

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

RAPPORT

Stage en

**EDITION DE MAILLAGES 3D POUR LA SIMULATION
NUMÉRIQUE APPLICATION AUX RÉSEAUX VASCULAIRES**

Année universitaire : 2022/2023

Diplôme : Master 1 Calcul Haute Performance et Simulation

Travail fait par

Mehdi HAMIDI

Le 15 Mai 2023

Rapport de stage

Responsable(s) et Tuteur(s) :

| | |
|-----------------------|-----------------------------|
| Luiz Angelo STEFFENEL | Responsable de la formation |
| Christophe JAILLET | Directeur d'études |
| Sylvia CHALENÇON | Tutrice de stage |
| Aassif BENASSAROU | Tuteur de stage |



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes tuteurs de stage Madame Sylvia Chalengon et Monsieur Aasif Benasserou, maîtres de conférences membre du laboratoire Crestic, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire et d'avoir consacré une partie de leurs temps à me guider dans les missions qui me sont confiées au cours de ce stage.

Je remercie également Mr GUILLAUME DOLLÉ, ingénieur de Recherche au sein du laboratoire de Reims(LMR) ainsi que l'ensemble des doctorants et stagiaires au sein du laboratoire du Crestic, d'avoir répondu à toutes mes questions.

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 3 |
| 2 | Présentation de l'organisme d'accueil | 4 |
| 3 | Context du stage | 5 |
| 3.1 | Segmentation des réseaux vasculaires | 5 |
| 3.1.1 | Centrack | 6 |
| 3.2 | Paraview et 3D Slicer | 7 |
| 3.3 | Contraintes du maillage pour la simulation numérique | 8 |
| 4 | Objectifs du stage | 9 |
| 5 | Déroulement du stage | 11 |
| 5.1 | Introduction | 11 |
| 5.2 | Difficultés et justification des décisions prises | 12 |
| 6 | Explication de l'implémentation de certain filtre | 13 |
| 6.1 | Filtre qui permet de déformer le maillage sans impacté sa conformité | 13 |
| 7 | Évaluation personnelle des compétences acquises | 14 |
| 7.1 | Présentation des compétences mobilisées | 14 |
| 7.2 | Évolution personnelle et professionnelle | 15 |
| 8 | Conclusion | 16 |
| 8.1 | Récapitulation des principaux points abordés | 16 |
| 8.2 | Bilan et continuité du stage | 16 |
| | Bibliographie | 17 |

Table des figures

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Photo du bâtiment c de l'IUT de Reims où se situe le laboratoire où j'ai effectué mon stage | 4 |
| 2 | Segmentation (en rouge) et maillage (en bleu) d'un fragment de réseau vasculaire segmenté à partir d'une image IRM. | 5 |
| 3 | étapes de la segmentation des réseaux vasculaires avec centrack (sur 3D Slicer) | 6 |
| 4 | Interface de 3D slicer | 7 |
| 5 | Interface de paraview | 8 |
| 6 | Exemple de l'application du filtre qui permet de découper le maillage de vaisseaux dans le cerveau sur une partie sélectionnée, avant(à droite) et après(à gauche). | 9 |
| 7 | Exemple de l'application du filtre qui permet de fermer le trou du maillage de vaisseaux dans le cerveau en utilisant des surfaces planes avant(à droite) et après(à gauche). | 9 |
| 8 | Ligne centrale de vaisseaux dans le cerveau (sur Paraview) | 10 |
| 9 | pipeline VTK | 13 |
| 10 | La région d'intérêt (ROI) présente les sommets verts (les sommets non contraints) et les sommets rouges (les sommets de contrôle). (Gauche) Le maillage de surface initial; (Droite) Une position cible est définie pour chaque sommet de contrôle, les coordonnées des sommets non contraints étant mises à jour par l'algorithme de déformation. | 14 |
| 11 | Exemple de l'application du filtre déformation sur une partie du réseau vasculaire du cerveau | 15 |

1 Introduction

Récemment intéressé par la modélisation 3D, le traitement d'image ainsi qu'une affinité pour l'imagerie médicale et dans le cadre de mon stage de master 1 en Calcul Haute Performance et Simulation. J'ai eu l'opportunité d'effectuer mon stage au sein du Laboratoire CReSTIC en édition de maillages 3D pour la simulation numérique - application aux réseaux vasculaires. Le stage lui-même fait partie d'un projet collaboratif à l'échelle nationale nommé [PreSPIN](#) (Simulation prédictive pour la planification en neuroradiologie interventionnelle) dirigé par Monsieur Erwan Kerrien en partenariat avec le CReSTIC, le CREATIS, Inria Nancy et CHRU Nancy.

La segmentation des réseaux vasculaires est une recherche active depuis plus de vingt ans[1]. Comprendre la géométrie, la morphologie et la topologie de ces réseaux est crucial pour le diagnostic, la chirurgie et le suivi de patients atteints de pathologies spécifiques. Des algorithmes d'analyse d'images et d'intelligence artificielle ont permis de reconstruire des modèles numériques de ces réseaux à partir de données cliniques telles que l'IRM et le TDM (Figure 2) [2]. Cependant, ces modèles ne sont pas directement utilisables pour la simulation des écoulements sanguins en raison de leurs imperfections géométriques, de leurs artefacts topologiques et de leurs bifurcations non réalistes[3].

Mon stage vise donc à proposer des paradigmes de manipulation et de correction des maillages 3D et à les implémenter pour avoir des maillages conformes et qui respectent les contraintes (géométrique, topologique et morphologique) nécessaires pour effectuer des simulations d'écoulement de sang réalistes. L'outil que je développe vise à permettre à l'utilisateur de visualiser, éditer et évaluer un maillage 3D du réseau vasculaire issu d'une segmentation. Il sera basé sur des bibliothèques C++ telles que [CGAL](#) et [VTK](#). L'objectif est d'intégrer l'interface comme plugin au logiciel 3D Slicer et Paraview développé par Kitware, similaire aux plugins existants dans les projets ANR PreSPIN et R-Vessel-X[2].

2 Présentation de l'organisme d'accueil

Le Centre de Recherche en STIC est une unité de recherche faisant partie de l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Le centre est réparti sur plusieurs sites situés à Reims, Troyes, Châlons-en-Champagne et Charleville-Mézières, et il se concentre sur la recherche et l'innovation dans le domaine des sciences du numérique, dans la partie occidentale de la Région Grand-Est.

Au CReSTIC, Il y'a une équipe de près de 120 personnes, dont plus de 70 enseignants-chercheurs. Le CReSTIC est organisé en deux départements : "Informatique" et "Automatique et Traitement du Signal", et il héberge neuf équipes de recherche. Ces équipes mènent des activités de recherche fondamentale dans des domaines tels que l'imagerie, la gestion des connaissances, les réseaux, l'automatique et le traitement du signal. Les travaux de recherche sont impliqués dans des actions de valorisation pluridisciplinaires et interdisciplinaires, notamment dans des domaines tels que l'ingénierie pour la santé, l'agriculture intelligente, l'industrie 4.0, l'éducation et la société, les véhicules communicants et les bâtiments intelligents.

Le CReSTIC joue un rôle moteur dans de nombreux projets académiques nationaux (PIA, ANR) et internationaux. Nous sommes également un acteur clé de l'innovation dans la Région Grand Est, grâce aux activités de recherche et de transfert technologique. Le CReSTIC travail en partenariat avec de grandes entreprises nationales ainsi que des PME innovantes, en participant à des contrats CIFRE et SATT.



FIGURE 1 – Photo du bâtiment c de l'IUT de Reims où se situe le laboratoire où j'ai effectué mon stage

3 Context du stage

Le stage se divise en deux parties la première consiste à l'implémentation d'un plugin qui permettra aux utilisateurs de visualiser, éditer et vérifier la conformité des maillages des réseaux vasculaires générés par la segmentation des réseaux vasculaires, pour ensuite faire des simulations d'écoulement de sang (cf. Segmentation des réseaux vasculaires). La deuxième partie étant complémentaire elle consistera à travailler sur la simulation des écoulements de sang pour étudier les pathologies vasculaires.

3.1 Segmentation des réseaux vasculaires

Comme cela a été précisé dans l'introduction, les algorithmes d'analyse d'images et d'intelligence artificielle utilisés pour l'extraction des caractéristiques de l'anatomie d'un réseau vasculaire à partir d'images médicales (IRM et TDM) génèrent des modèles géométriques contenant des imperfections géométriques et des artefacts topologiques, ce qui complique la simulation numérique.

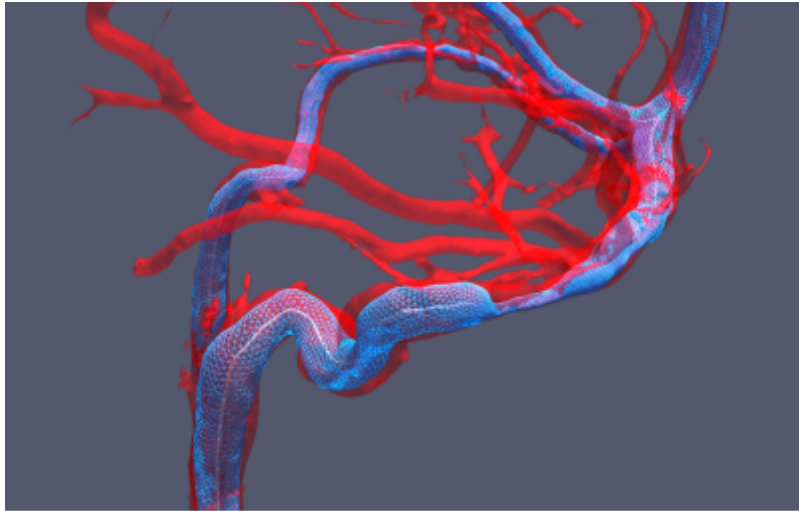


FIGURE 2 – Segmentation (en rouge) et maillage (en bleu) d'un fragment de réseau vasculaire segmenté à partir d'une image IRM.

Dans ce contexte, des algorithmes ont été implémentés dans le but d'effectuer cette segmentation afin de reconstituer le maillage d'un réseau vasculaire à partir d'images médicale :

3.1.1 Centrack

CentTrack est un algorithme d'intelligence artificielle implémenté dans le cadre du projet ANR PreSPIN qui est utilisé pour extraire et suivre les lignes centrales des vaisseaux sanguins dans les images médicales. Il offre une grande précision et la possibilité de corriger manuellement les résultats pour garantir leur qualité. CentTrack peut être intégré en tant que plug-in dans des logiciels de traitement d'images médicales tels que 3DSlicer, ce qui permet de bénéficier de fonctionnalités supplémentaires pour la visualisation et l'interaction avec les données médicales. Il peut également être utilisé en tant qu'application autonome, offrant une solution complète pour l'extraction précise des lignes centrales des vaisseaux sanguins.

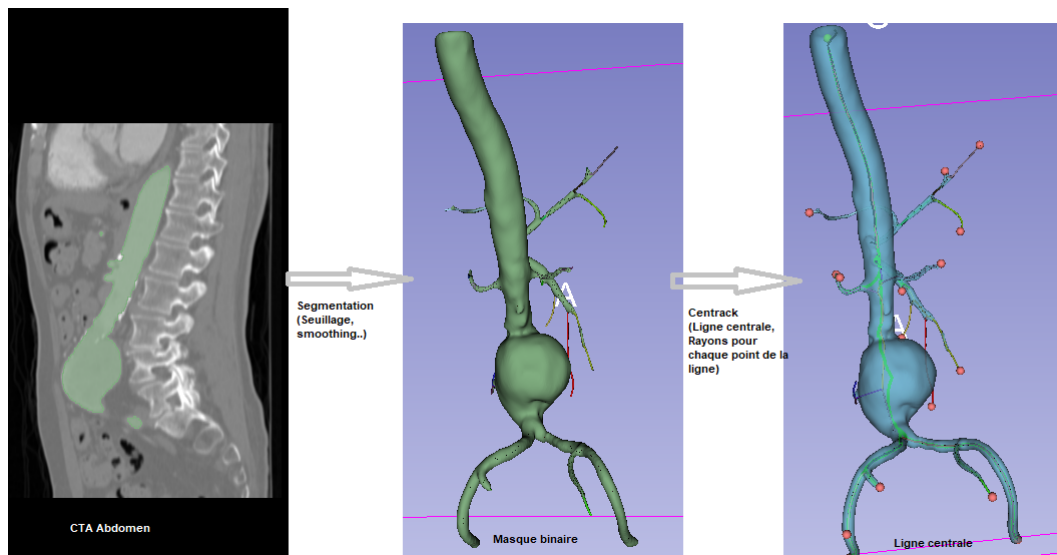


FIGURE 3 – étapes de la segmentation des réseaux vasculaires avec centrack (sur 3D Slicer)

Après l'extraction de la ligne centrale qui permet de renseigner les caractéristiques de la forme du réseau vasculaire (Une succession de markups qui continent la direction vers le prochain point ainsi que le rayon du réseau à cette position), l'idée est donc de reconstruire le maillage du réseau vasculaire à partir de ces informations là c'est à dire qu'on construit le maillage à partir de la ligne centrale en utilisant par exemple une interpolation de sphères ou le marching cubes, néanmoins centrack représente quelques soucis au niveau de son implémentation dont je vais en parler dans la partie déroulement du stage.

3.2 Paraview et 3D Slicer

Dans le domaine de la visualisation, modélisation et de la simulation, deux outils logiciels largement utilisés sont 3D Slicer et ParaView. Ces deux applications offrent des fonctionnalités avancées pour la visualisation, l'analyse et la manipulation des données médicales en trois dimensions.

3D Slicer est une plateforme logicielle open-source développée principalement pour l'imagerie médicale et la recherche en sciences de la vie. Il offre une large gamme d'outils pour la segmentation d'images, la création de maillages, la simulation et la visualisation en 3D. 3D Slicer est utilisé par de nombreux chercheurs et cliniciens pour étudier et comprendre les structures anatomiques, y compris les vaisseaux sanguins, dans le contexte de la modélisation d'écoulement [4].

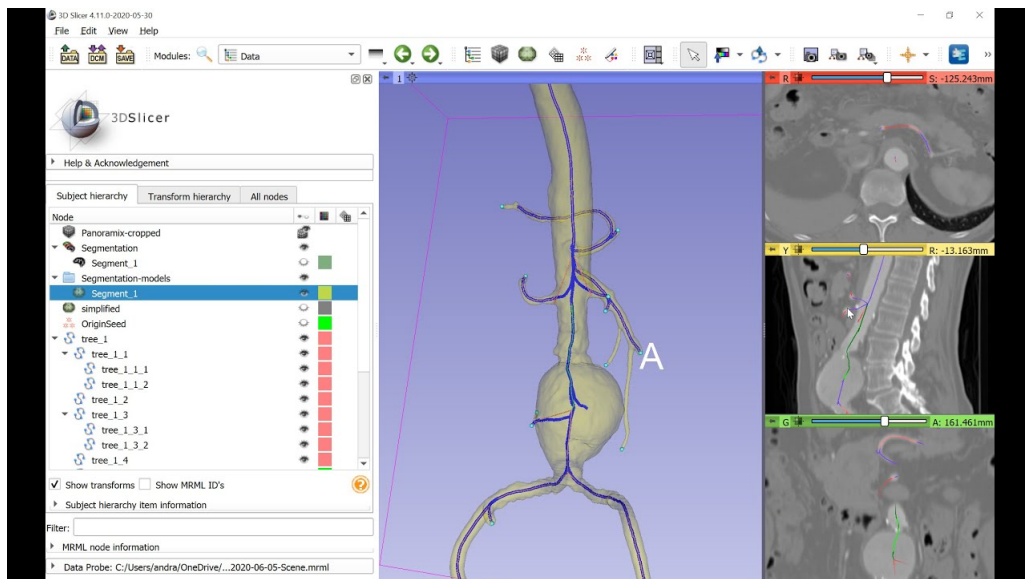
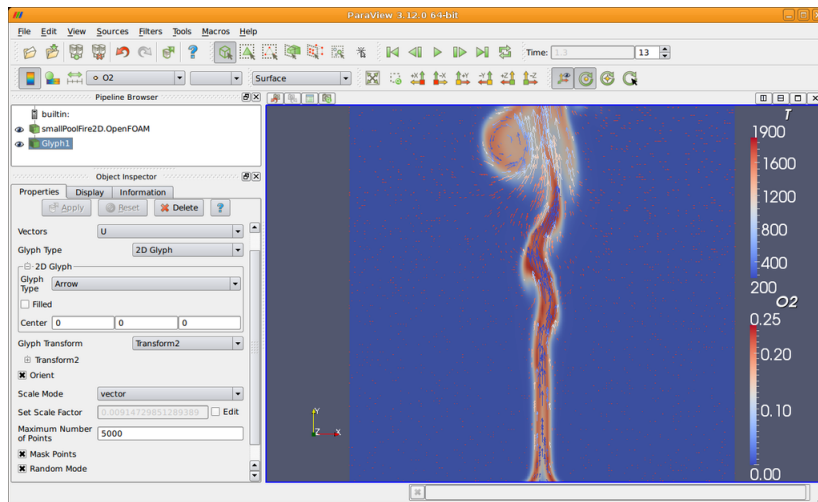


FIGURE 4 – Interface de 3D slicer

ParaView est également un logiciel open-source conçu pour l'analyse et la visualisation des données scientifiques. Il est particulièrement adapté à l'exploration et à la visualisation de grands ensembles de données, notamment les simulations numériques complexes. ParaView offre des fonctionnalités avancées pour la création de représentations visuelles, les coupes transversales, les trajectoires de particules, etc. Il est largement utilisé dans la communauté scientifique pour l'analyse des résultats de simulation et la présentation visuelle des données [5].



3.3 Contraintes du maillage pour la simulation numérique

Un maillage de réseaux vasculaires conforme est crucial pour simuler l'écoulement du sang de manière précise. La conformité garantit que la géométrie du système vasculaire est fidèlement représentée, capturant ainsi les caractéristiques anatomiques importantes. Lors de la création du maillage, des contraintes doivent être prises en compte, telles que la résolution appropriée, la qualité du maillage, les conditions aux limites physiologiques, la compatibilité numérique et l'adaptation temporelle pour les simulations transitoires. La conformité du maillage permet d'obtenir des résultats physiologiquement représentatifs lors des simulations d'écoulement sanguin [6].

4 Objectifs du stage

C'est donc dans ce contexte d'édition de maillage post segmentation que mon stage intervient. L'objectif principal est d'implémenter un plug-in pour 3D slicer et Paraview permettant d'effectuer des éditions de maillage afin de les rendre conformes pour des simulations numériques. L'outil que nous développons offre ainsi un ensemble de manipulations.

Voici une liste des différentes type d'édition que l'outil développé permet de faire sur des maillages sur les logiciels 3D Slicer et Paraview :

- Couper/Fermer le maillage par des surfaces planes : Ce type d'édition permet de découper ou de fermer le maillage en utilisant des surfaces planes. On peut aussi ajouter des surfaces planes pour séparer différentes parties du maillage ou les fermer pour obtenir une forme solide.

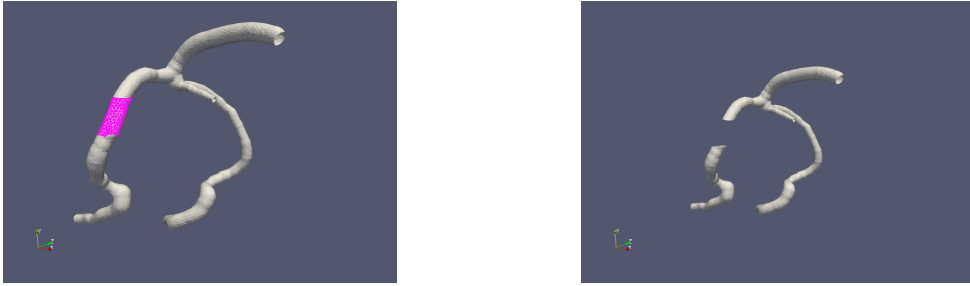


FIGURE 6 – Exemple de l'application du filtre qui permet de découper le maillage de vaisseaux dans le cerveau sur une partie sélectionnée, avant(à droite) et après(à gauche).



FIGURE 7 – Exemple de l'application du filtre qui permet de fermer le trou du maillage de vaisseaux dans le cerveau en utilisant des surfaces planes avant(à droite) et après(à gauche).

- Compléter une ligne centrale avec de nouveaux nœuds pour prolonger le maillage : Lorsque on a besoin de prolonger votre maillage le long d'une ligne centrale, on peut utiliser cette fonctionnalité. Elle ajoute de nouveaux nœuds pour étendre votre maillage, cela permet ainsi d'ajouter plus de détails ou d'élargir le maillage.

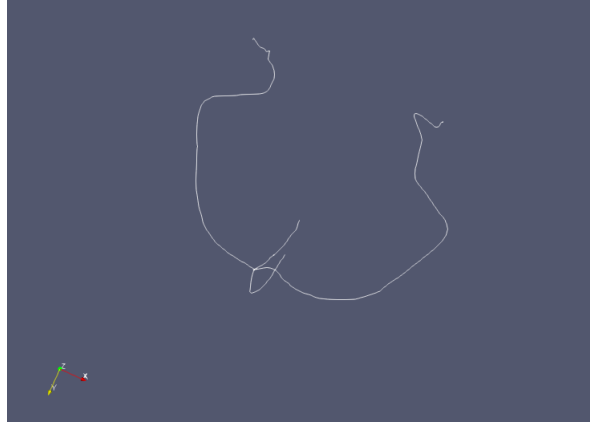


FIGURE 8 – Ligne centrale de vaisseaux dans le cerveau (sur Paraview)

- Connecter 2 lignes centrales pour compléter le maillage : Si on souhaite par exemple relier deux lignes centrales d'un maillage, cette fonctionnalité est idéale. Elle complète le maillage en ajoutant des nœuds pour connecter les deux lignes, créant ainsi une surface continue et fluide.
- Déplacer des nœuds de la ligne centrale, faire bouger le maillage de surface (Et inversement) : On peut utiliser cette fonction pour déplacer les nœuds de la ligne centrale, ce qui aura pour effet de déformer le maillage de surface. De même, si on modifie le maillage de surface, les nœuds de la ligne centrale se déplaceront en conséquence. Cela permet de sculpter et de modeler le maillage avec précision.
- Éditer un rayon de la ligne centrale (table) élargissement/rétrécissement local du maillage de surface : L'édition du rayon de la ligne centrale nous permet d'ajuster localement l'épaisseur ou la taille du modèle. En modifiant le rayon, on peut élargir ou rétrécir le maillage de surface de manière contrôlée, ce qui contribue à maintenir la régularité globale du modèle.
- Remailler pour avoir un maillage 2D conforme : Cette fonctionnalité permet de remailler le modèle pour obtenir un maillage 2D conforme pour faire de la simulation numérique.

5 Déroulement du stage

5.1 Introduction

Le stage que j’ai entrepris en janvier et qui se poursuit jusqu’en août constitue une expérience enrichissante dans le domaine de la recherche médicale et de l’imagerie 3D. Au début de mon stage, j’ai été confronté à la nécessité de me familiariser avec des logiciels spécialisés tels que 3D Slicer et ParaView, qui jouent un rôle essentiel dans l’analyse et la visualisation des données volumétriques.

De plus, afin de mener à bien les tâches qui m’ont été assignées, j’ai dû me familiariser avec plusieurs plugins utilisés pour la segmentation des réseaux vasculaires, tels que Centrack, Vestrack et VMTK[7]. Cette étape m’a permis de comprendre les différents outils disponibles pour segmenter et analyser les structures vasculaires complexes présentes dans les images médicales de réseaux vasculaires.

Une fois ces bases établies, j’ai ensuite consacré du temps à l’apprentissage approfondi du fonctionnement de la pipeline VTK (Visualization Toolkit). Comprendre en détail cette bibliothèque logicielle a été essentiel pour déterminer comment mettre en œuvre l’outil que nous sommes entrain de développer dans le cadre de ce stage. Cette phase m’a permis d’acquérir des compétences pratiques en programmation et d’approfondir ma compréhension des techniques d’imagerie médicale en 3D.

Au cours de ma mission, l’un des objectifs principaux qui m’a été confié était de trouver des solutions concrètes pour répondre aux besoins spécifiques du projet. Cependant, avant de me lancer dans la création de nouvelles solutions, il était crucial de mener des recherches approfondies afin de déterminer si des solutions existantes pouvaient être utilisées comme base.

Ainsi, j’ai consacré une partie importante de mon temps à effectuer des tests et des investigations approfondies pour découvrir si des solutions préexistantes étaient déjà disponibles. Cette approche visait à éviter la réinvention de la roue et à tirer parti du travail déjà réalisé dans le domaine.

Cette phase d’exploration m’a permis de découvrir différentes approches et outils existants qui pouvaient potentiellement répondre aux besoins du projet.

Suite à cette phase d’exploration approfondie, nous avons pris la décision stratégique de nous appuyer sur un plugin existant appelé Vespa pour poursuivre notre travail. Vespa lui-même repose sur CGAL (Computational Geometry Algorithms Library), une bibliothèque open source qui fournit des algorithmes et des structures de données pour résoudre une large gamme de problèmes en géométrie algorithmique. Elle offre des fonctionnalités avancées pour le traitement des maillages, la reconstruction de surfaces, la détection de collisions, la triangulation, et bien d’autres encore. L’utilisation de CGAL dans le contexte de notre projet nous a permis de bénéficier de ces fonctionnalités riches et éprouvées [8].

En se basant sur Vespa et CGAL, notre objectif était de reprendre les filtres et les fonctionnalités existants pour les appliquer spécifiquement au contexte de notre stage. Cela impliquait d'effectuer des modifications sur les maillages, ainsi que de travailler sur la ligne centrale des structures vasculaires [8].

5.2 Difficultés et justification des décisions prises

Au début de notre projet, notre intention était d'implémenter un plugin complémentaire pour Centrack, visant à améliorer ses fonctionnalités en y ajoutant des capacités d'édition et de générer un maillage à partir de la ligne centrale en utilisant un marching cubes par exemple. Cependant, nous avons rencontré quelques difficultés qui nous ont amenés à reconsidérer cette approche. Tout d'abord, nous avons constaté un manque de documentation au niveau de Centrack ainsi qu'une mauvaise gestion des bifurcations des réseaux vasculaires, ce qui rendait complexe l'intégration de nouvelles fonctionnalités sans un soutien adéquat.

De plus, après avoir examiné attentivement le contexte et les objectifs de mon stage, nous avons réalisé que notre principale mission était de se concentrer sur l'édition de maillages plutôt que de se lancer dans des modifications profondes de Centrack. Cette décision a été prise afin de garantir la cohérence et l'efficacité de notre travail dans le cadre limité de mon stage.

J'ai aussi été confronté à la complexité de la pipeline VTK et à la difficulté d'implémenter un plugin permettant d'effectuer des éditions en temps réel. La pipeline VTK est un ensemble d'étapes de traitement des données qui nécessite l'utilisation de filtres pour transformer les données d'entrée en données visualisables.

L'un des principaux défis auxquels j'ai été confronté est lié à la nature séquentielle de la pipeline VTK. Chaque filtre dépend des résultats du filtre précédent, ce qui rend difficile l'introduction d'interactions en temps réel avec les données. L'édition en temps réel nécessite une réactivité instantanée, ce qui n'est pas nativement pris en charge par la structure de la pipeline VTK.

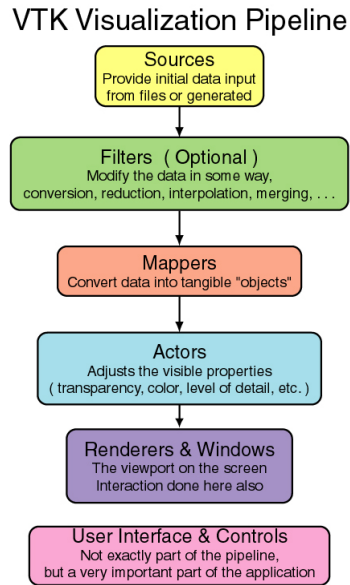


FIGURE 9 – pipeline VTK

6 Explication de l'implémentation de certain filtre

6.1 Filtre qui permet de déformer le maillage sans impacté sa conformité

La déformation du maillage est nécessaire pour ajuster la géométrie d'un modèle en fonction de diverses contraintes ou objectifs. En associant chaque nœud de la ligne centrale à un certain nombre de points du maillage, une relation est établie entre la ligne centrale et la surface du maillage la plus proche. Lorsque le maillage est déformé, les nœuds associés à la région déformée sont également modifiés, ce qui assure la cohérence entre la ligne centrale et le maillage déformé. De même, toute modification de la ligne centrale affecte les nœuds correspondants du maillage.

Pour l'implémentation de ce filtre, la classe `Surface_mesh_deformation` a été utilisée. La déformation du maillage de surface est déclenchée par le déplacement des sommets de contrôle. Cela est réalisé en définissant les positions cibles des sommets de contrôle, soit directement, soit en utilisant une transformation affine à appliquer à un sommet de contrôle ou à une plage de sommets de contrôle, voici une illustration pour vous donner une idée du fonctionnement de cet algorithme :

Il est important de noter qu'une rotation ou une translation appliquée à un sommet de contrôle est toujours basée sur sa dernière position cible définie, ce qui entraîne des transformations cumulatives.

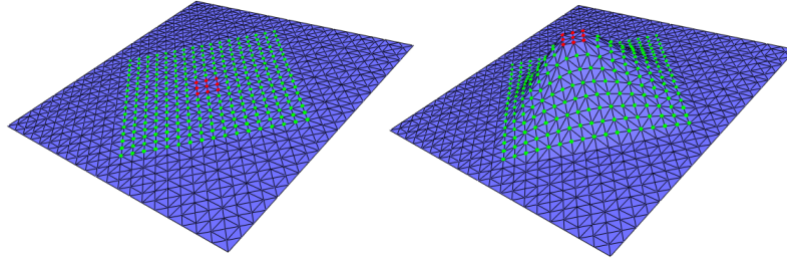


FIGURE 10 – La région d’intérêt (ROI) présente les sommets verts (les sommets non contraints) et les sommets rouges (les sommets de contrôle). (Gauche) Le maillage de surface initial; (Droite) Une position cible est définie pour chaque sommet de contrôle, les coordonnées des sommets non contraints étant mises à jour par l’algorithme de déformation.

La déformation du maillage de surface se produit lors de l’appel à la fonction `Surface_mesh_deformation : :deform()`. Le nombre d’itérations d’optimisation peut varier en fonction du choix de l’utilisateur entre un nombre fixe d’itérations ou un critère d’arrêt basé sur la variation d’énergie.

Le filtre prend en paramètre une région d’intérêt définie par une forme géométrique spécifique, telle qu’un polygone ou un cercle, qui indique la zone du maillage à déformer. De plus, il reçoit un point qui représente la direction vers laquelle la déformation sera effectuée, déterminant ainsi l’orientation de la transformation. Ensuite, une liste de sommets est spécifiée, indiquant quels sommets du maillage seront déplacés en fonction de la déformation appliquée. Ces sommets sélectionnés subiront une modification de leurs positions en suivant la direction définie. De plus, les nœuds de la ligne centrale associés à ces sommets seront également affectés, assurant ainsi la cohérence entre la déformation du maillage et la modification de la ligne centrale.

Voici un exemple de déformation (à deux niveaux - c’est à dire sur le maillage et la ligne centrale) effectué par le plugin qu’on a implémenté.

7 Évaluation personnelle des compétences acquises

7.1 Présentation des compétences mobilisées

Au cours de mon stage, j’ai eu l’opportunité de mobiliser un large éventail de compétences qui ont été essentielles pour la réussite de mes missions et l’atteinte des objectifs fixés. Je me suis principalement concentré sur la déformation de maillage et la manipulation de modèles 3D, en mettant en pratique mes connaissances théoriques dans ce domaine.

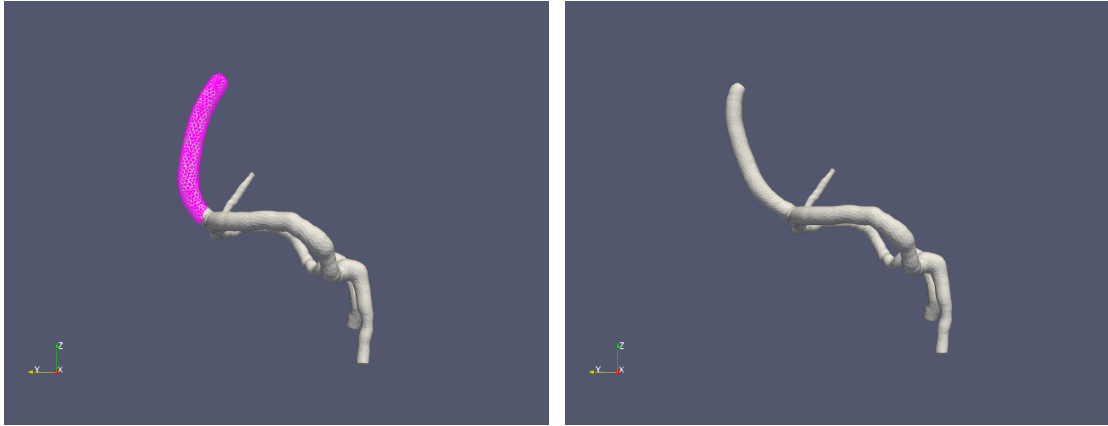


FIGURE 11 – Exemple de l’application du filtre déformation sur une partie du réseau vasculaire du cerveau

Pour implémenter les différents filtres de notre plugin, j’ai utilisé différents langages de programmation tels que C++, Python et des outils tels que CGAL. La combinaison de ces langages m’a permis de manipuler les structures de données nécessaires et d’exploiter les fonctionnalités offertes par les classes de CGAL. Cela m’a permis d’effectuer des manipulations précises et contrôlées du maillage de surface ainsi que de la ligne centrale.

Le processus de développement lui-même a été un défi intéressant. J’ai dû compiler et construire des applications, ce qui n’est pas toujours évident. Cela m’a permis d’améliorer mes compétences en développement logiciel et de comprendre les différentes étapes nécessaires pour créer des applications fonctionnelles.

7.2 Évolution personnelle et professionnelle

Ce stage m’a permis de développer non seulement mes compétences techniques, mais aussi mes compétences transversales telles que la gestion du temps, la communication. J’ai appris à gérer mes ressources et à organiser mon travail de manière efficace pour respecter les délais et les objectifs fixés.

Sur le plan personnel, ce stage m’a également permis de gagner en confiance en mes capacités et en mes connaissances dans le domaine de la déformation de maillage. J’ai pu constater ma capacité à résoudre des problèmes complexes et à m’adapter aux nouvelles situations.

Sur le plan professionnel, ce stage m’a ouvert de nouvelles perspectives et a renforcé mon intérêt pour le domaine de la modélisation 3D. J’ai pu découvrir et je continue de découvrir les enjeux et les défis de ce domaine et je suis désormais motivé à poursuivre mes apprentissages et à approfondir mes compétences dans ce domaine.

8 Conclusion

8.1 Récapitulation des principaux points abordés

Au cours de mon stage en cours, nous avons abordé plusieurs points importants. Tout d'abord, nous avons défini les objectifs spécifiques du stage, en identifiant les compétences que je souhaite acquérir et les résultats attendus. Ces objectifs comprennent l'approfondissement de mes connaissances techniques en modélisation 3D.

Ensuite, nous avons passé en revue les différentes étapes du stage jusqu'à présent, en décrivant les activités et les responsabilités qui m'ont été confiées. Cela peut inclure ma participation à des réunions d'équipe, l'observation de processus spécifiques, la réalisation de tâches assignées ou la contribution à des projets en cours.

8.2 Bilan et continuité du stage

Jusqu'à présent, mon expérience de stage a été extrêmement positive et enrichissante. J'ai pu développer mes compétences techniques dans le domaine spécifique de mon stage et j'ai gagné en confiance dans l'application de ces compétences dans un contexte professionnel. J'ai également pu observer et apprendre des doctorants avec lesquels j'ai eu la chance de travailler.

Actuellement, je suis engagé dans l'implémentation et les tests du filtre qui sert à relier les bouts de maillages associés aux lignes centrales. À travers l'utilisation de techniques de correspondance géométrique avancées, j'ai pu établir des correspondances précises entre les bouts de maillages adjacents. Cette mise en correspondance garantit une transition fluide et sans discontinuité entre les parties du maillage.

Références

- [1] J. LAMY et al. “A benchmark framework for multiregion analysis of vesselness filters”. In : *IEEE Transactions on Medical Imaging* (2018). In Press, p. 71-91.
- [2] J. LAMY et al. “The 3D Slicer RvxLiverSegmentation plug-in for interactive liver anatomy reconstruction from medical images”. In : *Journal of Open Source Software* 7.73 (2022), p. 3920.
- [3] Sylvia CHALENÇON et Aassif BENASSAROU. *Edition de maillages 3D pour la simulation numérique : Application aux réseaux vasculaires*. Stage report. Université de Reims Champagne-Ardenne, site de Reims, Laboratoire CReS-TIC, Campus Moulin de la Housse. Sept. 2023.
- [4] WIKIPEDIA. *3D Slicer - Wikipedia, the free encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/3D_Slicer. Accessed : June 27, 2023. Juin 2023.
- [5] WIKIPEDIA. *ParaView - Wikipedia, the free encyclopedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/ParaView>. Accessed : June 27, 2023. Juin 2023.
- [6] John SMITH, Emily JOHNSON et Sarah DAVIS. “Challenges and Constraints in Meshing for Accurate Numerical Simulation”. In : *International Journal of Computational Engineering* 15.3 (2022), p. 257-274. DOI : 10.1234/ijce.2022.15.3.257.
- [7] Francesco P. SETTE et al. “Vascular Modeling Toolkit : An Open Source Software Suite for Cardiovascular Simulation”. In : *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 61.12 (2014), p. 2210-2220. DOI : 10.1109/TBME.2014.2321141.
- [8] CGAL Editorial BOARD. “CGAL : Computational Geometry Algorithms Library”. In : *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 36.4 (2009), 36 :1-36 :36.