subdivision. Après quelques essais, on constate que cette fonction ajoute à peu près 6 fois plus de points en degré 1 (de 118 à 698 points); si on met le degré à 2, ça donne 2786 points, et 11138 points en degré 3. Pour être plus similaire à la glène générique qui a 3096 points, nous avons décidé de mettre le degré à 2. Ne pas oublier de cliquer sur "apply" à la fin.

Ceci est la glène B' simulée.

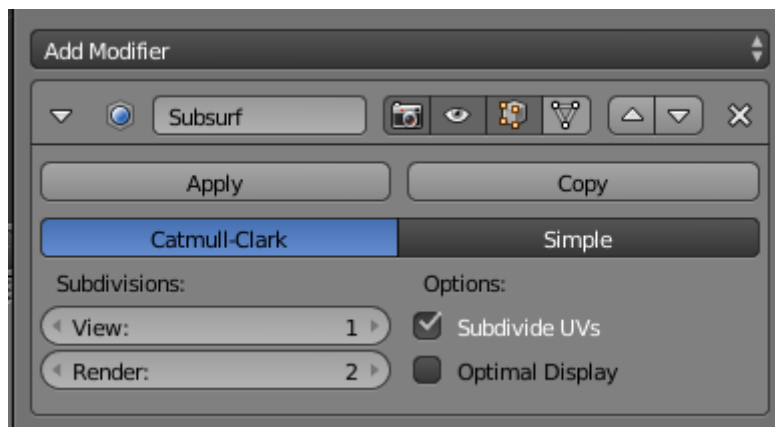


Figure 2 – Modifier Subdivision surface

## 2.2 Déformation de la glène générale A

La glène générique n'est pas toujours à la bonne échelle qui correspond au cas du patient. Néanmoins, parce que les points de la glène B' sont issues des résultats préopératoires du patient, nous pouvons donc considérer que B' est à la bonne échelle. Donc la première chose qu'il faut faire est de mettre A à l'échelle de B', autrement dit adapter la taille de la glène générique à la taille supposée de la glène de ce patient lorsqu'elle était saine.

Afin de trouver la bonne proportion, nous calculons la proportion entre une distance significative sur B et la distance équivalente sur A (voir [Figure 3](#)). Nous traitons alors quatre de telles distances et on prend la moyenne harmonique.

Le logiciel 3DReshaper fournit un menu "Mesure" qui calcule la distance entre deux sommets (« vertices ») à l'aide du clic de la souris.

Sous 3DReshaper, on obtient les valeurs dans [Table 1](#) pour les 4 distances :  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  et  $D_4$ .

Pour calculer la moyenne harmonique :

$$H = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}$$

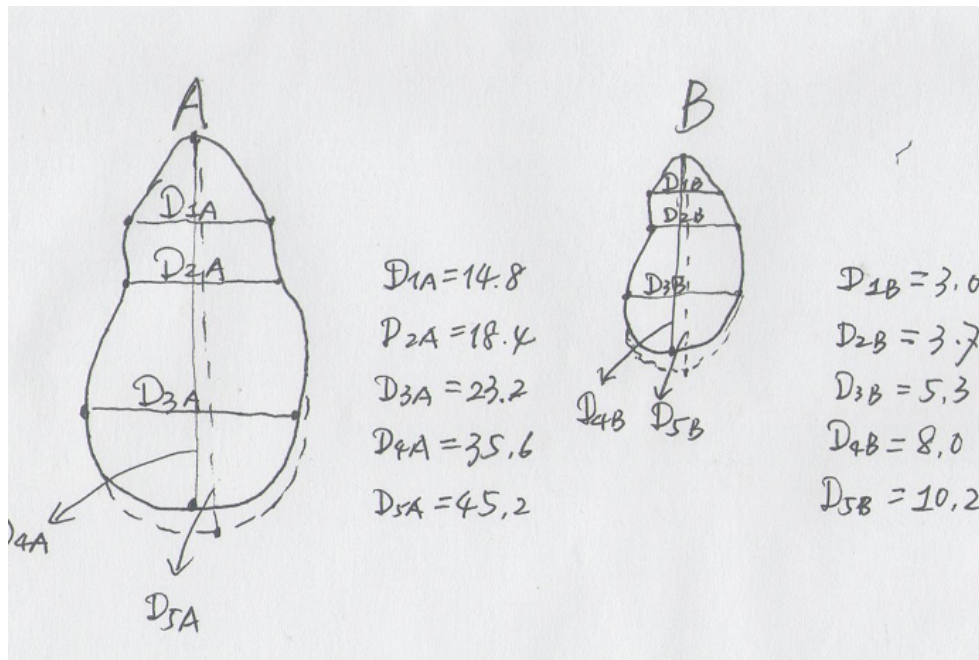


Figure 3 – Les distances dans les deux glènes

Table 1 – Les distances significatives sur les glènes

Dists ds A	Dists ds B	$D_B/D_A$
$D_{1A} = 14.8$	$D_{1B} = 3.0$	0.203
$D_{2A} = 18.4$	$D_{2B} = 3.7$	0.201
$D_{3A} = 23.2$	$D_{3B} = 5.3$	0.228
$D_{4A} = 35.6$	$D_{4B} = 8.0$	0.225
Moyenne = 0.2135		

Dans Blender, sélectionner la glène générique A, cliquer " S " puis saisir 0.2135 (ce qui indique la proportion pour la mise à l'échelle). On obtient la glène A' à la même échelle que B.

## 2.3 Obtention de la glène reconstituée de A et B

Avant d'aller plus loin dans les algorithmes de Morphing, deux modifieurs sous Blender nous permettent de trouver un modèle intermédiaire entre deux objets : "Shrinkrap" et "Shape Keys".

### 2.3.1 Déformation de B' vers A' avec " Shrinkwrap "

Le modificateur Shrinkwrap (voir Figure 4) permet de compresser un objet 3D ou de " rapprocher " sa forme (i.e. ses surfaces) de celle d'un autre objet. Il déplace chaque sommet (vertex) de l'objet à modifier vers une position sur la surface du maillage d'un autre objet spécifié (en utilisant une des trois méthodes disponibles). Il projette les sommets (vertex) le long de leur normale, ou déplace chacun d'eux vers le point le plus proche de la surface de l'autre objet spécifié.

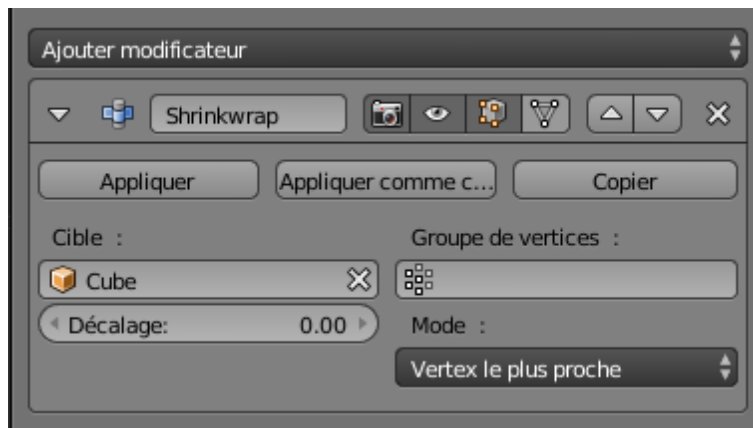


Figure 4 – Le modifier Shrinkwrap

Les trois méthodes possibles pour déplacer les points sont : vers les sommets (vertex) les plus proches, vers les surfaces les plus proches, projection sur des axes au choix. Parce que B' et A' ont déjà une structure topologiquement similaire, nous choisissons d'employer la première méthode.

Dans notre cas, nous réduisons B' (la glène "malade" reconstituée) vers A' (la glène générique - choisie par le chirurgien - préalablement mise à l'échelle), c'est-à-dire que nous appliquons le modificateur Shrinkwrap sur B' en choisissant A' comme cible.

-> Tout d'abord, on superpose A' et B'.

1. Choisir A', " objet -> transformer -> origine vers le centre de masse " pour bien fixer son centre.
2. Choisir B', " objet -> transformer -> origine vers le centre de masse " pour bien fixer son centre.
3. Mettre ensuite l'origine de A' et l'origine de B' à un point commun, (0,0,0) par exemple.

-> Choisir B' -> add modifier " Srinkwrap »" -> choisir A' comme cible -> choisir " vers vertex le plus proche " -> " appliquer comme shape keys ".

### 2.3.2 Le taux de déformation : Shape Keys

En fait dans la dernière étape, si on ne choisit pas « appliquer comme shape keys » mais appliquer directement, on va déformer presque complètement (malgré la différence entre les nombres de points, on maximise quand même la déformation) B' vers A'. Néanmoins nous cherchons à définir un intermédiaire entre B' et A' ; on introduit donc une donnée d'objet " shape keys " (voir Figure 5). La valeur de shape keys définit le degré de déformation d'un objet vers un autre.

Après avoir cliqué sur " appliquer comme shape keys ", on va dans la rubrique " Donnée ", on trouve sous " clés de forme " notre fonction de déformation à employer (ici shrinkwrap). En mettant 0 comme valeur de shape keys, la glène B' reste inchangée ; en mettant 1 comme valeur de shape keys, on obtient une " quasi glène générale " (ça ne peut pas être A' car A' et B' n'avaient pas le même nombre de points à l'origine). Nous choisissons la valeur 0.5 pour obtenir une glène intermédiaire. Des études de sensibilité ultérieure pourraient affiner le choix de cette valeur.

## 3 L'ensemble du processus de reconstitution de glène

Figure 6 conclut l'ensemble du processus de la reconstitution de la glène.

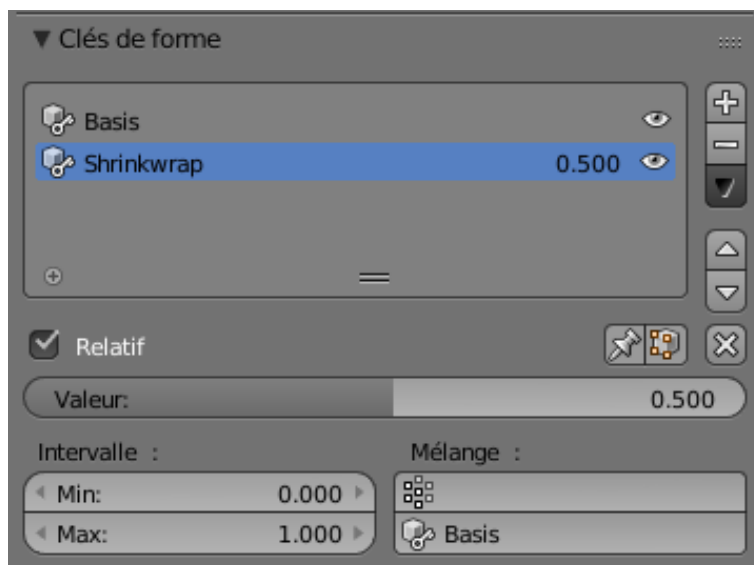


Figure 5 – La donnée d'objet : Shape Keys

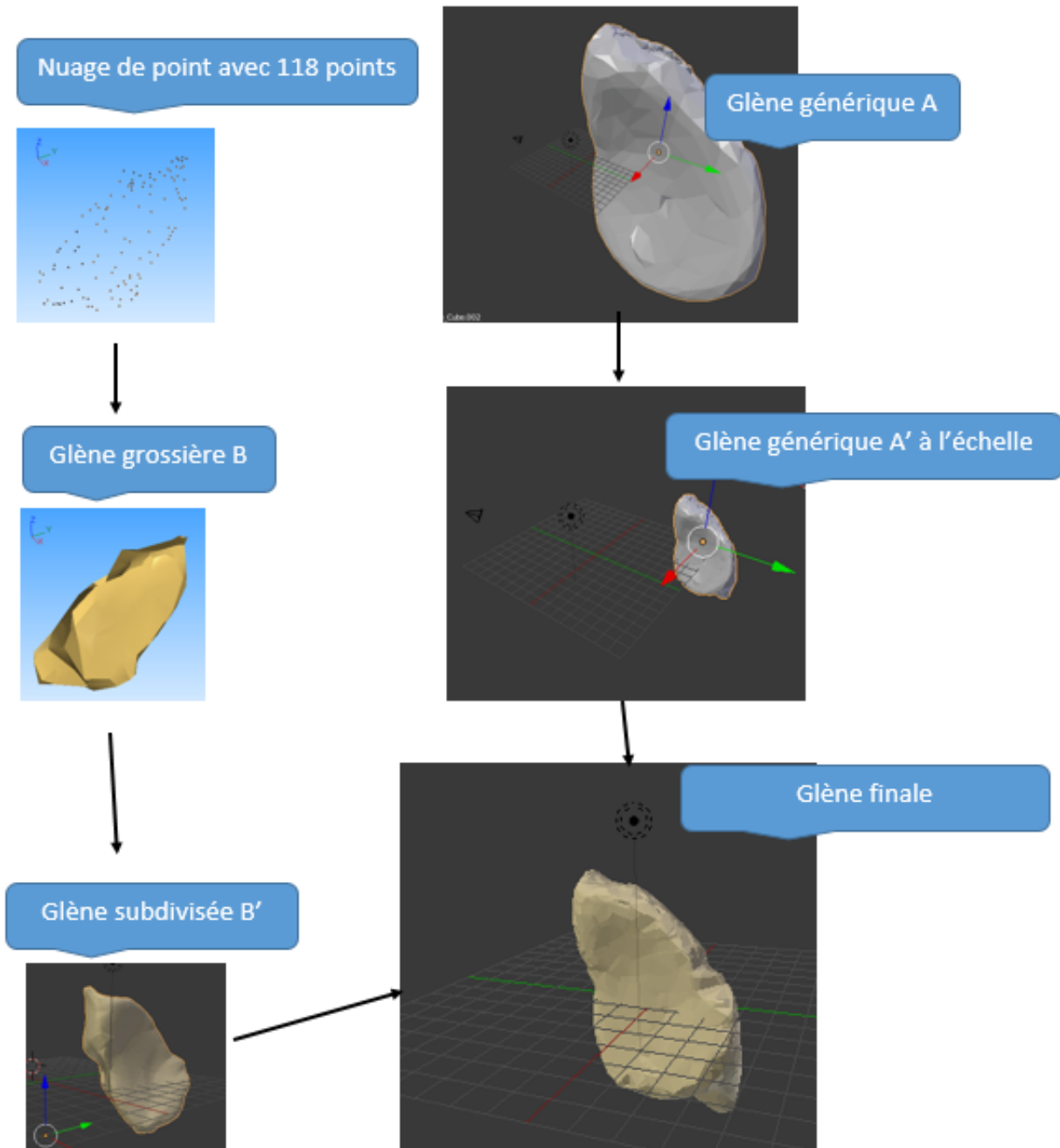


Figure 6 – L'ensemble du processus de la reconstitution de la glène

## Deuxième partie

# Développement

La deuxième partie du PR&D consiste dans un premier dans à développer l'algorithme calculant les coordonnées d'un point X sur la glène, ensuite, à faire de nombreux jeux de tests à partir des donnée existantes. Ces données sont des résultats du scanneur des omoplates saines. Et troisièmement, à regrouper de 43 glènes pour n'en sortir qu'une seule selon le résultats du projet "Omoplates et AAH-R" avec les méthodes de "Shrinkwrap" et "Shape keys" sous Blender.

# 6

## Mise en oeuvre de l'algorithme : calculer X

### 1 Préparation des données

Rappelons qu'**en théorie** (les cas pratiques lors d'une opération chirurgicales), il est nécessaire de posséder les données suivantes pour calculer les coordonnées d'un point X sur la glène :

- \* les coordonnées de 4 points (només  $Y_i$ ) hors de la glène : obtenues directement du fichier issu du résultat d'un scanners sur une omoplate malade (donc ce fichier ne contient pas d'information sur la glène) ;
- \* les distances respectives entre ces 4 points et X : calculées à partir des équations linéaires multiples.

Mais **en réalité**, durant la période de mon projet, nous avons pas encore les résultats des équations. En revanche, nous disposons de 43 fichiers .csv, qui sont aussi des résultats d'un scanners, chacun des fichiers décrit une omoplate saine en donnant les coordonnées de 20 points sur l'omoplate dont 12 sont sur la glène et 8 sont sur l'omoplate mais hors de la glène. Nous pouvons donc en profiter pour nos études et les tests. **Figure 1** est un exemple d'un fichier .csv (voir chapitre 1 section 2.2 pour les définitions des points), il contient les coordonnées de 20 points, dont les points 1, 2, 3, 4, 8, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 sont sur la glène et les points 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 sont hors de la glène, notons que les numéros des répartitions des points sur l'omoplate sont pareilles pour tous les fichiers .csv.

Pour calculer un X, nous prenons directement 4 points parmi les points hors de la glène : 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 comme les  $Y_i$ . Quand aux distances, nous prenons aussi les  $XY_i$  du tableau en appliquant l'équation de distance, mais avec un peu de perturbation afin de "simuler" la vraie situation. Par exemple si la distance entre le point 1 et le point 7 est calculé 106.324676, nous ne gardons que la partie entière 106. Nous allons désormais "oublier" les 12 points de la glène comme s'ils existaient pas. De cette façon, les deux conditions nécessaires sont simulées pour les prochaines étapes.

### 2 Description du programme

La programmation réalisant l'algorithme mentionné dans le chapitre 4 a été réalisée en langage Java. Prenant comme entrées un fichier .csv avec les coordonnées de 20 points d'une omoplate saine, il "simule" la situation réelle pour obtenir les informations requises, il calcule à la fois les coordonnées de tous les points sur la glène. Il va retourner un fichier .csv (**Figure 2**) contenant les coordonnées des 12 points sur la glène de cette omoplate (imaginée malade) en précisant les points Y correspondant. Il renvoie aussi un fichier .obj directement pour l'importation dans Blender plus tard. Le fichier .obj ne stocke que les coordonnées des 12 points calculés sur la glène.

	A	B	C	D
1	Point\XYZ	X	Y	Z
2	Point1	32,1174889	-6,57890511	47,3587914
3	Point2	48,5650711	-6,07317209	9,40575218
4	Point3	38,9227448	8,44684029	21,017498
5	Point4	43,4070396	-22,3883381	18,0050087
6	Point5	-41,2307968	-12,8098335	47,6736527
7	Point6	-6,8959465	-15,1821785	-112,529404
8	Point7	-65,6251144	7,8782301	8,08651733
9	Point8	33,6218987	5,47141647	33,1593552
10	Point9	49,1461945	31,6425209	54,9164352
11	Point10	46,6389732	-11,28969	72,5401459
12	Point11	40,692791	-41,5455627	48,4240036
13	Point12	1,22741985	-13,8510094	32,3132095
14	Point13	17,7704468	-11,1514092	-77,6713333
15	Point14	43,7798386	3,28579903	6,25039482
16	Point15	41,7087021	-15,4982729	7,86523342
17	Point16	36,2702026	8,52005673	24,5336838
18	Point17	32,2960358	4,61016464	36,9250145
19	Point18	31,2047234	-5,61231804	46,7250214
20	Point19	37,0220795	-19,0448761	34,1779289
21	Point20	35,7217102	-14,021862	42,7395325

Figure 1 – Exemple d'un fichier .csv

Nous avons créé les classes Point, Cercle, Plan et Sphere pour présenter les points, les cercles, les plans et les sphères mentionnés dans l'algorithme. Nous avons aussi créé une classe BasicGeo qui fournit des méthodes statiques qui permettent aux calculs d'opérations géographiques. La classe CalculerX réalise la démarche donnée dans [Algorithme 1](#) (Chapitre 5) et [Algorithme 2](#) (Chapitre 5). La classe Main lit un fichier .csv, modifie des données pour simuler et applique la méthode dans la classe CalculerX à tous les X en obtenant des résultats sur toute l'omoplate.

Donc une fois d'exécution du programme traite tous les points nécessaires pour une reconstitution de glène. Les difficultés ont intervenu surtout pendant les résolutions des équations géométriques.

[Figure 3](#) montre brièvement les relations entre les classes dans le programme.

Le programme est maintenant capable de :

- lire un fichier .csv ;
- séparer les points sur la glène et hors de la glène ;
- calculer automatiquement des distances "perturbées" ;
- calculer les coordonnées de tous les points sur la glène ; générer un fichier .csv contenant toutes les informations des calculs ;
- générer un fichier .obj importable par Blender contenant le nuage de 12 points sur la glène.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
X	Y1	d(XY1)	d'(XY1)	Y2	d(XY2)	d'(XY2)	Y3	d(XY3)	d'(XY3)	Y4	d(XY4)	d'(XY4)	X(x,y,z)					
1	10	27.9769281946	27	6	152.584598	152	11	31.55253366	31	12	30.08821776	30	(39.23562172686289,-14.891530969111583,34.92847417508044)					
2	12	45.2150683166	45	10	51.8904452	51	6	129.3587466	129	9	45.60334236	45	(46.92999026826705,-12.0089878033132,5.381935172378505)					
3	11	47.4493015556	47	6	139.438628	139	10	41.69879146	41	9	29.44754566	29	(39.4973034661256,0.4535545177076017,20.826196605869576)					
4	6	135.334042176	135	9	52.4783866	52	7	100.5299696	100	11	26.53576606	26	(39.388098589261126,-23.878402563362627,14.13654171750981)					
8	9	29.6293313096	29	7	95.1184771	95	10	37.62462346	37	11	45.14249886	45	(38.66591034426287,-0.07447396260599781,27.158923307132163)					
14	6	128.923591366	128	11	49.7433795	49	10	52.76891826	52	12	44.45772536	44	(38.69934271993893,-1.7322414839239375,8.61592732161044)					
15	9	50.5295431076	50	12	43.6700564	43	11	38.33146666	38	6	128.3739396	128	(43.90032204506241,-17.456543452732486,5.01414338288535)					
16	12	35.4920538386	35	7	96.1608898	96	9	29.06094386	29	6	140.4728666	140	(40.17894859439492,0.6100707153982214,22.98743844674265)					
17	10	35.8506983026	35	7	94.1385407	94	11	44.26698246	44	12	31.53245826	31	(37.048596102971125,-1.7031245382122382,30.123298505177576)					
18	10	27.4036694516	27	9	39.7386226	39	7	96.74621416	96	12	30.69557626	30	(35.44428603286873,-11.52513126591252,39.53378786638026)					
19	6	140.137697756	140	7	90.1154081	90	11	28.55655316	28	9	49.73043346	49	(29.293314887647398,-20.611942436255276,25.52891601734876)					
20	6	150.949341816	150	7	97.5367453	97	11	27.44521186	27	10	29.30759026	29	(35.81720505506911,-19.247569925696894,33.82783508493069)					

Figure 2 – Résultats des calculs

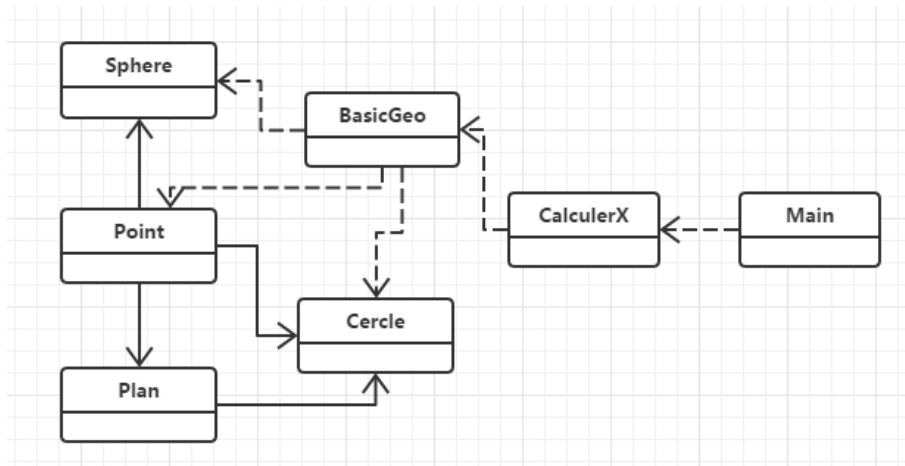


Figure 3 – Relations entre classes

# 7

## Campagne de tests et résultats d'application des tests

A part les 43 fichiers .csv, il est aussi à notre disposition les 43 fichiers .blend correspondants. Ces fichiers sont des modèles 3D d'omoplastes complètes et saines.

### 1 Tests : reconstitution de modèle grossière à partir de nuage de point

Nous avons testé le programme sur tous les fichiers .csv en obtenant 43 fichiers .obj donc chacun représente un nuage de point en attente d'une reconstruction. Le code ci-dessous est la source d'un des fichiers .obj qui contient les coordonnées de 12 points trouvés, il concerne l'omoplate droite de l'individu TouzeauT.

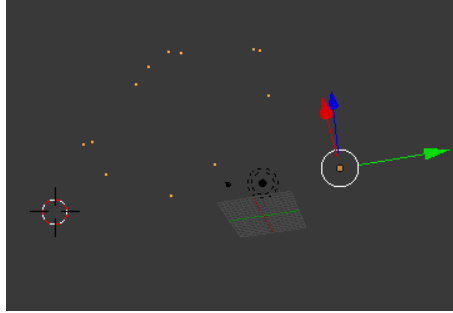
```
1 o points
2 v -44.20669958468964 -10.785393061264388 37.51201737127427
3 v -50.32696633441652 1.2309897178456275 3.214653365151829
4 v -46.013725863756555 3.609373824373078 15.746674597547667
5 v -49.249312053166676 -20.651859327069346 12.925108906773728
6 v -45.869027331948224 2.6735096660146116 27.01512718195292
7 v -45.28004938684796 2.9330504206904067 3.1253483270520057
8 v -34.50066249987577 -10.261203657930118 13.168836628068643
9 v -46.64638419202599 5.234435777092429 18.16666420966397
10 v -43.86745287926288 -6.212722232408186 29.539846969744
11 v -44.97109492279061 -4.55577741650375 37.45786028016265
12 v -50.45702183467597 -18.5365132073865 25.812517050163017
13 v -53.65537948822934 -7.666196763195699 29.816533981320262
```

Pour créer une glène, nous ouvrons d'abord le fichier *TouzeauT\_Omo\_D.blend* concernant l'individu TouzeauT. Nous importons ensuite les 12 points (le fichier *TouzeauT\_Omo\_D\_results.obj*) créés dans ce fichier .blend concernant le modèle de l'omoplate correspondante. Lors de l'importation, en raison de la cohérence de repère, configurer l'axe Y comme « Foward » et l'axe Z comme « Up ». Précisément, sous Blender, dans le menu « Fichier », choisir « importer » et indiquer « .obj » comme type de fichier ; après avoir choisi le fichier voulu, dans la partie de configuration (à gauche dans la fenêtre qui apparaît), configurer l'axe Y comme « Foward » et l'axe Z comme « Up ». Ainsi l'orientation du repère du nuage de points et celle du repère de l'omoplate sont coordonnées (Figure 4).

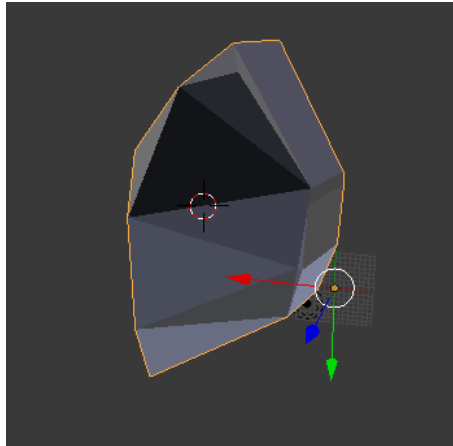
Marquons que les 12 points importés sont des points sur la face extérieure de la glène. Si on construit un modèle n'à partir que des ces points, nous n'allons sans doute obtenir qu'une surface. Afin d'avoir une forme complète de la glène, nous avons besoin de savoir son épaisseur, donc nous récupérons quelques points (à peu près) à la position de la masque (autour de la masque) depuis l'omoplate.

Ensuite, nous pouvons séparer les 12 points en même temps avec les nouveaux points récupérés, et appliquer les procédures proposées dans la chapitre 5, section 2.1.1 et 2.1.2 afin de créer une glène grossière à la bonne échelle correspondante à l'individu Touzeau.

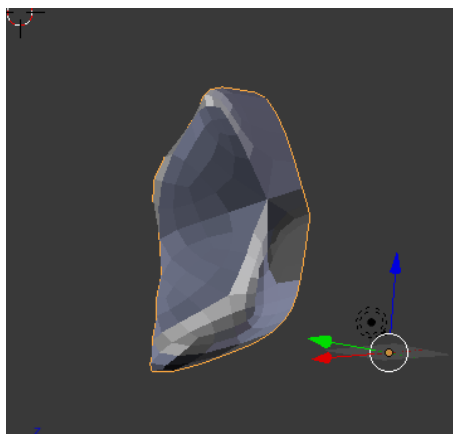
**Figure 1** nous montre les 12 points. **Figure 2** est la glène grossière construite avec le plug-in "PointCloud Skinner", et **Figure 3** est la glène raffinée avec le modificateur "subdivision surface" sur la base de la première glène.



**Figure 1** – 12 Points importés



**Figure 2** – Glène grossière



**Figure 3** – Glène "Smoothin"

Particulièrement, nous avons utilisé le plug-in "PointCloud Skinner" sous Blender parce que le nombre de point au stade actuel n'est toujours pas beaucoup. Le paramètre "Dist for skin" est configuré à 20 parce que la distance moyenne entre les 12 points est environ 20 unités après des mesures. Si, dans le future, nous pourrions en avoir plus, l'utilisation de 3DReshaper sera plus intéressante.

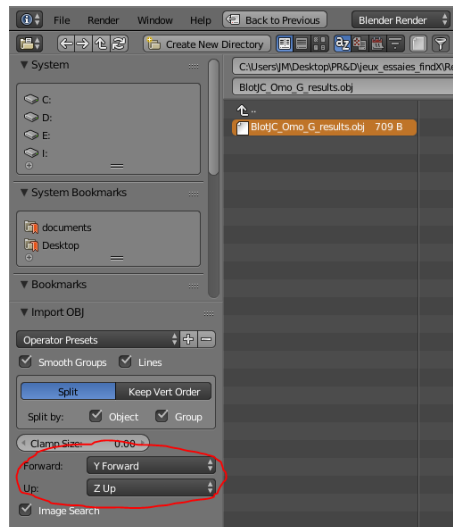


Figure 4 – Configuration de repère lors de l'importation

## 2 Tests : Généralisation d'une glène générique

Dans la première partie de la recherche, nous avons supposé l'existence d'une glène générique avec laquelle nous fusionnons avec la glène constituée du nuage de points. Maintenant nous expliquons comment obtenir une telle glène d'une base de données de 43 omoplastes saines. Tout d'abord, il nous a fallu découper la partie de glène de son omoplate.

### 2.1 Introductions des fichiers référencés

« Typologie des omoplastes et analyse ascendante hiérarchique de données avec le logiciel R » est Un autre sous-projet se situant dans le projet "épaule" étudié sur ces 43 omoplastes saines. Son objectif est faire une analyse ascendante hiérarchique de données et de chercher des dendrogrammes pour décrire les relations de distances entre les omoplastes. Les dendrogrammes fournis par ce projet proposent plusieurs regroupements d'omoplate selon différentes stratégies. Un dendrogramme est le résultat d'une analyse d'AAH. De Figure 5 à Figure 8 sont les résultats de ce projet (ref « rapport du projet "Typologie des omoplastes et analyse ascendante hiérarchique de données avec le logiciel R" »).

Nous disposons également les fichiers .blend (ceux qu'utilise le projet « Typologie des omoplastes et analyse ascendante hiérarchique de données avec le logiciel R ») de toutes les omoplastes à étudier (43 individus).

### 2.2 Etablissement des groupes d'omoplate suite à une analyse des dendrogrammes

A partir des quatre dendrogrammes donnés, nous répartissons toutes les omoplastes en 7 groupes, (la plus part des) les omoplastes dans le même groupe sont sous la même classification dans chaque dendrogramme. Pour mieux montrer les groupes de chaque omoplastes dans chaque dendrogramme, nous avons coloré toutes les omoplastes selon leur groupe. Figure 9 montre une partie de l'analyse qui indique les groupes des omoplate (proposée par M. PROUST).

Une typologie pourrait être la suivante :

- \* G1 : 3, 14, 27, 28, 30
- \* G2 : 16, 19, 33, 36, 41
- \* G3 : 7, 15, 20, 26, 42
- \* G4 : 8, 9, 25, 29, 31, 32, 35, (+2)

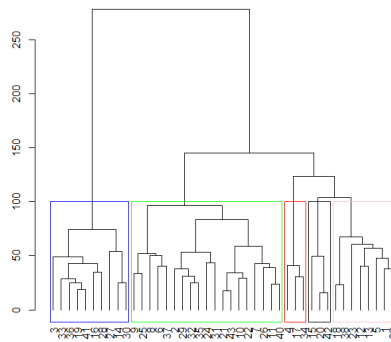


Figure 5 – Dendrogramme avec la méthode « Ward+Euclidien »

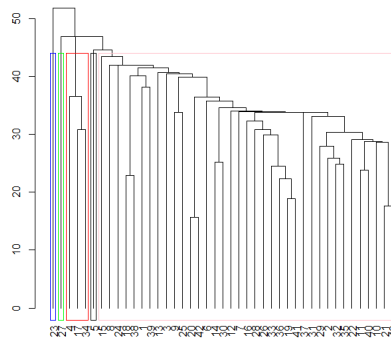


Figure 6 – Dendrogramme avec la méthode « saut maximum + euclidien »

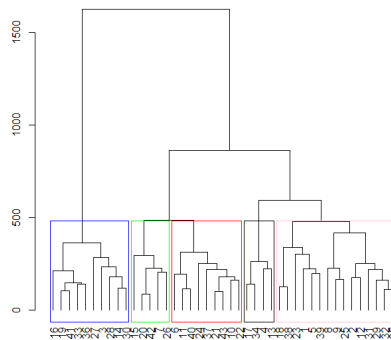


Figure 7 – Dendrogramme avec la méthode « ward+manhattan »

- \* G5 : 6, 10, 11, 21, 22, 37, 40, 43 (+24)
- \* G6 : 1, 5, 18, 38, 39 (+12), (+23)
- \* G7 : 4, 17, 34 (+13)

Par exemple les omoplastes 3, 14, 27, 28 et 30 sont tous dans le même groupe avec la méthode « Ward+Euclidien » ; elles sont en même temps dans le même groupe pour la méthode « saut maximum + euclidien » ; pareil pour la méthode « ward+manhattan » et la méthode «saut maximum + manhattan ». Pour chaque groupe, dans chaque dendrogramme, nous ne nous intéressons qu'aux omoplastes du même côté, c'est-à-dire nous divisons un groupe d'omoplastes encore en deux selon son côté (gauche ou droite) et nous les traitons séparément.

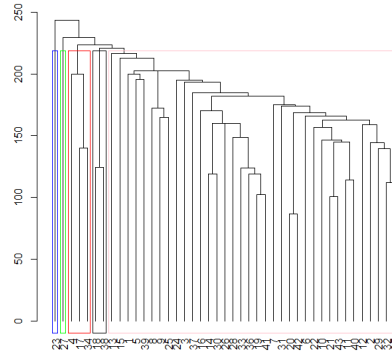


Figure 8 – Dendrogramme avec la méthode «saut maximum + manhattan »

Individu (W+Euclidien)	n° d'individu	Cote	Sexe	Max+euclidien	W+Manhattan	Max+Manhattan
AlphonsineOmo_D	1	Droit	M			
AlphonseOmo_D	2	Droit	M			
AlphonseOmo_D	3	Droit	F			
AlphonseOmo_D	4	Droit	M			
AlphonseOmo_D	5	Droit	M			
AlphonseOmo_D	6	Droit	M			
AlphonseOmo_D	7	Droit	F			
AlphonseOmo_D	8	Droit	M			
AlphonseOmo_D	9	Droit	M			
AlphonseOmo_D	10	Droit	M			
AlphonseOmo_D	11	Droit	M			
AlphonseOmo_D	12	Droit	M			
AlphonseOmo_D	13	Droit	M			
AlphonseOmo_D	14	Droit	F			
AlphonseOmo_D	15	Droit	M			
AlphonseOmo_D	16	Droit	F			
AlphonseOmo_D	17	Droit	M			
AlphonseOmo_D	18	Droit	M			
AlphonseOmo_D	19	Droit	M			
AlphonseOmo_D	20	Droit	F			
AlphonseOmo_D	21	Droit	M			
AlphonseOmo_G	22	Gauche	M			
AlphonseOmo_G	23	Gauche	M			
AlphonseOmo_G	24	Gauche	M			
AlphonseOmo_G	25	Gauche	M			
AlphonseOmo_G	26	Gauche	M			

Figure 9 – Classifications de omoplastes

Admettons que ce soit un bon résultat, les analyses suivantes se dérouleront sur le groupe 4 en ne retenant que les omoplastes de gauche pour montrer la méthodologie (5 individus : 25, 29, 31, 32, 35) (i.e. BoulegueB, CoinO, GomezP, HeyronJ et LecampC). Selon les distances entre ces 5 individus du dendrogramme complet, nous extrayons le dendrogramme Figure 10 qui ne contient que 5 omoplastes :

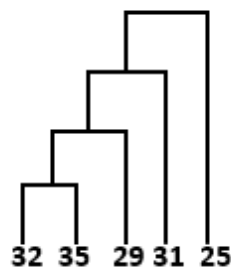


Figure 10 – Numéros des glène à regrouper

## 2.3 Découpage des glènes

### 2.3.1 Pré-traitement des omoplastes

**Uniformiser l'origine et l'orientation de toutes les omoplastes avec Blender** Dans ce rapport, nous définissons le centre de masse comme l'origine de toutes les omoplastes et nous mettons leurs origines au point (0, 0, 0), donc la même démarche pour tous ces 5 fichiers .blend. Pour réaliser cela :

- > ouvrir avec Blender le fichier .blend d'une omoplate en question
- > Mode Objet
- > Objet > transformer > Origine vers centre de masse
- > Transformer > Position : (x, y, z) = (0, 0, 0); Rotation : (x, y, z) = (0, 0, 0) (Figure 11).

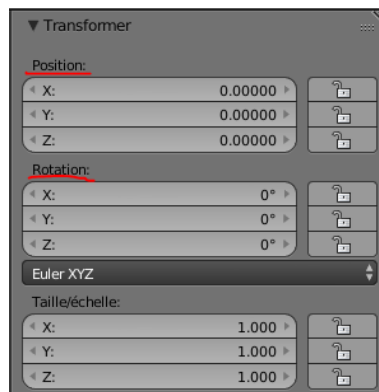


Figure 11 – Fixer son origine

**Mettre chaque omoplate à l'échelle de sa réalité** Grâce à la matrice des distances entre les points remarquables (voir définitions dans le chapitre 2), nous avons une idée sur les différences d'échelle entre les omoplastes. Nous avons choisi la distance entre le point 5 et le point 6 (d56) comme référence d'échelle d'une omoplate. En réalité, d56 des 5 omoplastes sont 183.7(BoulegueB\_G), 162.2(CoinO\_G), 173.4(GomezP\_G), 164.3(HeyronJ\_G), 157.9(LecampC\_G).

La bonne proportion entre les omoplastes doit être à peu près 184 : 162 : 173 : 164 : 158.

Dans Blender, pour chaque fichier 3D d'omoplate, nous mesurons la distance entre le point 5 et le point 6 en obtenant 183(BoulegueB\_G), 162(CoinO\_G), 174(GomezP\_G), 163(HeyronJ\_G), 158(LecampC\_G) (en UB, unité Blender). Leurs proportions à mettre aux échelles de la réalité sont donc 1, 1, 1, 1, 1.

Pour mesurer la distance entre deux points sous Blender :

- > ouvrir avec Blender le fichier .blend
- > Fichier > Préférences utilisateurs > Add-ons > Vue 3D > activer Mesure Panel
- > Mode Edit
- > Shift + LMB (clique droite de la souris) afin de choisir les deux points (à la position approximative)
- > F (taper la touche F du clavier)
- > Affichage de mesh > activer Longueur dans Infos d'arête, la distance entre deux points s'affiche dans la vue 3D à la position entre les deux points. (Figure 12)

### 2.3.2 Découpage d'une glène

Pour chaque omoplate saine, nous allons donc découper sa glène, puis les regrouper deux par deux pour n'en construire qu'une seule. **Découper la glène de l'omoplate**

- > ouvrir avec Blender le fichier .blend d'une omoplate en question
- > Mode Edit

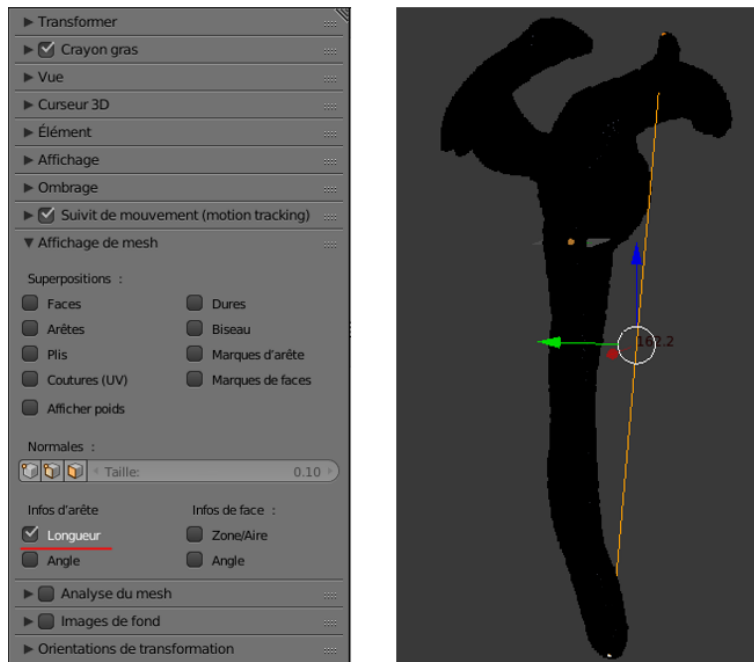


Figure 12 – Mesurer la distance entre deux points

- > Sélection de faces > A (sélectionner toutes les faces)
- > Outils > Bisecter (Figure 13)
- > (observer la position de la glène sur l'omoplate) LMB pour choisir le point de départ du découpage > rester appuyer et glisser la souris jusqu'à ce que la sécante soit faite > relâcher LMB (Figure 13)
- > dans le panneau de configuration en bas à gauche, activer Remplir et Effacer Externe pour n'en garder que le côté de la glène (Figure 14)
- > exporter la glène obtenue comme fichier .obj et le stocker dans une Bdd temporaire\_des\_glènes\_à\_regrouper.

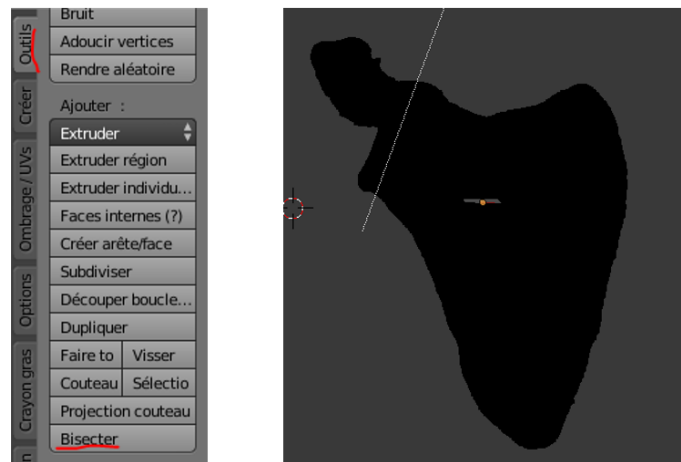


Figure 13 – Découpage d'une glène

Nous exécutons la même démarche pour les 5 omoplates ainsi nous obtenons 5 glènes. Il faut faire attention à la position et à l'orientation du découpage à chaque fois pour que l'épaisseur et la surface de la glène soient proportionnelles.

Figure 15 sont les résultats des découpages de 5 glènes correspondantes aux 5 individus, elles sont de gauche à droite : BoulegueB, CoinO, GomezP, HeyronJ et LecampC, importés dans le même fichier.

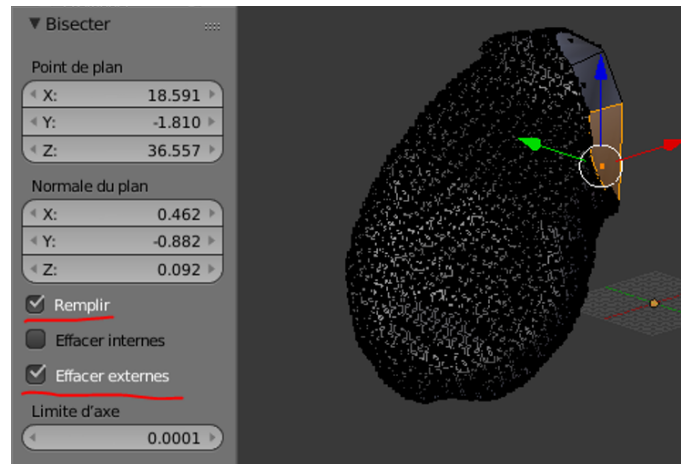


Figure 14 – Découpage d'une glène

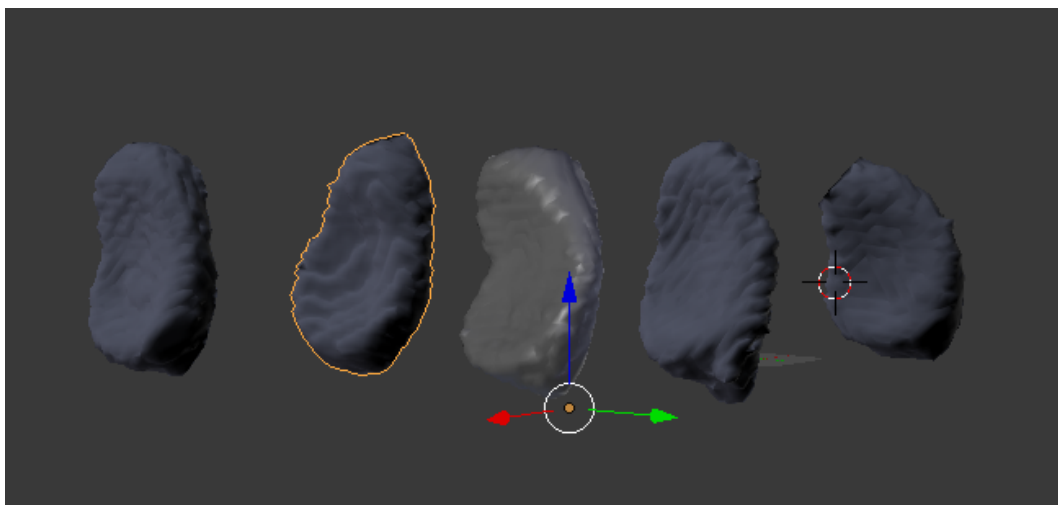


Figure 15 – Modèles de 5 glènes découpées

## 2.4 Fusionner les glènes

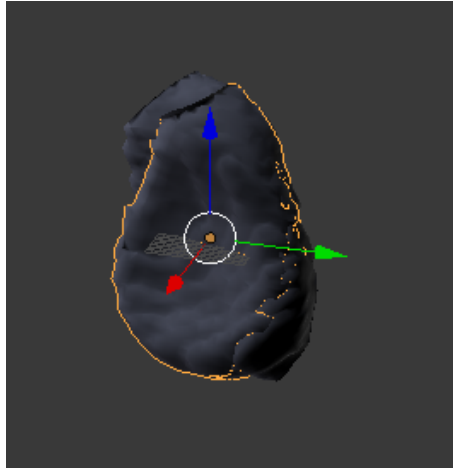
Procéder au « moyennage » des glènes (cf chapitre 5 section 2.3.1 et 2.3.2 ), la seule différence est que les deux glènes n'ont pas de notion de sens, nous pouvons déformer de la glène A à la glène B, ou dans l'autre sens), en les prenant 2 par 2, selon une lecture adéquate du dendrogramme, jusqu'à ce que toutes les glènes originelles aient été traitées. Pour une paire donnée, appliquer la procédure « moyenne ». On

obtient une nouvelle glène virtuelle ; supprimer les 2 glènes originelles et rajouter cette nouvelle glène virtuelle dans *BdD temporaire\_des\_glènes\_à\_regrouper*.

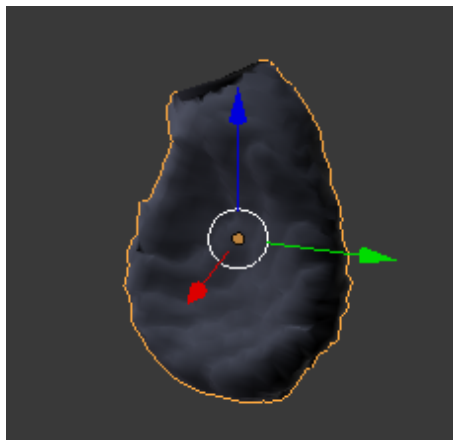
Dans l'exemple que nous avons proposé, nous prenons la glène 32 et la glène35 (découpées de l'omoplate 32 et l'omoplate 35), les fusionnons en obtenant une nouvelle glène (nommée A) ; nous traitons ensuite A et la glène 29 en obtenant la glène B, ensuite B et la glène 31 en obtenant la glène C, et à la fin C et la glène 25 en obtenant la glène finale de ce groupe. **Figure 16** est la glène C et la glène 25. **Figure 17** montre le résultat d'une telle fusionnement.

## 3 Observation des résultats

Après de nombreux d'essayages, quand le nombre de points calculés atteint à 100, la forme garde bien les caractéristiques d'une glène sans avoir besoin d'effet "smoothing". Parce que si tous les points du nuage viennent des équations multiples linéaires (au lieu d'être "rajouté" artificiellement), nous perdons moins d'informations internes d'une glène.



**Figure 16** – Fusionnement de la glène C et la glène 25



**Figure 17** – Glène finale

Lors de l'importation des points calculés, cela se trouve que des fois un (ou plus de) point perturbe trop du centre des autres points, il est donc nécessaire d'observer les résultats 3D et les enlever les points isolés.

# 8

## Méthodologie de suivi et de gestion du projet

Dans la phase de recherche comme dans la phase de développement, la méthodologie appliquée à mon projet est la méthode agile. Précisément, pour tous les étudiants qui travaillent sur le projet "épaule", nous rendons un compte rendu toutes les semaines. Un compte rendu contient les éléments suivants :

- Contenus de la semaines : tous ce que nous avons fait pendant cette semaine ; avec pièce-joint s'il y a besoin de démonstration plus en détail.
- Questions : nous posons des questions aux encadrants ainsi qu'à nous même et nous cherchons à les résoudre prochainement.
- Réponds aux questions : les réponses aux questions que nous nous sommes proposées la semaine dernière.

Dès qu'il y a des progrès ou des difficultés dans le projet, nous les faisons validés par les encadrant pour être sûrs de continuer vers la bonne direction.

Figure 1 est le diagramme de Gantt concernant la répartition des tâches pendans la période de recherche. Des tests ont été faits au fur à mesure tout au long du développement.

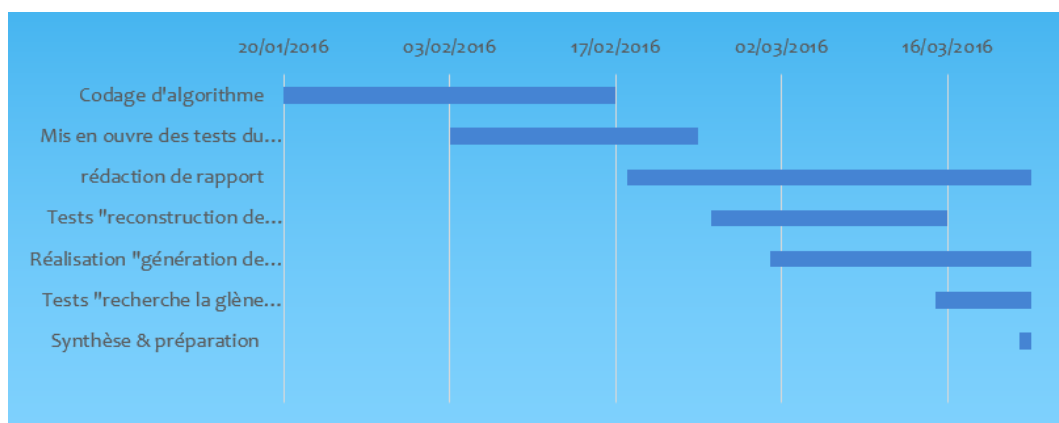


Figure 1 – Diagramme de Gantt

# 9

## Conclusion

### 1 Conclusion pour la partie de la recherche

A la fin de la phase du projet, j'ai pu largement découvrir le domaine de la réalité augmentée ainsi que sa contribution dans le domaine de la santé. J'ai aussi pu me familiariser avec des logiciels populaires pour la modélisation 3D.

Nous avons pu montrer la faisabilité de créer un modèle d'une glène avec les entrées dont nous disposons. En cas de manque de données réelles, nous avons pu faire des tests de notre modèle en créant un nuage de points pour faire des essais.

La prochaine phase du projet peut porter sur les points suivants :

- Regarder le logiciel Meshlab en matière de modélisation 3D à partir de nuage de point.
- Considérer la surface de contact entre la glène et l'omoplate
- Essayer d'appliquer une méthode Morphing et comparer le résultat avec celui de Blender.
- Réfléchir sur la construction de la Base de Données de glènes génériques.
- Etudier plus en détails les algorithmes de modélisation 3D à partir de nuage de points et l'algorithme de "subdivision" sous Blender.

Enfin, je tiens toujours à remercier mes encadrants pour leurs conseils et leur patience.

Reste à faire : développer une interface pour calculer les coordonnées d'un point.

### 2 Conclusion pour la partie du développement

Sur la base des théories proposées pendant la période de recherche, nous avons pu mettre en oeuvre les outils nécessaires pour montrer la faisabilité, surtout la réalisation de l'algorithme calculX, la construction de la glène grossière avec un nombre de point limité et la généralisation de la glène générique. A ce point, nous avons la démarche toute complète pour la reconstitution d'une modèle 3D d'une glène. Certaines méthodes avaient été proposées dans la phase de recherche, de nouvelles méthodes ont été apportées comme le découpage de maillage, la mesure de distance, etc.

Cependant, je n'ai pas pu approfondir sur les algorithmes de la modélisation à partir d'un nuage de points, qui prend une position importante dans le domaine de la modélisation 3D (le logiciel open source Meshlab).

Il m'a aussi manqué de la précision lors du découpage d'une glène concernant l'épaisseur. Si le temps permet, il sera inmanquablement calculer l'épaisseur qu'il faut par rapport à la surface de l'extérieure de la glène construite, ainsi que la méthode sous Blender pour découper une partie avec une distance précise.

Je prie à remercier à la fin, mes encadrants, avec toutes mes salutations et mes respects de leurs aides et bontés.

# Annexes

A

## Ma deuxième annexe

[WWW1, 1-8, WWW2-WWW5]

# Comptes rendus hebdomadaires

## Compte rendu n°1 du 20/09/2015

1) « Réunion du 16 septembre » : a) Les consignes ont été passées : constitution du GdT, pas d'échanges bilatéraux : tout courriel doit être adressé à tout le GdT. Voir composition ci-dessus. Le PRD se déroule 2 jours/semaine sur toute l'année (les mercredi et jeudi). Présence sur le lieu de travail obligatoire durant le créneau horaire (5mns de pause par heure de travail). Jusqu'à nouvel ordre : dans le Learning Center bâtiment au RdC (voir Betty Vias), bâtiment Portalis. Un compte rendu rapide (courriel), sur le contenu de la séance, doit être envoyé chaque semaine, le dimanche minuit au plus tard. Le rapport doit être rédigé au fur et à mesure. Il devra comprendre 5 chapitres : introduction / les états de l'art nécessaires et suffisants / les solutions proposées avec des schémas pouvant être réalisés à la main. Des plans et leur nomenclature / la réalisation retenue / Conclusion et perspectives. Mes horaires sont : les mercredi et jeudi de 8h15 - 12h30, 13h30 - 17 :45. une pause de 15 minutes entre séances. Si absence, alors on prévient immédiatement. Tél : 02 47 36 14 14 : Cécile Boyer, ou, mieux, par courriel, tout le GdT.

b) contenu de la séance : Le sujet a été expliqué et replacé dans son contexte historique, économique et de politique de Polytech Tours. Il se place dans le contexte général du gros projet Epaule. A savoir (voir notes de CProust, notamment) : ( Mes compréhension du sujet) La glène fait une partie de l'omoplate. Lors d'une maladie ou le vieillissement, la glène disparaît. Il faut donc reconstituer une glène pour aider le chirurgien à la remettre sur l'omoplate malade pendant l'opération. Mon projet se constitue donc de reconstituer une glène en 3D. Il se divise en 2 parties principales : la partie théorique et la partie pratique. 1)Côté théorique 3 entrées Un cylindre (qui représentera l'omoplate malade) à échelle 1 dans le modèle Un cône (qui représentera la glène) à échelle n (n=3 ex) Des contraintes de distances. Comme un objet complet contenant le cylindre et le cône, les distances entre tous les points significatifs doivent respecter l'équation basée sur le travail de M.Théo VOISIN. On va transformer le cône pour que les contraintes soient satisfaites. La transformation se fera avec les algorithmes de Morphing (la transition intermédiaire n'a pas d'importance) et de Matching. La modélisation sera faite avec le logiciel Blender, donc il est indispensable de se familiariser avec. 2) Côté pratique Dans un premier temps on suppose qu'on dispose déjà du modèle d'une glène générique déduite de la base de données d'omoplastes. La mise en pratique sera de remplacer le cône avec cette glène et de remplacer le cylindre avec une omoplate obtenue par le scanneur sur le patient. Si le temps permet, on laisse tomber l'hypothèse de disposer de la glène. On va donc généraliser un modèle de glène à partir de la base de données de glène en utilisant des techniques d'analyses de données. Min doit prendre en main le logiciel Blender ; à cette fin elle doit rapatrier un tutoriel du web.

Min nous proposera, mi-octobre au plus tard, un planning d'avancement des travaux. Chacune des étapes fera l'objet d'une présentation orale. Des documents disponibles ont été transmis : le projet 2014-2015 (HS DI5). Des lectures à faire suivront . . .

2) Réponses aux questions : null

3) Questions Christian Proust doit compléter et remettre à jour le pdf de présentation de l'ensemble du projet Epaupe à fin d'affichage pour réceptions futures (l'ancienne version a été commentée et donnée aux étudiants ce jour) ???

Christian Proust doit transmettre un exemple de ppt dont il faudra employer la trame systématiquement lors des présentations ???

Min doit prendre en main le logiciel Blender ; à cette fin elle doit rapatrier un tutoriel du web.

Min proposera, mi-octobre au plus tard, un planning d'avancement des travaux. Chacune des étapes fera l'objet d'une présentation orale.

### Compte rendu n°2 du 27/09/2015

1) contenu de la semaine : a) Les opérations de base & modélisation d'objets simples pour Blender b) Les premières approches des algorithmes de morphing : Morphing est la technique de la transition d'un objet à un autre, dit objet cible. Dans notre cas c'est la transition d'un cône à un autre. A partir de l'équation qui va être nous fournie, on obtiendra un cône « idéal » à côté d'un cylindre, ce cône est donc notre objet cible. La technique de la transition d'objets se divise environ en 3 catégories : basée sur les blocs, sur les segments et sur les points. Vu que notre équation concerne aux relations entre les points, on va concentrer sur les techniques basées sur les segments et les points. Donc il faut 2 étapes : calculer des points sur le cône cible ; la transition. Il faut au moins combien de points ?

2) Réponses aux questions : Min doit prendre en main le logiciel Blender ; à cette fin elle doit rapatrier un tutoriel du web ??? Min arrive à faire des opérations de base et la modélisation d'objets simples

3) Questions Min doit se mettre à connaître le langage Python pour future programmation intégrée en Blender ??? Min doit continuer à chercher des algorithmes et en choisir quelque uns pour faire une comparaison (le choix des points aussi) ??? Min proposera, mi-octobre au plus tard, un planning d'avancement des travaux. Chacune des étapes fera l'objet d'une présentation orale ???

Qu'est-ce que c'est l'algorithme de matching ? à quoi ça sert dans le projet ???

### Compte rendu n°3 du 04/10/2015

1) contenu de la semaine :

Commencer à travailler sur le côté théorique. Après une discussion avec M.Proust, on a décidé pour l'esprit principale de la reconstitution du cône : selon les équations, on peut calculer les coordonnées des  $X_i$  ainsi construire une bijection entre les points des deux cônes de différentes échelles. A partir de ces bijections, on applique un algorithme (ex. morphing) pour accomplir la transformation. Dans un autre mot, deux tâches peuvent s'exécuter en parallèle : Trouver les coordonnées des  $X_i$  dans  $C_1'$  comme les points bijectif des points dans  $C_1$  ; Transformer  $C_1$  en  $C_1'$  en prenant les relations bijectives entre points. Pour trouver les coordonnées des  $X_i$  on prend d'abord deux  $Y_i$ , avec les coordonnées de ce deux  $Y_i$  comme centres et la distances estimées  $X_i Y_{i1}$  et  $X_i Y_{i2}$  comme rayons, on obtient deux sphères. Trois cas possibles : les deux sphères se touchent, se coupent ou se séparent. Dans les cas où les sphères se séparent, on essaye de déformer  $Y_{i2}$  jusqu'à ce qu'elles se coupent, on calcule ensuite le point en commun avec  $Y_{i1}$ . Pareil pour le cas où elles se touchent. Dans le cas où elles se coupent, on rajoute  $Y_{i3}$ , toujours 3 cas possible : sphère  $Y_{i3}$  et le cercle composé du  $Y_{i1}$  et  $Y_{i2}$ . On applique l'algorithme précédant, jusqu'à ce qu'on trouve les coordonnées de  $X_i$  le plus approximatif. Comme ça on trouve le premier  $X_i$ , on fera itérativement pour trouver le reste.

2) Réponses aux questions : Min doit se mettre à connaître le langage Python pour future programmation intégrée en Blender ??? commencer un peut Min doit continuer à chercher des algorithmes et en choisir quelque uns pour faire une comparaison (le choix des points aussi) ??? il reste le choix des  $X_i$  et l'algorithme de la déformation. Comme pour définir un  $X_i$  on peut choisir les  $Y_i$  dans l'ordre décroissant de  $R_2$  correspondant, mais quelles  $X_i$  nécessite-il ? Combien en faut-il ?

3) Questions Min doit se mettre à l'algorithme de la déformation du cône (l'algorithme Morphing????)  
Min propose un planning d'avancement des travaux. Chacune des étapes fera l'objet d'une présentation orale????

#### Compte rendu n°4 du 13/10/2015

D'abord, je suis très très désolée d'avoir tardé ce compte rendu la semaine dernière !

1) Contenu de la semaine : Après avoir lu des articles sur Morphing, on décide de laisser à côté d'abord les algorithmes complexes et de repartir des étapes suivantes : I. On reste sur une étude de type Morphing a) Sous Blender désigner un cône O1 « échelle3 » et récupérer l'objet 3D correspondant. Quelle est la modélisation 3D adaptée dans Blender ? Quelle est la structure de données d'un objet dans le stockage interne de Blender ? un ensemble de triangles ? Une liste chaînée de points ? Relever quelques points (12 par exemple) sur le cône  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots (x_{12}, y_{12}, z_{12})$ . b) Dans l'autre sens, donner à Blender ces 12 points comme entrer pour qu'il dessine un objet O2 (un cône). Récupérer ensuite le fichier 3D correspondant. c) Comprendre comment passer de O1 à O2. d) Changer légèrement les coordonnées des points et donner à Blender de nouveau ces 12 points modifiés pour qu'il dessine un nouveau cône O3. e) Comprendre comment passer de O1 à O3 II. Voir aussi Matching d'un objet 3D et un nuage de points

2) Réponses aux questions : Min doit se mettre à l'algorithme de la déformation du cône???? à recommencer à partir des étapes dans 1)

3) Questions : Réaliser les tâches proposées dans 1) Voir Shape Keys et ShrinkWrap

#### Compte rendu n°5 du 21/10/2015

1) Contenu de la semaine : Récupérer les coordonnées des points sous Blender Compréhension de la structure "mesh" : fichier .obj Compréhension de fonctionnalités "Shapes Keys" et "Shrinkwrap" sous Blender d'un plugin "PointCloudSkinner" (programmé en python)

2) Réponses aux questions : Réaliser les tâches proposées dans I (dans cr4)???? arrive à relever des points Voir Shape Keys et ShrinkWrap???? fait

3) Questions : Débuger le script python pour qu'on puisse "dessigner" un objet à partir des points données

#### Compte rendu n°6 du 25/10/2015

Bonjour Monsieur, Je vous remercie de votre approbation et vos conseils pour le PR&D. Vous trouverez ci-dessous le CR de la semaine. Je vous souhaite de bonnes vacances !

1)Contenue de la semaine fichier .obj opérateur "convexe hull", modificateurs Shrinkwrap et Shapes Key

2)Réponses aux questions Débuger le script python pour qu'on puisse "dessigner" un objet à partir des points données????fait

3)Questions Comment à partir d'un nuage de points, reconstituer proprement l'objet 3D correspondant (quels algorithmes ? quels points et combien de points à choisir ?)

#### Compte rendu n°7 du 08/11/2015

1)Contenus de la semaine Lecture des articles et des documentations

2)Réponses aux questions

Null

3)Questions

Null

#### Compte rendu n°8 du 15/11/2015

1) Contenue de la semaine : a) Lectures des articles sur "modélisation à partir d'un nuage de points" b) Essayages de construire des glènes à partir du même nuage de points avec le logiciel "3DReshaper" en changeant de paramètres

2) Répondre aux questions : Null

3) Questions : "3DReshaper" est un logiciel adorable pour construire un objet à partir d'un nuage de points, mais pas gratuit (un mois d'essai et 25 exportations). On continue à travailler dessus, ou on doit essayer de trouver les algorithmes nous même ?

#### Compte rendu n°9 du 20/11/2015

Messieurs,

Bonjour !

Veillez d'abord m'excuser pour jeudi après-midi je pensais qu'on ne pouvait pas rajouter de points dans le maillage avec "Subdivision de surface". En fait je me suis trompée, il suffit d'activer la visibilité en mode "Edit" et Blender rajoute des points. Après l'essayage, il ajoute à peu près 6 fois plus de points après une fois d'application (de 118 à 698 points).

1) Contenus de la semaine : modélisation approximative d'une glène (Vous trouverez en pièce-jointe la spécification concernant cette modélisation)

2) Réponses aux questions : null

3) Questions : a) Est-ce que je peux résumer cette modélisation comme : de trouver un maillage de glène intermédiaire (équilibre, transitoire) entre une glène générique et un cadre de glène imprécis respectant l'équation ? b) Est-ce qu'il y a besoin d'étudier plus en détail les algorithmes derrière la reconstitution de nuages de points, ou on utilise le logiciel sans aller plus loin dans les détails ?

#### Compte rendu n°10 du 29/11/2015

1)° Contenus de la semaine :

Démarche de "subdivision" et "shrinkwrap" en pièce-jointe

2) Réponses aux questions :

Null

3) Question :

Null

#### Compte rendu n°11 du 07/12/2015

1) Contenus de la semaine :

Algorithme de calculs des coordonnées des points pour reconstruire la glène

2) Questions :

Null

3) Réponses aux questions :

Null

#### Compte rendu n°12 du 13/12/2015

1) Contenus de la semaine : En pièce jointe l'algorithme pour calculer les coordonnées des points sur la glène manquante

2) Questions Null

3) Réponses aux questions : Null

#### Compte rendu n°13 du 24/01/2016

1) Contenus de la semaine : Codage de "Chercher les coordonnées des X"

2) Questions : a : finir la programmation b : regarder comment mettre les coordonnées trouvées en format importable dans Blender (ou fichier .obj) c : à voir avec les encadrants

3) Réponses à question : None

**Compte rendu n°14 du 31/01/2016**

1)Contenus de la semaine : Jeux de tests pour obtenir les coordonnées des point sur la glène. Vous trouvez ci-joint les résultats sur le patient ArchambaultS(Omo\_D) ainsi que comment je cherche les données pour jes jeux de tests.

2)Réponds aux question : Null

3)Question : a)Réfléchir à comment transformer les résultats de tests en fichier importable par Blender  
b)Complexité réelle : en réalité, pour obtenir un point de la glène, on doit chercher 4 points hors de la glène et calculer les distances (manuellement). Si on a besoin d'une centaine de points de la glène pour la reconstitution, ça ferait 400 fois de calcules linéaires, est-ce que effectif ? ou bien on cherche à programmer à lire les équations et calculer les distances par programme ?

**Compte rendu n°15 du 10/02/2016**

1)Contenus de la semaine : Développement du programme. Le programme est maintenant capable de : lire un fichier .csv, séparer les points sur la glène et hors de la glène, calculer automatiquement des distances "perturbées", calculer les coordonnées de tous les points sur la glène, générer un fichier .csv contenant toutes les informations des calculs (en pièce-jointe) et générer un fichier .obj (pièce-jointe) importable par Blender contenant 12 points sur la glène.

2)Réponds aux question : Null

3)Question : a) Continuer à faire des tests pour bien fixer les paramètres : le nombre de points nécessaire pour la reconstitution b) Si récupérer des points du fichier décrivant toute l'omoplate (fichier .blender) n'est pas possible, essayer de créer manuellement des points pour avoir de l'épaisseur pour les tests

**Compte rendu n°16 du 21/02/2016**

1)Contenus de la semaine : a. Toujours de tests de reconstruction de modèle de glène. Pour l'instant, les patients suivants sont testés : Archambault\_D, Barrault\_G, CoinO\_G, Kozyrak\_G, Baschoux\_D, TouzeauT\_D. b. Recherche de nouvelles méthodes pour obtenir des points décrivant l'épaisseur. La démarche de la construction de l'épaisseur est en pièce-jointe ainsi qu'un fichier .blend concernant le résultat sur "Baschoux\_D"

2)Réponds aux questions : Si récupérer des points du fichier décrivant toute l'omoplate (fichier .blender) n'est pas possible, essayer de créer manuellement des points pour avoir de l'épaisseur pour les tests—fait (voir avec l'encadrant)

3)Questions : a)Considérer à "enlever" des points de brut (les points isolés, éloignés...etc) Est-ce qu'il faut vérifier le résultat obtenu ? c'est à dire de regarder les points avant la reconstitution s'il y a des points aux positions anormales. Si oui que fait-on avec ?

**Compte rendu n°17 du 03/03/2016**

1)Contenus de la semaine : a) Résoudre le problème du désordre de repère : au lieu de modifier les "+" et "-" dans les données, configurer les axes de référence de repère lors de l'importation du fichier (cf pièce jointe); b) Commencer à synthétiser les démarches.

2)Questions : a) Considérer à "enlever" des points de brut (les points isolés, éloignés...etc) Est-ce qu'il faut vérifier le résultat obtenu ? c'est à dire de regarder les points avant la reconstitution s'il y a des points aux positions anormales. Si oui que fait-on avec ? (non résolue)

3)Réponds aux questions : None

**Compte rendu n°18 du 07/03/2016**

1)Contenus de la semaines : a) Reprendre la méthode pour couper la glène de l'omoplate b) Rédaction de rapport

2)Questions : None

3)Réponds aux questions : None

**Compte rendu n°19 du 13/03/2016**

1) Contenus de la semaine : Regroupement des glènes (construction de la glène générique) selon le dendrogramme issue des résultats des analyses sur 43 omoplastes saines (voir CR19 en pièce jointe)

2) Questions : None

3) Réponds aux questions : None

**Compte rendu n°20 du 20/03/2016**

1)Contenus de la semaine : Rédaction du rapport

2)Questions : Non

3)Réponds aux questions : None

# Webographie

- [WWW1] *Algorithme de recherche : PointCloud Skinner*. URL : [http://hanspg.web.fc2.com/Pages/csv\\_scripts/algo\\_t15.html#briefly](http://hanspg.web.fc2.com/Pages/csv_scripts/algo_t15.html#briefly).
- [WWW2] *Graphic Render and Engine*. URL : [http://graphicrenderandengine.readthedocs.org/en/latest/Stage\\_1.html](http://graphicrenderandengine.readthedocs.org/en/latest/Stage_1.html).
- [WWW3] *Reconstruire des surfaces pour l'imagerie*. URL : [https://interstices.info/jcms/c\\_12845/reconstruire-des-surfaces-pour-limagerie](https://interstices.info/jcms/c_12845/reconstruire-des-surfaces-pour-limagerie).
- [WWW4] *Surface Reconstruction from Point Sets*. URL : [http://doc.cgal.org/latest/Surface\\_reconstruction\\_points\\_3/](http://doc.cgal.org/latest/Surface_reconstruction_points_3/).
- [WWW5] *Triangulation de Delaunay*. URL : <http://baike.baidu.com/view/1691145.htm>.

# Bibliographie

- [1] Salma Abbana BENNANI et Tristan BOLZER. « Classification de données par algorithme de fourmis artificielles : application aux omoplates ». In : *Projet SdD Polytech Tours – DI4* (juin 2014-2015).
- [2] J. BERHOUET et AL. « Les données de base (coordonnées de tous les points) de la trentaine d’omoplates ». 2014.
- [3] J. BERHOUET et AL. « Les données de base (coordonnées de tous les points) de la glène générique ». 2015.
- [4] J. BERHOUET et AL. « Les données de base (coordonnées de tous les points) des 43 omoplates ». 2015.
- [5] J. BERHOUET, M. FACOMPRES, D. BOAS, C. PROUST, M. SLIMANE et L. FAVARD. « Video demonstration, Shoulder surgery augmented reality ». Référence de la présentation à Londres.
- [6] David BOAS, Mohand SLIMANE, Julien BERHOUET et Christian PROUST. « Typologie d’une omoplate ». In : *PFE Polytech Tours - DI5* (mai 2014-2015), p. 146.
- [7] Maxime FACOMPRES. « Réalisation d’une application sur lunettes à réalité augmentée visant à assister le chirurgien au cours d’une opération d’omoplate ». In : *PFE Polytech Tours – DI5* (mai 2014-2015).
- [8] Maxime FACOMPRES et Maxime MARTINEAU. « Reconstitution en 3D d’une partie d’omoplate à partir des coordonnées (x,y,z) de quelques points ». In : *Projet HS Polytech Tours – DI5* (avr. 2014-2015).

# Reconstitution du modèle d'une glène :

Min JIANG

Encadrement : Julien BERHOUE, Mohamed SLIMANE et Christian PROUST

## Objectifs

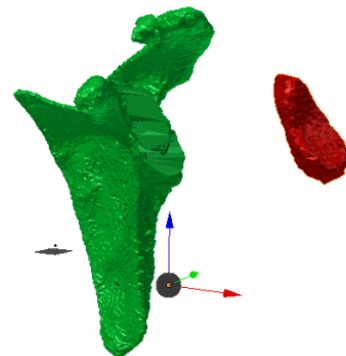
- Employer la réalité augmentée dans le domaine de la chirurgie
- Reconstituer en 3D la partie usée de la glène de l'épaule
- Assister le chirurgien pendant les opérations



Opération à l'aide de réalité augmentée

## Mise en œuvre

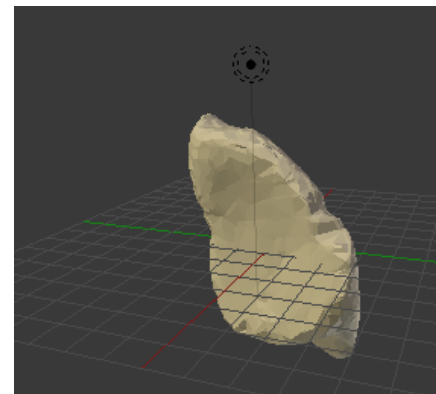
Avec l'aide de nombreux logiciels 3D, en appliquant les techniques de modélisation de nuage de points, notre projet cherche à reconstituer un modèle de la glène disparue, la partie manquante d'une omoplate malade. Ce projet consiste aussi à réfléchir à la construction d'un ensemble de glènes génériques, à savoir en adapter une à tel ou tel patient.



La partie rouge: la partie à reconstruire

## Résultats attendus

- Une glène générique spécifique issue d'une base de données
- Le modèle d'une glène constitué à partir d'un nuage de points
- Un modèle intermédiaire des deux glènes ci-dessus



Un modèle 3D d'une glène sous le logiciel Blender

# Reconstitution du modèle d'une glène

## Résumé

Ce rapport du projet & développement vise à expliquer les études de la modélisation en 3D d'une glène. Le but est de créer, avec le logiciel Blender et potentiellement d'autres logiciels un modèle d'une glène. Cette glène est résultat de la combinaison d'une glène grossière créée à partir des points calculés selon des équation de régression multiples, et une glène généralisée à partir d'une base de donnée de glène. Des techniques de modélisations de nuage de points, de Clustering hiérarchique et de déformations d'images 3D sont employées dans le projet.

## Mots-clés

modélisation 3D, Blender, nuage de points, Clustering, déformation d'images

## Abstract

This report of project of research & development aims to explain the studies of modeling of a glenoid cavity in 3D. The goal is to create with Blender and potentially other programs a model of a glenoid. This glenoid is the result of the combination of a gross glenoid created from points by multiple regression equation, and a glenoid generalized from a glenoid database. Point cloud modeling techniques, hierarchical clustering and 3D deformations are employed in the project.

## Keywords

modeling in 3D, Blender, point cloud, image deformation

## Tuteurs académiques

Julien BERHOUE  
Mohamed SLIMANE  
Christian PROUST

## Étudiants

Min JIANG (DI5)