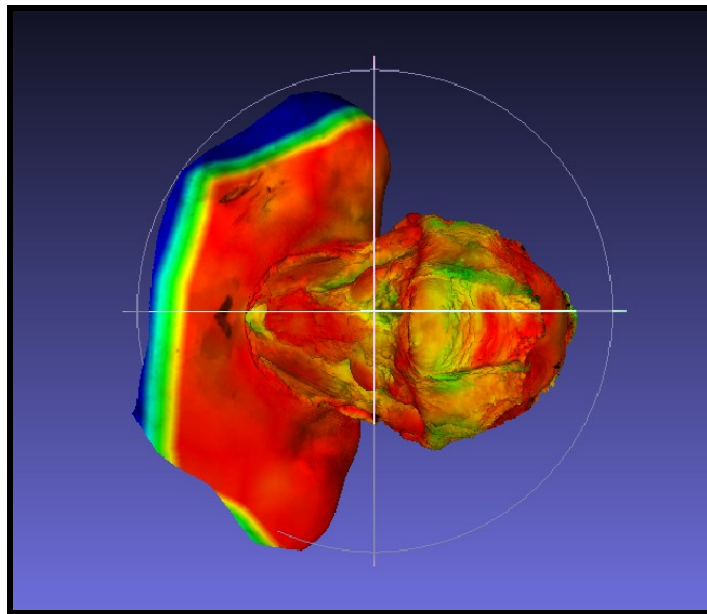


Rapport de stage

Du 10/02/20 au 25/07/20

« Traitement de maillages 3D pour la simulation de dissection chirurgicale »



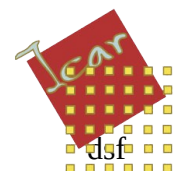
Rédigé par **Thibault ODORICO**

Tuteurs de stage : **Gérard Subsol – Noura Faraj**

Tuteurs universitaire : **Pascal Giorgi**

Pour l'obtention du Master IMAGINA

2020-2021



Remerciements

Tout d'abord j'adresse mes remerciements à Monsieur Gérard SUBSOL qui a proposé le sujet ainsi qu'à Madame Noura FARAJ. Ils ont tout deux acceptés de m'encadrer, fait profiter de leur savoir et de leurs grandes expériences lors de la réalisation de mon stage.

Je remercie également Monsieur Pascal Giorgi, pour son accompagnement, ses conseils et son soutien notamment dans mes démarches administratives.

Monsieur Guillaume CAPTIER a réalisé les dissections permettant l'acquisition surfacique nécessaire à la réalisation de mon stage, je le remercie donc pour son travail ainsi que pour son intérêt et sa disponibilité lors des entretiens réalisés avec mes encadrants de stages.

Ce travail sera examiné et évalué par mes professeurs, je leur adresse donc mes remerciements pour avoir accepté de faire partie du Jury. J'exprime ma considération et mes vifs remerciements à tous mes enseignants du département des sciences de l'informatique pour les enseignements qu'ils m'ont prodigués tout au long de mes années de formation en Licence informatique et en Master IMAGINA à la faculté des sciences de Montpellier.

Ce stage a été réalisé au sein de l'équipe ICAR du LIRMM pendant une durée d'environ 5 mois et demi. Je tiens donc à témoigner toute ma reconnaissance à l'ensemble de l'équipe ICAR ainsi qu'à tout le personnel administratif et technique de cette institution pour l'assistance et l'aide qu'ils m'ont offerts tout au long de ce stage.

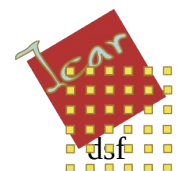
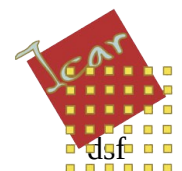


Table des matières

I. Recherche et Conception.....	8
1) Présentation du problème.....	8
2) Traitements envisagées.....	10
3) Algorithme proposé.....	18
II. Développement et Expérimentations.....	20
1) Sélection et mise en place des technologies.....	20
2) Implémentation et expérimentations.....	20
III. Résultats.....	21
1) Résultats de la méthode.....	21
2) Test qualité.....	21



Contexte du stage

Depuis quelques années, l'évolution des nouvelles technologies a permis la création d'enseignements à la fois dynamiques et réalistes. C'est pourquoi, dès 2012, la Haute Autorité de Santé encourage la création de simulations informatiques permettant d'apprendre les premiers gestes techniques chirurgicaux sans travailler sur un vrai patient, notamment via le projet VESALE-3D (Virtual Environment for Surgical and Anatomic Learning Enhancement). L'objectif de ce projet est tout d'abord de répertorier dans une base de données 3D toutes les régions anatomiques essentielles à l'apprentissage des techniques chirurgicales. Ensuite, la visualisation en trois dimensions des étapes successives de la dissection sera permise par le développement d'une méthode virtuelle. Enfin, ce travail permettra de présenter un outil novateur et pédagogique dans l'enseignement de l'anatomie et la chirurgie médicale.

Ce projet a été confié au LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et Microélectronique dépendant de l'Université de Montpellier) et plus spécifiquement à l'équipe ICAR au sein de laquelle ce stage a été réalisé. Cette équipe est spécialisée dans l'interaction et le traitement des données visuelles telles que les images, les vidéos et les objets 3D.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'un stage de fin d'étude permettant l'obtention du Master IMAGINA spécialisé dans le traitement d'images, la modélisation 3D, la création de moteurs de jeu ainsi que la création d'agents intelligents. Il est encadré par deux tuteurs d'entreprise, un tuteur universitaire et un médecin enseignant, respectivement :

- M. Subsol Gérard : chercheur au CNRS, il dirige l'équipe ICAR en travaillant sur divers projets notamment sur les traitements des images 2D et 3D.
- Mme. Faraj Noura : enseignante chercheuse spécialisée dans l'informatique graphique à l'université de Montpellier, elle travaille dans l'équipe ICAR.
- M. Giorgi Pascal : enseignant chercheur spécialisé dans l'algèbre linéaire, l'arithmétique, l'analyse d'algorithmes et le développement de leurs implémentations les plus optimales, il est à la tête de l'équipe ECO du LIRMM.
- M. Captier Guillaume : chirurgien plastique pédiatrique et professeur d'anatomie exerçant au CHU et à la faculté de médecine à Montpellier, il a réalisé les dissections utilisées lors du développement de ce projet.

Compte tenu de la pandémie du COVID-19, ce stage de cinq mois et demi s'est effectué dans sa majorité en télétravail. En effet, une organisation particulière a dû être mise en place afin de pouvoir communiquer à distance sur l'avancement du projet. C'est pourquoi, des comptes rendus réguliers ont été communiqués et des visioconférences hebdomadaires ont permis de discuter en direct du travail effectué et des tâches à faire.

Introduction

Depuis plusieurs décennies, la visualisation et l'interaction 3D sont devenus un moyen très pratique pour l'appréhension de l'anatomie humaine. Il existe trois types de visualisations principales dans le cadre de l'apprentissage de la médecine. Tout d'abord, la visualisation voxelique utilisée notamment dans l'imagerie médicale (IRM), introduit d'abord par le projet *Visible Human Project*, qui avait permis la première visualisation 3D complète d'un corps humain en 1998. Ensuite, la visualisation polygonale schématisée à plusieurs niveaux (ossements, chairs, veines, ...), réalisée par les logiciels du type *Primal's 3D view*, *Anatomography* et *Zygote Body*. Enfin, la visualisation surfacique texturée en haute définition permet d'avoir une représentation réaliste. C'est cette visualisation qui sera utilisée dans ce projet pour simuler une dissection réaliste induisant une meilleure appréhension de l'anatomie humaine (affichage de superpositions d'organes, texture de la peau, assemblage des muscles, etc).

Dans l'optique d'obtenir cette visualisation réaliste, des séries de modèles 3D surfaciques texturés à très haute définition ont été acquises au laboratoire d'anatomie de la Faculté de Médecine de Montpellier à l'aide d'un scanner surfacique (*Artec Spider*). Ces modèles 3D sont appelés maillages (modèles en trois dimensions composés de plusieurs faces généralement triangulaires). Ces maillages correspondent aux différentes étapes de la dissection du cou. Comme visible sur la figure 1, chaque étape de la dissection correspond à un maillage (il change légèrement entre chaque acquisition). C'est donc un vrai cadavre qui a été disséqué et scanné en 3D à multiple reprises.

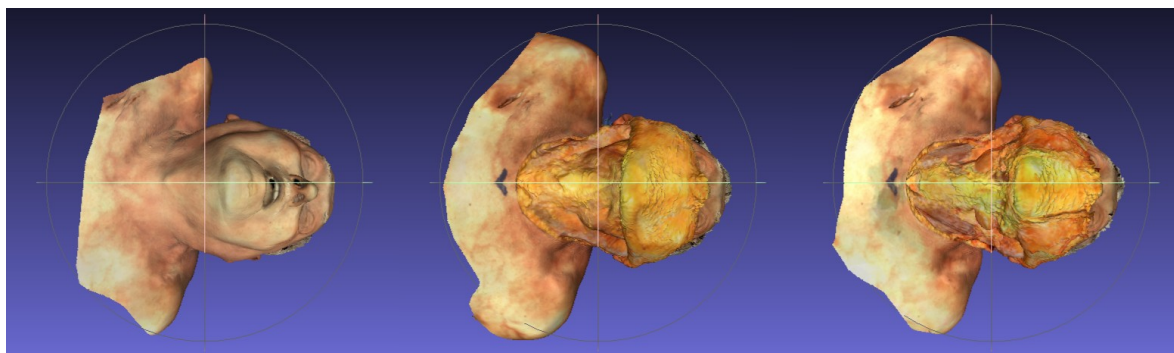


Figure 1: maillages acquis lors d'une dissection du cou

Pour faciliter la compréhension, nous appellerons :

- **Acquisition** : un maillage acquis durant une dissection chirurgicale
- **Maillage** : un maillage résultant du traitement d'une Acquisition
- **Reconstruction** : un assemblage de Maillages reformant une étape de dissection
- **Super-Maillage** : un ensemble de Maillages minimal permettant chaque Reconstruction

Les Acquisitions fournis par le laboratoire doivent maintenant subir un ensemble de traitements en vue de les réunir dans un Super-Maillage. Celui-ci sera donc composé de Maillages formé à partir des Acquisitions. Les Maillages représenteront les parties changeantes entre chaque étapes de la dissection (les zones disséquées). In fine, grâce au Super-Maillage, il sera possible de simuler une intervention chirurgicale à l'aide d'un stylet à pression tactile, identique à un scalpel.



Figure 2: simulation de découpage avec stylet tactile

C'est ici qu'intervient le sujet de ce stage « *Traitement de maillages 3D pour la simulation d'une dissection chirurgicale* ». Concrètement, nous concevrons et développerons une méthode qui prendra en entrée un ensemble d'Acquisitions pour les transformer en Super-Maillage.

Les Acquisitions étant à très haute résolution, cette méthode devra faire en sorte que la dissection du Super-Maillage soit non seulement réaliste mais également efficace. Pour cela il devra contenir un découpage intelligent des Acquisitions. Une grande quantités de l'information entre deux Acquisitions est conservée, comme représenté dans la figure 3. Ils représentent trois Acquisitions superposés (**A1**, **A2**, **A3**) qui sont associés à des étapes successives de dissection.

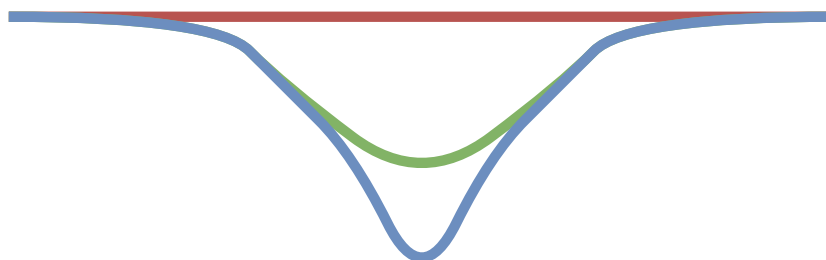


Figure 3: série de trois maillages très similaires superposés

Étant donnée qu'une grande partie de l'information des Acquisitions est redondante, le Super-Maillage sera composé de Maillages issus d'Acquisitions réduites. Cette réduction consistera en la suppression des parties redondantes entre deux étapes de dissection. La réduction de données devra être tel, quel permettra toutefois de reconstruire chaque Acquisitions à partir des Maillages

composant le Super-Maillage. Nous aurons donc une perte minimale d'information et un gain important en mémoire (cf figure 4).

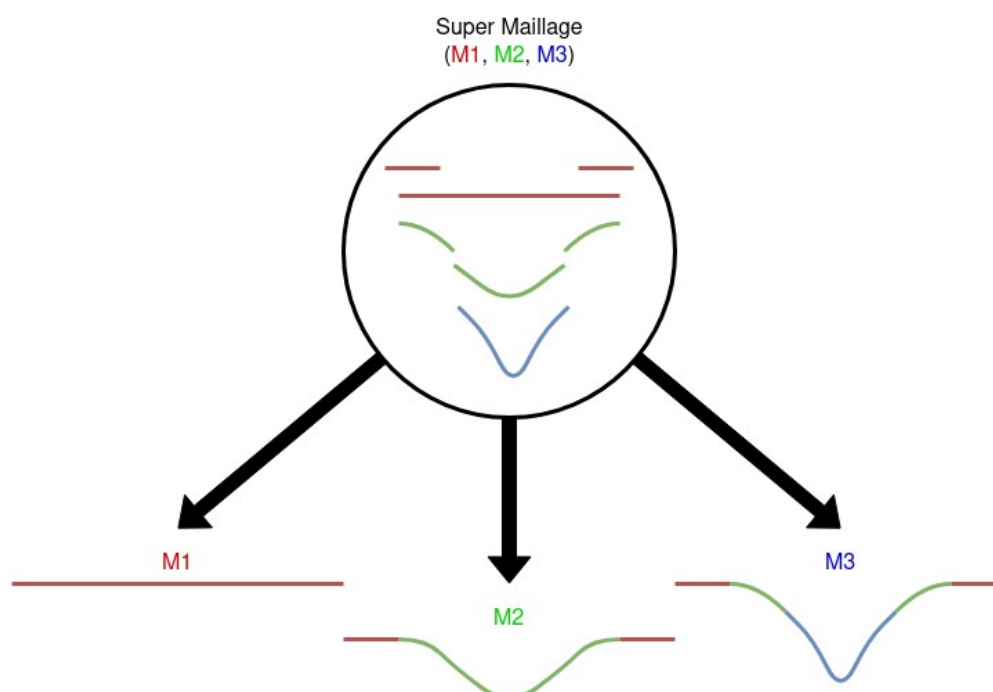


Figure 4: reconstruction des étapes de dissection à partir du Super-Maillage

Pour que la reconstruction fonctionne, il faudra porter une attention toute particulière au fait que nos acquisitions ne sont pas parfaitement superposables entre elles. En effet, plusieurs phénomènes peuvent perturber l'acquisition (légers déplacements du cadavre involontaires, la peau du cadavre peut gonfler, l'acquisition 3D ne se fait pas exactement sur les mêmes zones du corps (cf. figure 1)). Ces biais d'acquisition compliquent grandement la tâche. Les prendre en compte sera essentiel lors des traitements géométriques (détection des parties similaires/différentes entre deux acquisitions, découpages, liaisons entre maillages).

Tout au long de ce rapport nous tenterons donc de répondre à la problématique suivante « Comment créer un « Super-Maillage » à partir d'un ensemble de données chirurgicales permettant de reconstruire facilement les étapes d'une dissection de manière réaliste et efficace (en mémoire et en calcul) ? ».

Dans une première partie, nous détaillerons les étapes de conception qui ont été nécessaires pour proposer une méthode de création d'un Super-Maillage. Puis dans un second temps, nous détaillerons tout le processus de développement de l'application qui a été fait pour amener à une dernière partie exposant les résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

I. Recherche et Conception

Comme présenté dans l'introduction, les traitements géométriques nécessaires à la réalisation de ce projet sont bien plus complexes que dans un cas schématique idéal (cf figure 3). Nous allons donc dans cette partie présenter le problème tel qu'il est concrètement, les méthodes envisagées pour le résoudre et enfin l'algorithme qui sera utilisé pour créer le Super-Maillage.

1) Présentation du problème

Nous allons repartir du cas simple pour amener à la complexité du problème. Soit 3 Maillages, M1, M2, M3 représentés ci-dessous (cf figure 3) :

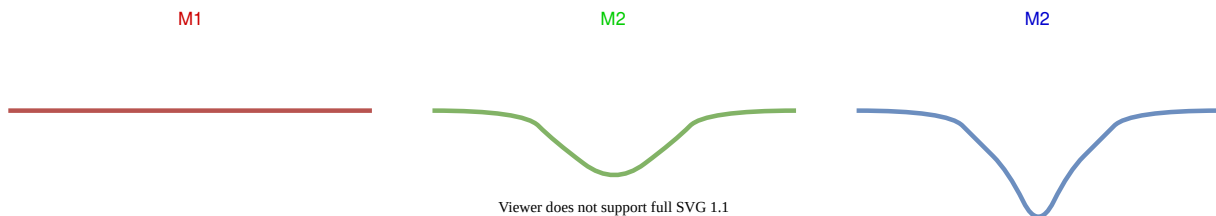


Figure 5: séries de maillages

En superposant les Maillages on peut se rendre compte que des parties sont partagées, il y a donc de la redondance dans l'information ce qui n'est pas nécessaire.

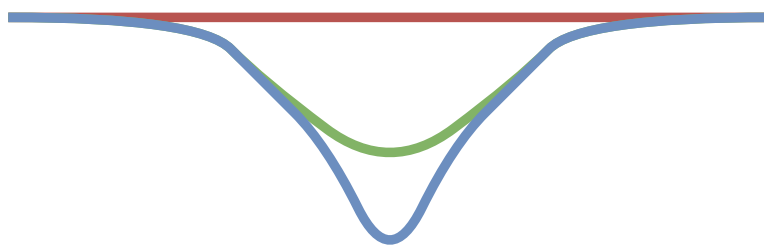


Figure 6: superposition de la série de maillages

L'idée ici est de parcourir la série de maillages à l'aide d'un algorithme qui fera une comparaison deux à deux des maillages successifs de la manière suivante :

- Détecter les limites entre les zones présentant une redondance.
- Découper les deux maillages selon les différentes zones, et supprimer la redondance de l'information.

- Greffer les parties restantes entre elles afin de s'assurer d'une possible reconstruction.
- Stocker les parties utiles dans un Super-Maillage en prenant soin de noter les associations pour pouvoir par la suite reconstruire notre série de maillages au complet, mais cette fois-ci avec un gain de mémoire conséquent.

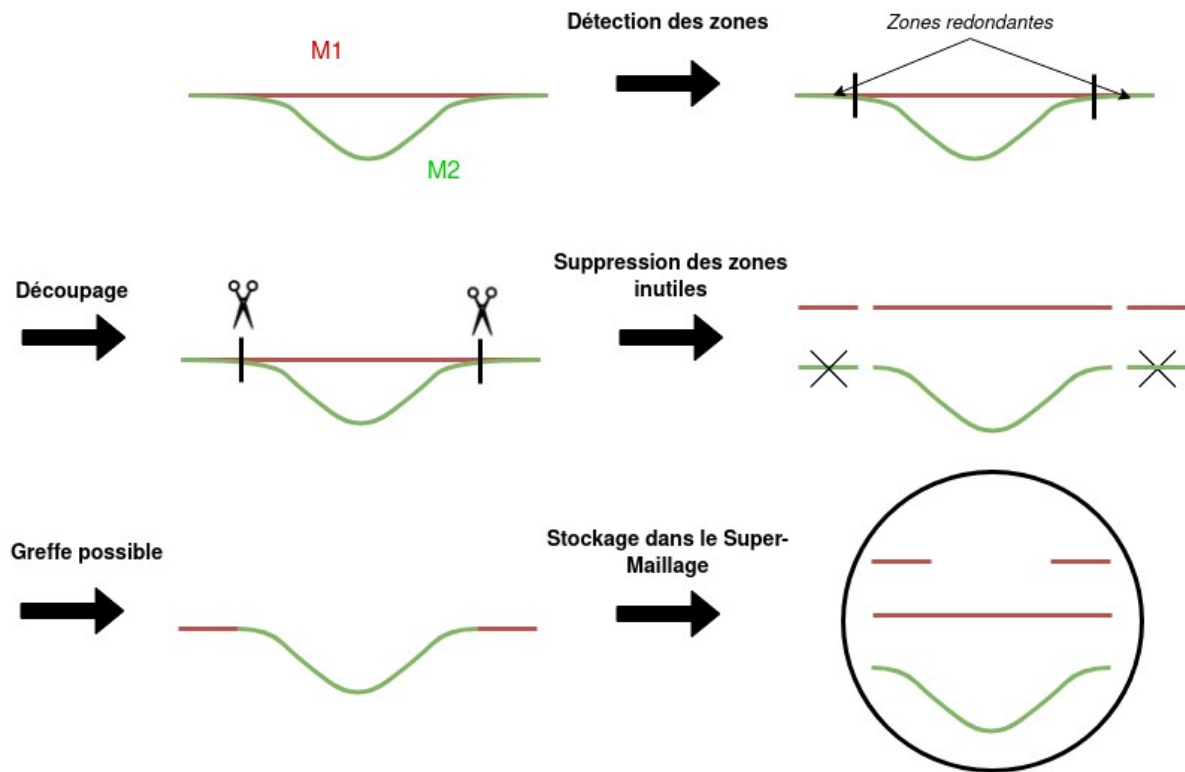


Figure 7: étapes de construction du Super-Maillage

Cependant, il est à noter que contrairement au cas théorique présenté plus haut, les maillages réels ne sont pas parfaitement superposables. En effet, comme énoncé dans l'introduction, des décalages surviennent au cours des diverses étapes de la dissection. Ainsi, on déterminera un seuil arbitraire d'une distance à partir de laquelle les parties d'un maillage seront considérées comme identiques.

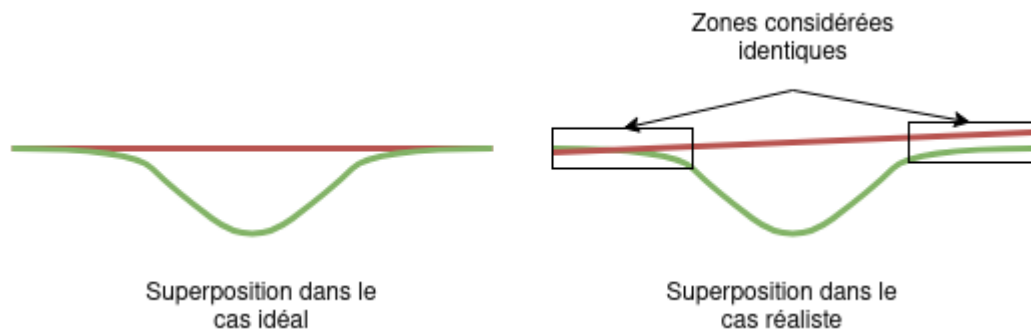


Figure 8: comparaison de superposition de maillages idéaux / réalistes

L'étape dite de greffe dans la figure 8 sera donc modifiée dans ce cas réaliste. En effet, pour rendre possible une greffe, il faudra rendre chaque partie compatible entre elles. C'est pourquoi, une étape sera rajoutée, à savoir, créer une liaison adaptée pour permettre des reconstructions entre maillages. In fine, notre Super-Maillage contiendra tant les maillages découpés que les zones de liaisons créées (liaisons en orange).

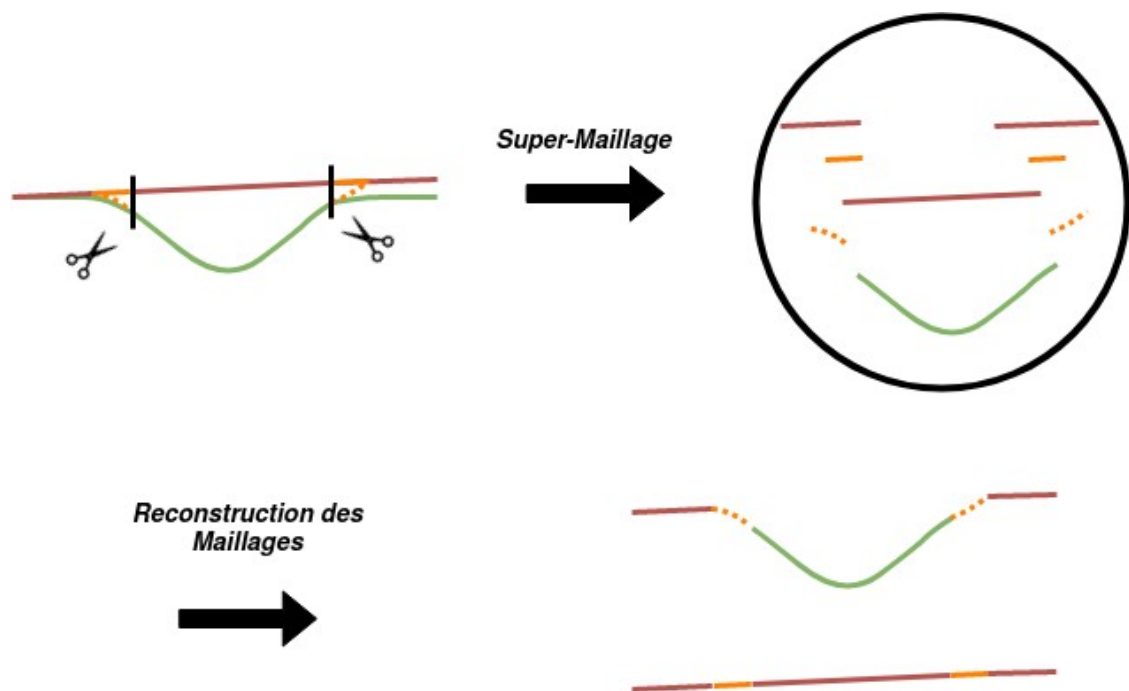


Figure 9: création du Super-Maillage dans le cas réaliste

Pour pouvoir réaliser tout ce travail, nous avons recherché les méthodes de traitements adaptées existantes afin de déterminer lesquelles nous utiliserons.

2) Traitements envisagés

Le travail à faire étant établi, le but de cette partie est de déterminer quels traitements seront le plus adaptés afin de proposer un algorithme de création du Super-Maillage.

a) Méthode de détection des zones d'intérêts:

Pour faire une détection des zones d'intérêts entre deux maillages, on peut utiliser des algorithmes de seuillage de points. Le seuillage consiste à filtrer les points qui nous intéressent grâce à un seuil fixé arbitrairement. Ce seuil représente la distance maximale entre deux points pour que ces points soient considérés comme proches. On obtiendra ainsi un ensemble de points proches et un ensemble de points éloignés du premier maillage par rapport au deuxième maillage. On compare donc dans un premier temps les points du maillage 2 par rapport à ceux du maillage 1, puis vice-versa.

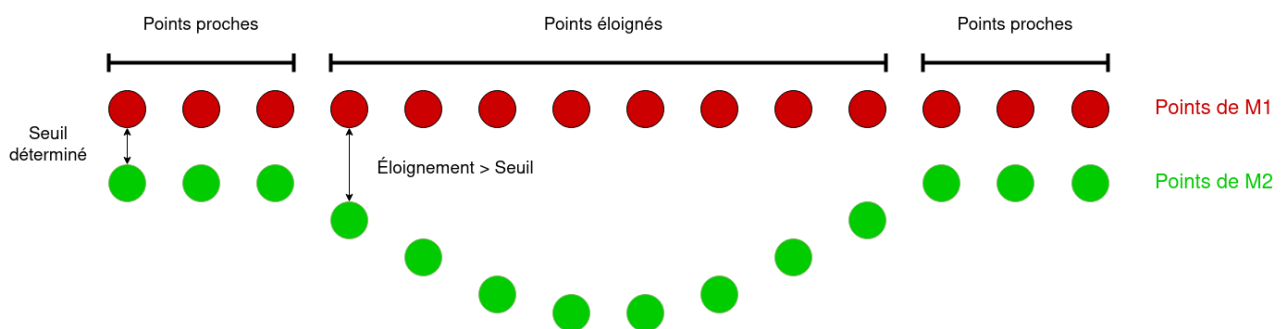


Figure 10: Seuillage de points

Il existe plusieurs moyens d'effectuer un seuillage de points. La manière la plus intuitive est d'utiliser un algorithme glouton. Cet algorithme compare la distance entre chaque point M1 par rapport à tout les points M2. Pour chaque point de M1, si la distance point à point par rapport à M2 est supérieure au seuil alors ce point est stocké dans une liste de points distants. Dans le cas contraire, il est stocké dans la liste de points proches. Toutefois, cette méthode nécessite beaucoup de temps de calcul ce qui n'est pas favorable à notre jeu de données composé de plusieurs millions de points. Ainsi, on favorisera l'utilisation d'une autre méthode, plus rapide, qui permet automatiquement de déterminer quel point est le plus proche. Pour cela, on indexe tout les points du maillage 2 (dans le cas du maillage 2 par rapport au 1) dans un kd-tree qui va trier chaque point en fonction de leurs coordonnées. Ceci permettra d'obtenir les points les plus proches dans un temps logarithmique, fonction du nombre de points.

b) Méthode de découpage des zones d'intérêts:

Après avoir détecté les zones d'intérêt, l'étape suivante est le découpage. Cette étape doit permettre de découper les maillages en tenant compte du fait qu'ils doivent pouvoir être, in fine, réassemblés entre eux.

Chaque maillage représentés sont composés de triangles (cf figure 11). Ces triangles sont connectés composés de sommets connectés par les arêtes. Le découpage a lieu au niveau de ces points et arêtes. Toutefois, lors du découpage, il est nécessaire de dupliquer ces points et arêtes afin de séparer le maillage en deux. Cette séparation permettra une reconstruction éventuelle.

Pour cela, l'ensemble de points proches/éloignés qui avait été établis dans l'étape de détection va nous permettre de sélectionner l'ensemble de points en bordure du maillage découpé. C'est au niveau de cet ensemble de point que le découpage aura lieu, et que la duplication de cet ensemble se fera (points noirs, cf figure 11).

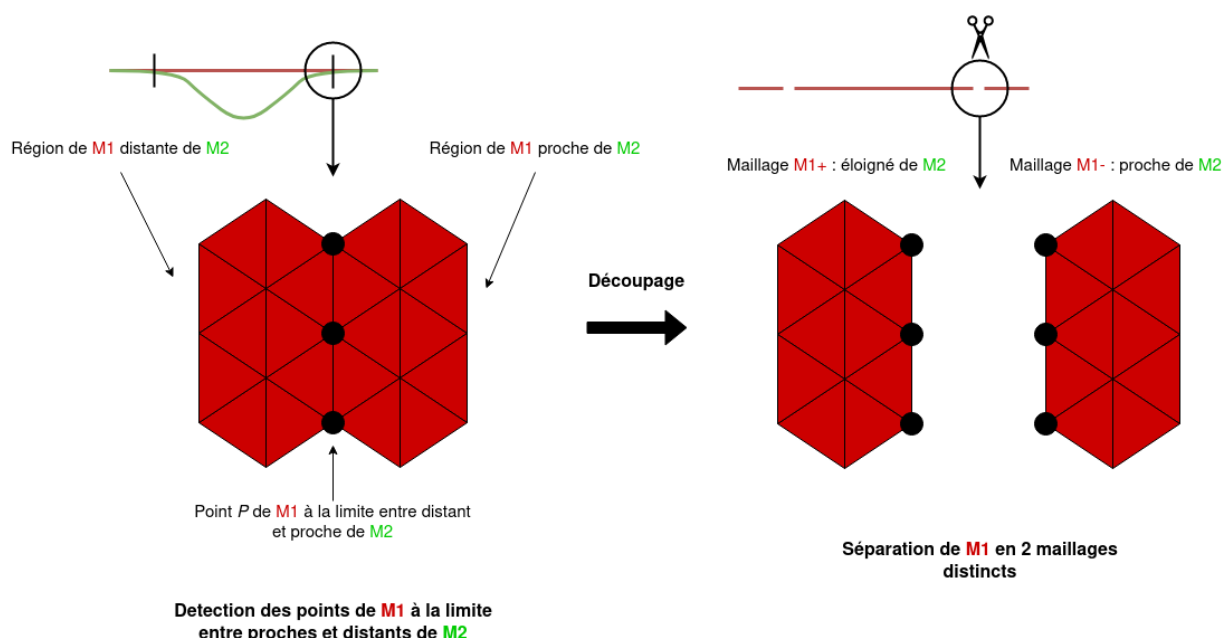


Figure 11: découpage de maillage en fonction d'un seuil

c) Méthode de greffe des zones d'intérêts:

Le découpage étant fait, il faut maintenant greffer les zones d'intérêts. Cette étape est la plus importante de notre travail car cette méthode va permettre de résoudre les problèmes liés aux décalages entre les deux maillages. Lors de l'étape de découpage, les parties décalées avaient été traitées comme identiques. Toutefois, pour la greffe, on ne peut négliger ces différences. En effet, les parties découpées n'étant pas parfaitement superposables (dû à la réalité des maillages acquis), il faut trouver des méthodes permettant de connecter les différentes structures entre elles en tenant

compte de ce défaut de superposition. C'est pour cela qu'il faut créer des zones de jonctions malléables et adaptables permettant de pouvoir associer n'importe quel maillage malgré des décalages éventuels.

La méthode utilisée ici est une projection MLS ou « Moving Least Square ». Cette méthode consiste en la projection de points sur un ensemble d'autres points qui possèdent des normales. Tout d'abord, on sélectionne les k plus proches points du point à projeter. Le point est ensuite projeté grâce à une formule mathématique tenant compte de la position, l'orientation des points proches et du nombre d'itérations i :

$$\begin{cases} c = \sum_{p_i \in NN(x)} w_i p_i / \sum_{p_i \in NN(x)} w_i \\ Cov = \sum_{p_i \in NN(x)} w_i (p_i - c) \cdot (p_i - c)^T \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \end{cases} \quad n = eig_3(Cov)$$

Figure 12: Formule de projection des points

$$x_{k+1} = c - \frac{(x_k - c)^T \cdot n}{\|n\|} n$$

Figure 13: Formule de projection sur le plan

Il existe cependant un cas particulier de projection MLS qui permet d'affiner la qualité de la projection d'un point sur un ensemble d'autres points, nommé APSS où « Algebraic Point Set Surface ». Ce cas particulier sera celui que nous utiliserons grâce à la formule suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} w_j \leftarrow \frac{w_j}{\sum_i w_i} \quad (\text{normalisation des poids}) \\ u_4 = \frac{1}{2} \frac{(\sum_i w_i p_i^T \cdot n_i) - (\sum_i w_i p_i)^T \cdot (\sum_j w_j n_j)}{(\sum_i w_i p_i^T \cdot p_i) - (\sum_i w_i p_i)^T \cdot (\sum_j w_j p_j)} \\ \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \sum_i w_i (n_i - 2u_4 p_i) \\ u_0 = - \sum_i w_i ([u_1 \ u_2 \ u_3]^T + u_4 p_i)^T \cdot p_i \end{array} \right.$$

Le schéma ci-après illustre le principe théorique de la méthode MLS. Les points rouges représentent les points proches sélectionnés. Le point noir est celui que l'on cherche à projeter sur l'ensemble de points bleus.

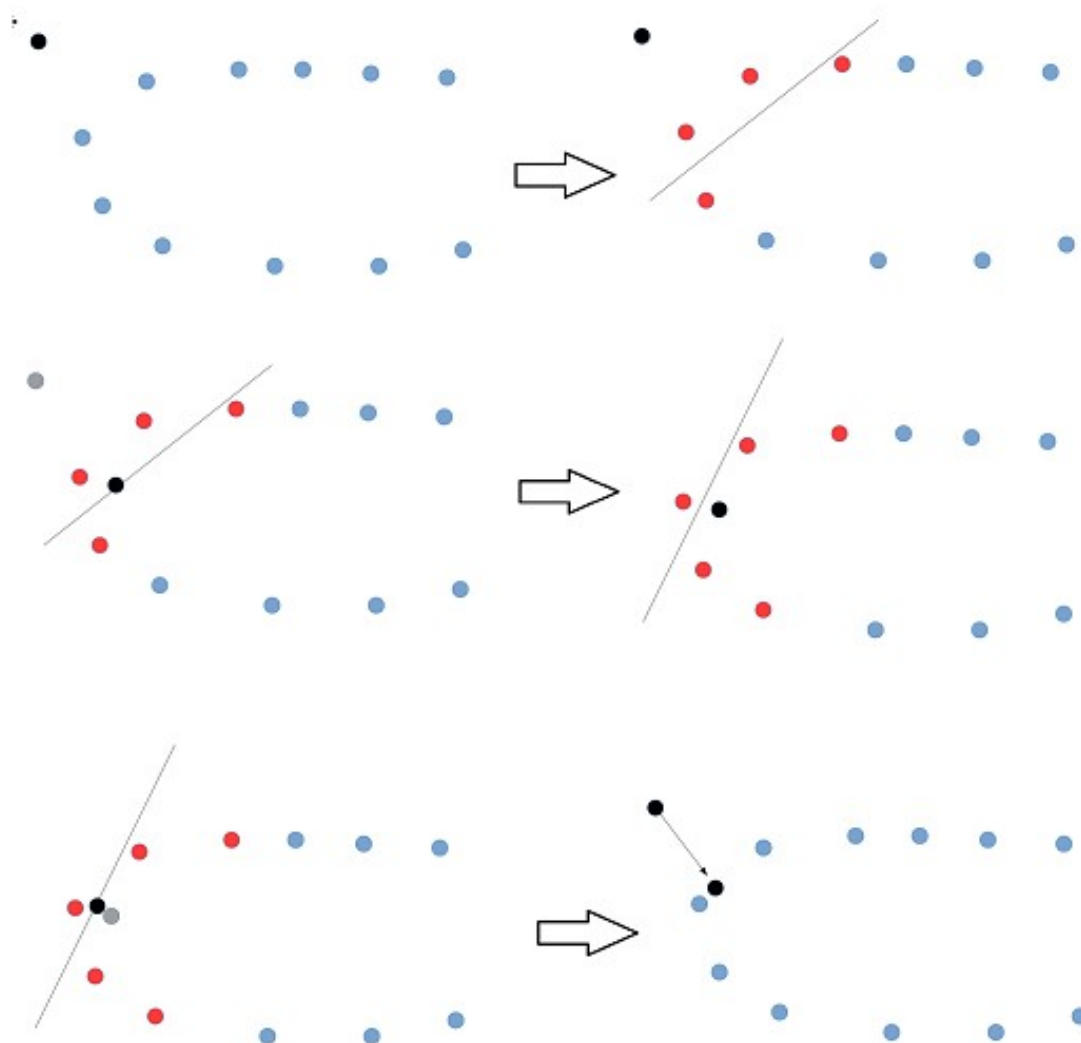


Figure 15: étapes de projections MLS

Le schéma ci-après permet de comprendre l'application de cette méthode de projection sur notre projet. En effet, après le découpage des parties communes (cf figure 3), il faut raccorder les parties souhaitées par le biais de projections adaptables à n'importe quel maillages. A partir de l'étape de greffe, deux options s'offrent à nous afin de réaliser le raccord. Ces deux options sont basées sur la conservation de parties découpées dans l'étape de découpage. L'une des options

permet la projection d'une partie existante sur une partie conservée (pointillés rouges), il s'agit de l'option 2. L'option 1, quant à elle, fonctionne de manière contraire à savoir une projection de la partie conservée lors du découpage sur la partie existante (trait continu vert).

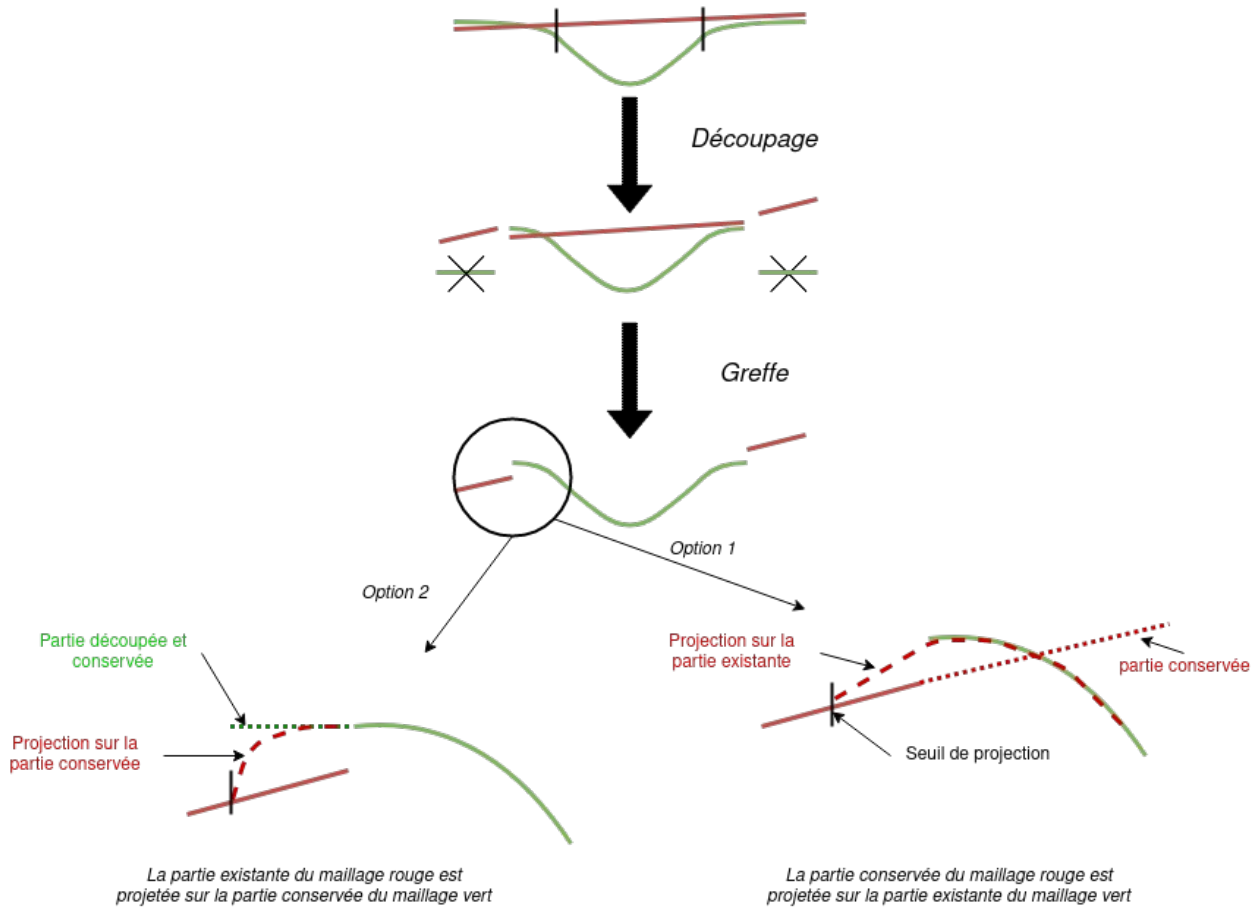


Figure 16: méthode de projection MLS

Cependant, l'option 1 et 2 sont combinables (option 3) permettant d'améliorer la création d'une jonction, de manière plus malléable et surtout adaptable à n'importe quel maillage.

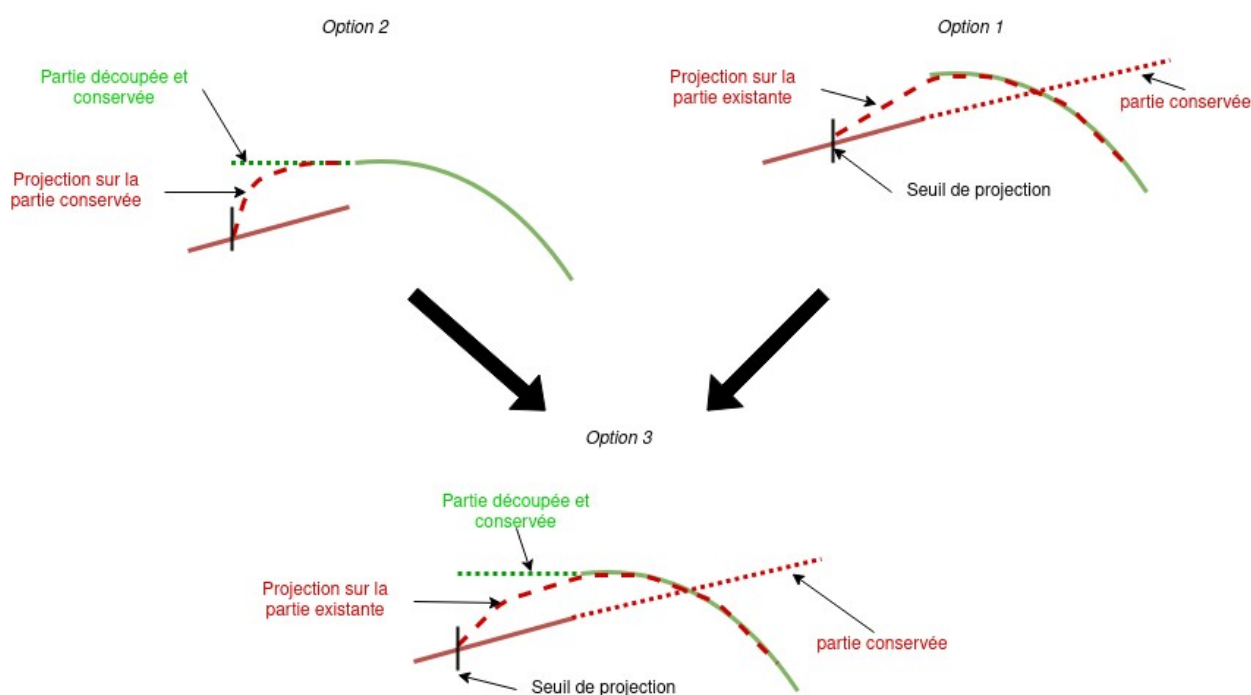


Figure 17: formation de l'option 3

Il est nécessaire de bien comprendre que dans le cas où des décalages sont notés, les jonctions existantes entre un maillage et un autre ne permettent pas une liaison. C'est pourquoi, une liaison adaptable permettra de relier chaque maillage selon sa topologie (pointillé orange de la figure 14). La création de cette liaison adaptable résulte tant du maillage vert que du maillage rouge. Pour pouvoir utiliser cette liaison orange pour n'importe quel maillage, il faudra la découper au niveau des jonctions. Ce schéma montre les parties à découper après la création de la liaison adaptable par projection MLS.

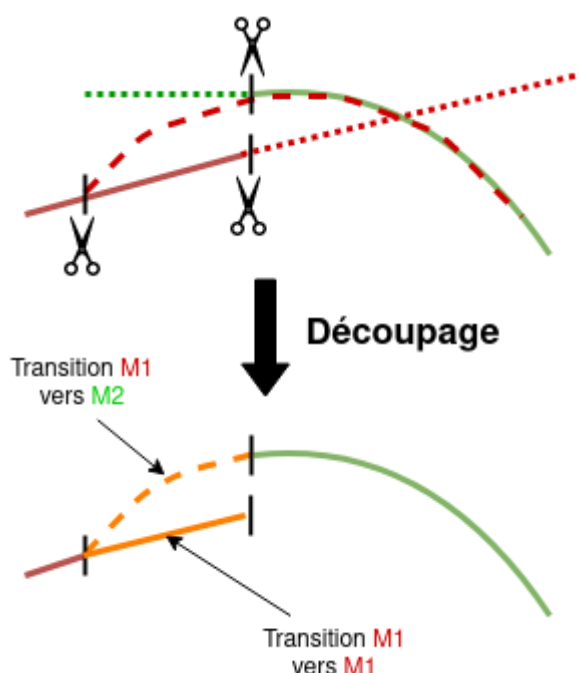


Figure 18: découpage des transitions entre les maillages

Ainsi on obtient dans le super maillage, les parties découpées mais aussi les liaisons adaptables permettant de reformer à souhait n'importe quel maillage. A noter que les parties de transition projetées (pointillés oranges) seront des nouvelles informations rajoutées aux maillages initiaux.

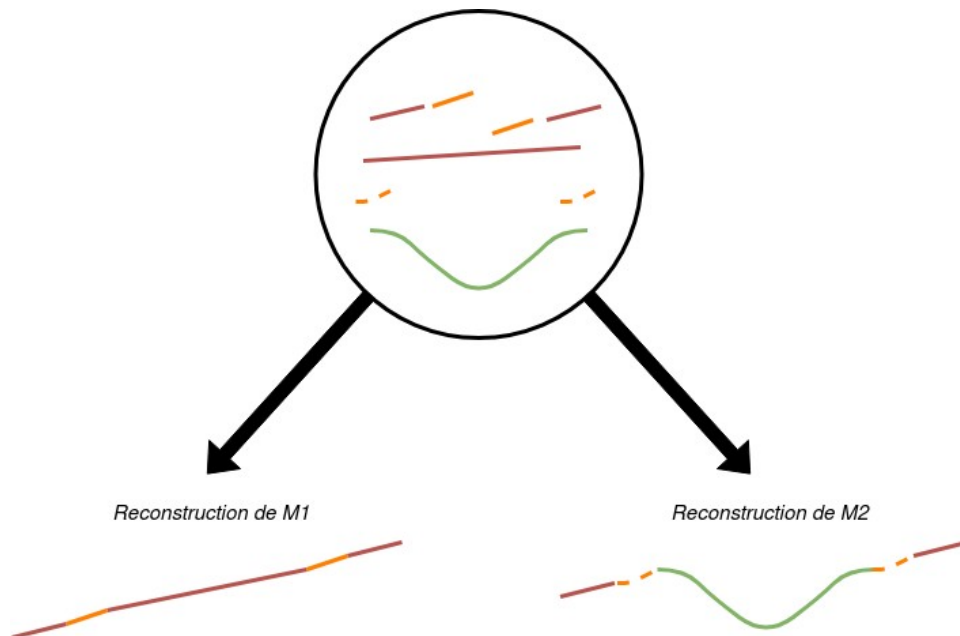
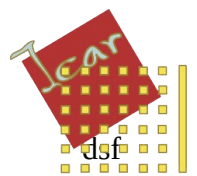


Figure 19: Super-Maillage contenant parties et liaisons

Pour conclure cette partie, nous avons détaillé les méthodes qui seront utilisées pour détecter, découper, greffer et stocker nos maillages.



3) Algorithme proposé

Grâce aux méthodes détaillées précédemment, nous avons tout les traitements requis pour élaborer un algorithme de création de Super-Maillage.

(en cours)

Données : (M1, M2, S), respectivement maillage 1, maillage 2 et un seuil

Résultats : (Ri, SM), respectivement reconstruction du maillage i, super-maillage

Algorithme : decoupe_seuil (M1, M2, S) \rightarrow (M1-, M1+)

 seuillage_points_proche (M1, M2, S) \rightarrow Z1 : zones de M1 proches de M2

 points_limites (Z1) \rightarrow L1 : points limites entre éloignés et proches de M2

 decoupe (M1, L1) \rightarrow (M1-, M1+) : divise M1 en deux maillages

Algorithme : projection (M1, M2) \rightarrow (M1~)

Algorithme : decoupe_sans_redondance (M1, M2, S, Epsilon) \rightarrow (R1, R2)

 decoupe_seuil (M1, M2, S) \rightarrow (M1-, M1+)

 decoupe_seuil (M2, M1, S) \rightarrow (M2-, M2+)

 decoupe_seuil(M1-, M2-, S - Epsilon) \rightarrow (M1--, M1-+)

 decoupe_seuil(M2-, M1-, S - Epsilon) \rightarrow (M2--, M2-+)

 projection (M1-+, M2-+) \rightarrow M1-~

 R1 = (M1--, M1-+, M1+)

 R2 = (M1--, M1-~, M2+)

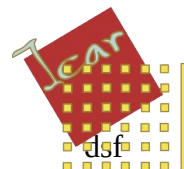
Algorithme : creation_super_maillage (S, Epsilon, M1, M2, ... Mn) \rightarrow SM

 M_courant = M1

 SM = {}

 pour tout Maillages M_suivant dans (M2, ... Mn) faire

 (Ri, Ri+1) = decoupe_sans_redondance(M_courant, M_suivant, S, Epsilon)



$M_{\text{courant}} = R_{i+1}$

$SM += R_i$

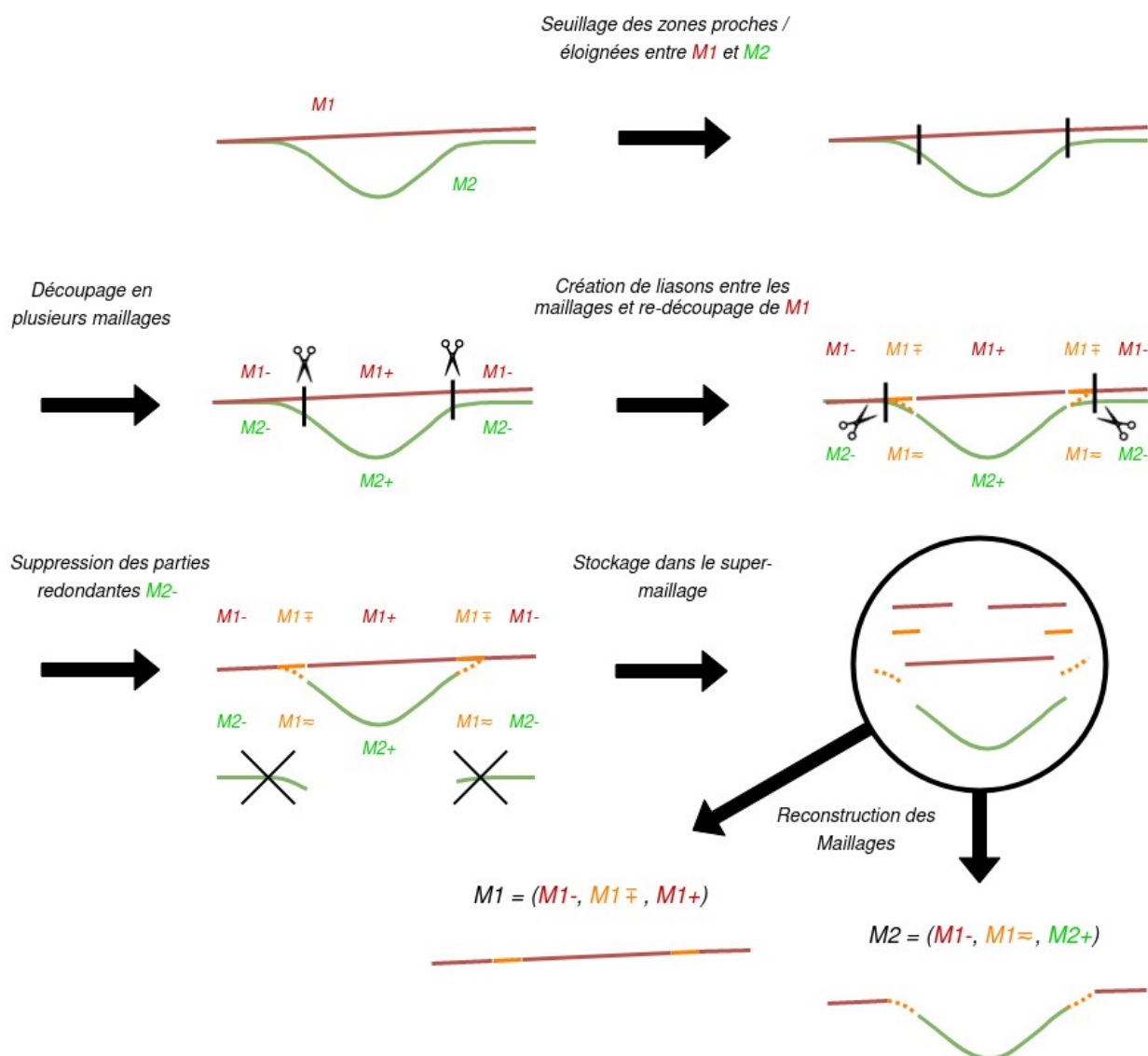
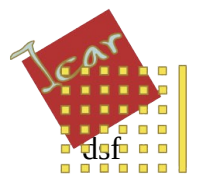


Figure 20: étape de l'algorithme de création du Super-Maillage



II. Développement et Expérimentations

1) Sélection et mise en place des technologies

Sélection

- nécessité de bibliothèques (ensemble de fonctionnalités)
 - Données fournies = maillage (OBJ) → charger et sauvegarder les maillages (**bibliothèque d'importation/ exportation A7**) / ASSIMP (définition, pourquoi ce choix, comment l'utiliser)
 - traitements des données → **bibliothèque traitements géométriques** CGAL (définition, pourquoi ce choix (contient toutes les fonctionnalités que l'on veut/ liste à faire), comment l'utiliser)
 - visualisation → **bibliothèque Qt** (définition, pourquoi ce choix, comment l'utiliser)
- Blender : génération des maillages tests simples (tester l'algorithme)

Mise en place

- Utilisation de Cmake pour pouvoir compiler en multi-plateforme
- Utilisation d'un répertoire Github avec travis pour partager et tester les build en multi-plateforme

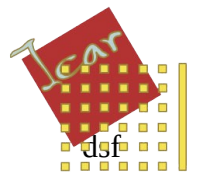
Transition/Test

Création d'un programme test (affiche un modèle 3D)) → permet de valider la sélection et la mise en place précédente.

2) Implémentation et expérimentations

réalisation des étapes des traitements géométriques + problèmes rencontrés et solutions + résultats en image :

- seuillage
- découpe
- greffe
- stockage



III. Résultats

1) Résultats de la méthode

Présentation du produit final (cas parfait et réels)

utilisation de plusieurs seuil et comparaison des résultats en fonction du seuil et des Acquisitions

2) Test qualité

comparaison reconstruction avec acquisitions de départs → distances de hausdorf

limites de cette méthode

Conclusion

résumé du travail, résultats obtenus, amélioration et perspective

apports personnels du stage

Chaque maillage peut être assimilé à une couche de chair creusée progressivement à chaque étape de la dissection (par exemple, le maillage rouge pourrait représenter la peau du patient, le maillage vert serait ce qu'on voit quand on retire la peau et le maillage bleu représenterait ce qu'on verrait en retirant les graisses sous la peau).

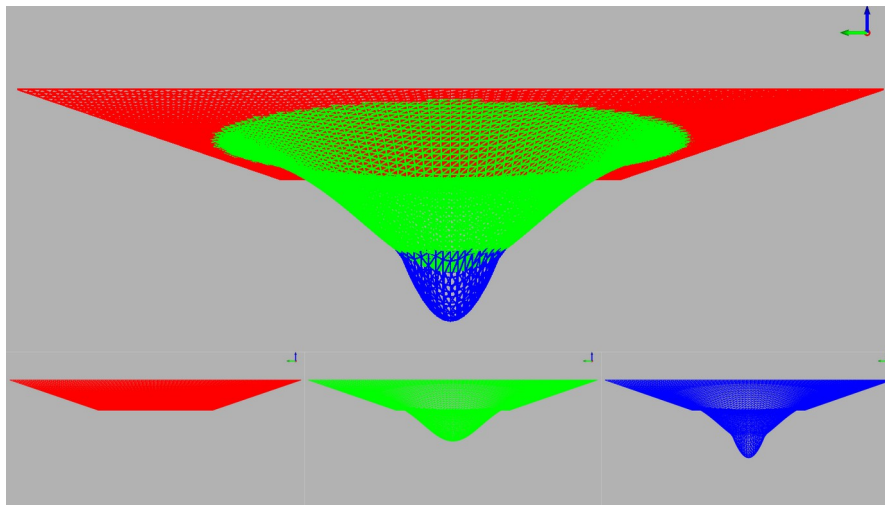
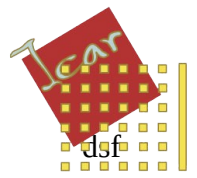
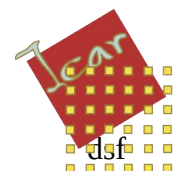


Figure 21: maillages parfaitement superposables



Conclusion



Références bibliographique