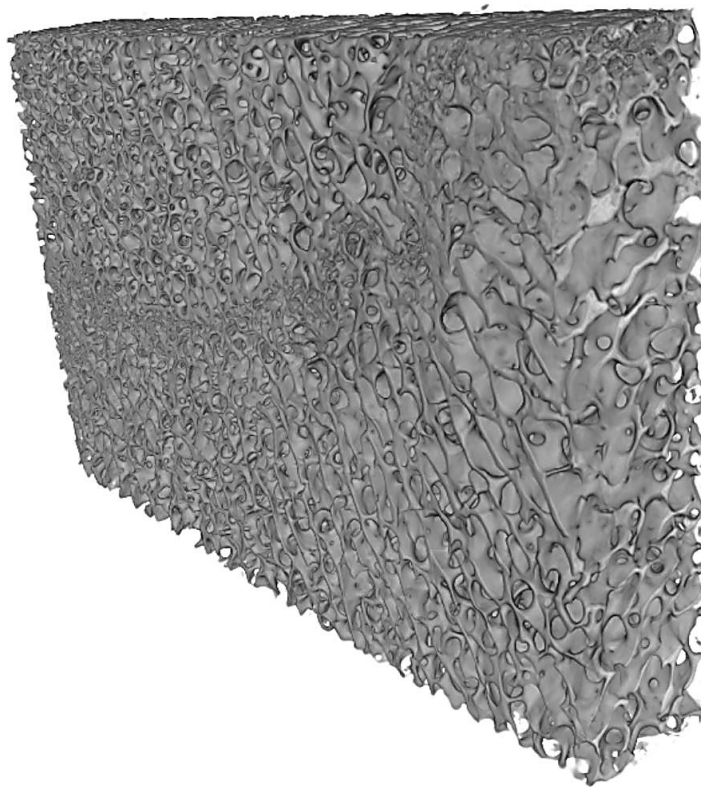


# Modélisation des déformations d'une structure en 3D basée sur un scan de microtomographe à rayon X

Projet de semestre

Olivier Schöpfer

09.01.2019



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE



## Table des matières

I.	Introduction.....	1
1.	Générale .....	1
2.	Le tomographe .....	1
II.	Procédure pour la création d'un modèle 3D composé de tétraèdres : .....	3
1.	Créer un nouveau projet : .....	3
a.	Trouver la taille des voxels .....	3
b.	Comment créer un nouveau projet à partir d'une collection d'images.....	4
c.	Entrer la taille des voxel dans Avizo .....	4
d.	On peut maintenant avoir une représentation en 3D de l'objet qui a été scanné : .....	5
2.	Créer une surface .....	5
a.	Avoir un modèle binaire .....	5
b.	Retirer les éléments flottants.....	8
c.	Sélectionner une partie d'intérêt du volume scanné.....	8
d.	Générer une surface.....	9
3.	Préparation pour générer un modèle en tétraèdres .....	12
a.	Test des triangles de surface .....	12
i.	Intersection test .....	12
ii.	Aspect ratio .....	14
iii.	Orientation test .....	15
b.	Remesh de la surface.....	15
i.	Premier remesh .....	16
ii.	Deuxième remesh.....	17
4.	Générer le modèle en tétraèdres.....	18
5.	Exporter le modèle de façon à pouvoir l'utiliser avec Akantu .....	19
6.	Dernière chose importante .....	19
III.	Essais de calcul simples sur un modèle sorti d'Avizo .....	20
1.	Caractéristiques de l'os .....	20
2.	Essai de traction sur un os en laboratoire.....	21
3.	Essai de traction simple avec Akantu .....	23
a.	Displacement controlled .....	24
b.	Force controlled .....	25
c.	Analyse graphique .....	26
IV.	Conclusion .....	28
V.	Bibliographie.....	29
VI.	Images .....	29



# 1. Introduction

## 1. Générale

L'imagerie 3D de structures microscopiques, à haute et très haute résolution, est maintenant possible à l'EPFL grâce au nouveau scanner de microtomographie à rayons X disponible dans le labo PIXE. Il est donc possible d'avoir une très bonne représentation 3D d'un échantillon réel, sans avoir à recourir à une méthode destructive, méthode qui était la norme avant l'arrivée du tomographe. La méthode précédente, pour réaliser le même travail, était de couper l'échantillon en très fines tranches et d'observer chaque tranche, une à une, à l'aide d'un microscope. Cette méthode était très lente et laborieuse, et ne permettait pas d'avoir l'échantillon à disposition pour effectuer d'autres tests.

Le but de ce projet est donc, à l'aide du microtomographe, de reconstruire une structure 3D, et de voir s'il est possible de produire facilement un mesh, qui pourra après être utilisé comme input pour l'outil de calcul Akantu, logiciel développé au LSMS (Laboratoire de Simulation en Mécanique des Solides). Si c'est le cas, il s'agira donc d'établir une marche à suivre pour passer des images venant du tomographe — des images en coupe, sur toute la longueur de l'échantillon, au format .tif — à un modèle en tétraèdres, utilisable dans le logiciel Akantu. Au final, on veut voir si le tomographe peut être utilisé efficacement pour la modélisation de structures plus ou moins complexes, dans le but d'effectuer des essais informatiques sur le modèle créé.

## 2. Le tomographe

Un tomographe est un scanner qui permet d'avoir des images similaires à une radio (rayon x), mais qui offre un résultat final en 3D. Le principe est le suivant : La machine dispose d'un émetteur de rayon X et d'un récepteur. Pour obtenir une image, on compare l'intensité du signal émis par l'émetteur et l'intensité reçue par le récepteur. L'atténuation du signal donne une indication sur les propriétés du matériau, et permet d'avoir une représentation pour une certaine direction.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

Avec

$\mu$  : Le coefficient d'atténuation d'un matériau, dépend des propriétés physiques du matériau

$x$  : épaisseur de l'échantillon traversé par le rayon X

Un calibrage adéquat est nécessaire pour avoir un bon résultat avec le tomographe. En effet, il ne suffit pas simplement de mettre l'intensité au maximum en se disant que ça traversera très bien l'échantillon et qu'on aura une bonne représentation : sur le graphique de gauche, on remarque une variation de l'absorption des différents matériaux en fonction de l'intensité initiale. Sur l'image de droite, on voit qu'avec un bon calibrage (basse énergie), on a une bien meilleure représentation de l'échantillon.

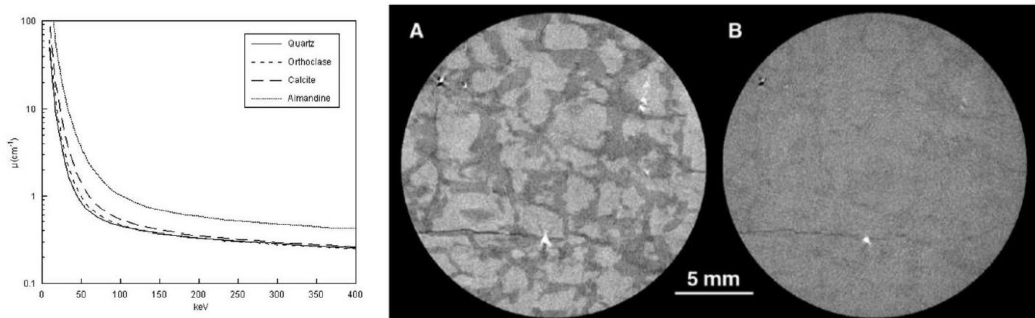


Figure 1 : Coefficient d'absorption de différentes roches en fonction de l'intensité  $I_0$  (gauche), Résultat du scan avec une basse énergie (A) et une haute énergie (B) (droite)

On procède ensuite de la façon expliquée ci-dessus, en faisant tourner l'échantillon sur 360°, afin de pouvoir construire une image en 3 dimensions. Plusieurs méthodes sont possibles pour le scan : elles sont résumées avec la figure ci-dessous. Le résultat final est une série de coupes, avec une certaine épaisseur, sur toute la hauteur de l'échantillon qui, quand mises l'une à côté de l'autre, permettent une reconstruction de l'échantillon scanné. La reconstruction est faite avec une grande précision, et permet une représentation fidèle de ce à quoi la structure interne ressemble réellement.

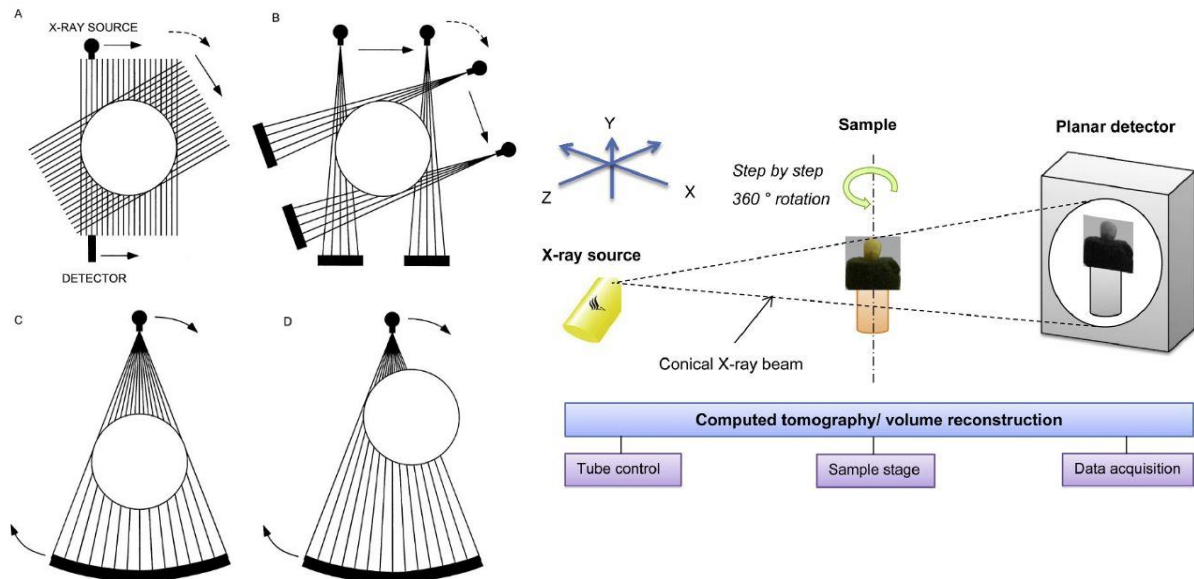


Figure 2 : Différentes façons d'obtenir une image par tomographie

Les quatre représentations sur la partie gauche de la Figure 2 sont les différentes façons de faire au cours du temps. Au début on avait une source unique et unidirectionnelle avec un récepteur unique. La source se déplaçait pour couvrir tout l'échantillon, après quoi la source et le capteur tournaient et la procédure recommençait. Après avoir amélioré le processus, il reste une source triangulaire avec un récepteur courbé, qui tournent autour de l'échantillon, mais qui ne se déplace plus, ce qui permet de scanner la pièce sur toute sa largeur en une fois. La 4<sup>ème</sup> image montre un échantillon décalé par rapport au triangle dessiné par l'émetteur. De cette façon, il est possible de scanner un objet plus grand. La dernière image, sur la droite de la Figure 2 représente un processus similaire à celui de la 3<sup>ème</sup> image, mais avec une source conique, ce qui permet de faire plusieurs tranches à la fois, et avoir un scan plus rapide. L'EPFL dispose d'un tomographe avec cette méthode de prise de données.

Avantages de la tomographie assistée par ordinateur :

- Méthode non destructive
- Très haute résolution possible, à condition d'avoir le bon matériel
- Rapide, et aucune préparation d'échantillon nécessaire (en comparaison à la méthode utilisée avant l'arrivée du tomographe)
- Complètement automatisé

Important : Il faut bien connaître les matériaux et leurs caractéristiques, afin d'avoir une bonne représentation avec le tomographe.



b. Comment créer un nouveau projet à partir d'une collection d'images

La procédure est très simple : Ouvrir Avizo, aller dans l'onglet projet, et juste glisser la collection d'images dans la case « Project view » (CTRL+A pour sélectionner toutes les images).

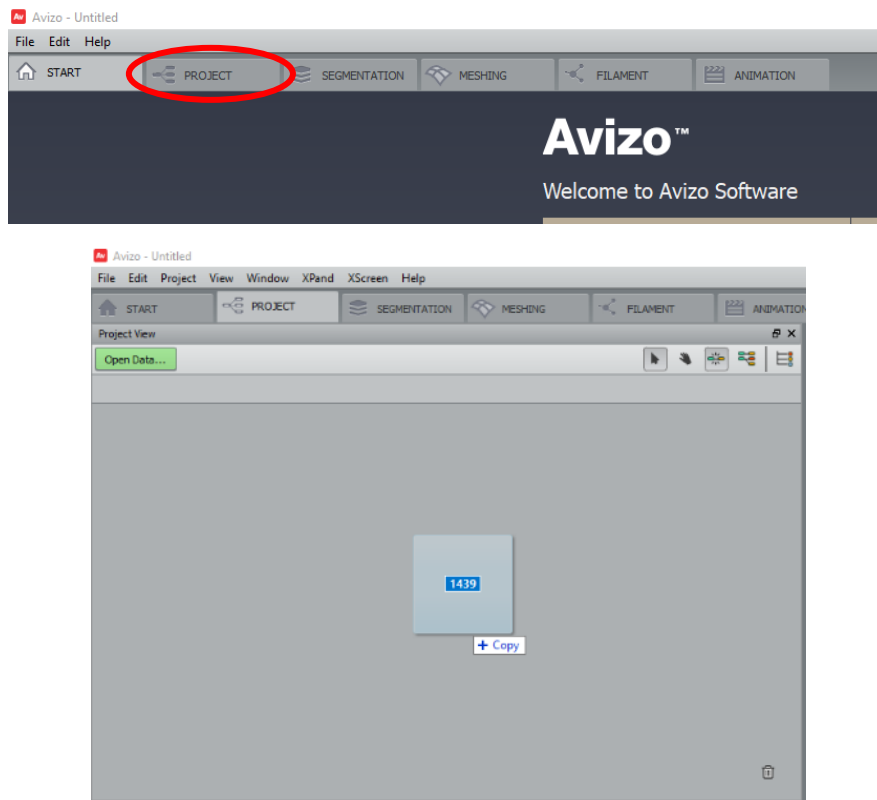


Figure 5 : Création d'un nouveau projet

c. Entrer la taille des voxel dans Avizo

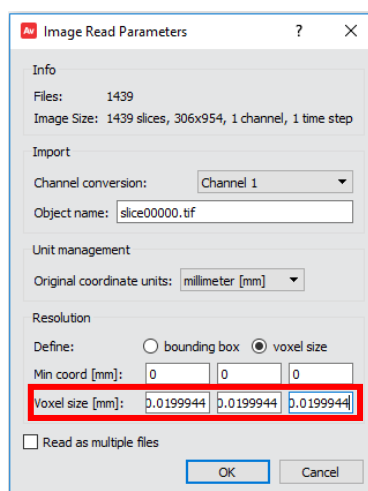


Figure 6 : Taille des voxels pour Avizo



- d. On peut maintenant avoir une représentation en 3D de l'objet qui a été scanné :

Cliquer sur la flèche « > » dans l'objet qui a été créé pour votre projet et sélectionner l'option « Volume Rendering » pour avoir une première représentation de votre volume.

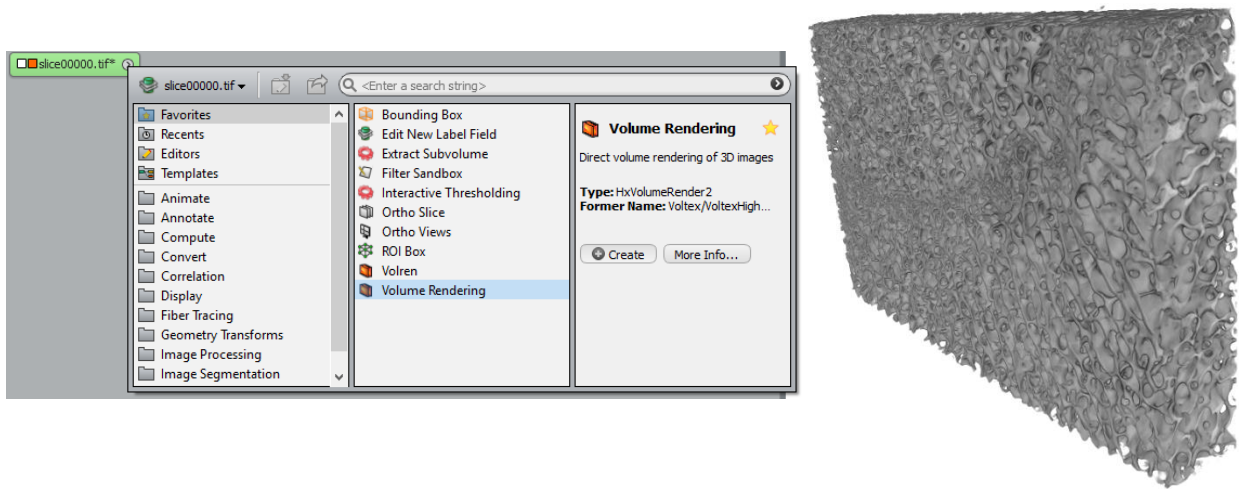


Figure 7 : Première représentation du volume

Il est également possible, grâce à la fonction « Ortho Slice », d'avoir la coupe de votre objet affichée dans Avizo. Pour cacher la représentation en volume ou en coupe, cliquer sur la case orange qui se trouve dans l'objet « Volume Rendering » ou « Ortho Slice ». Ceci est également valable pour toutes les représentations que vous aurez au cours de votre projet.

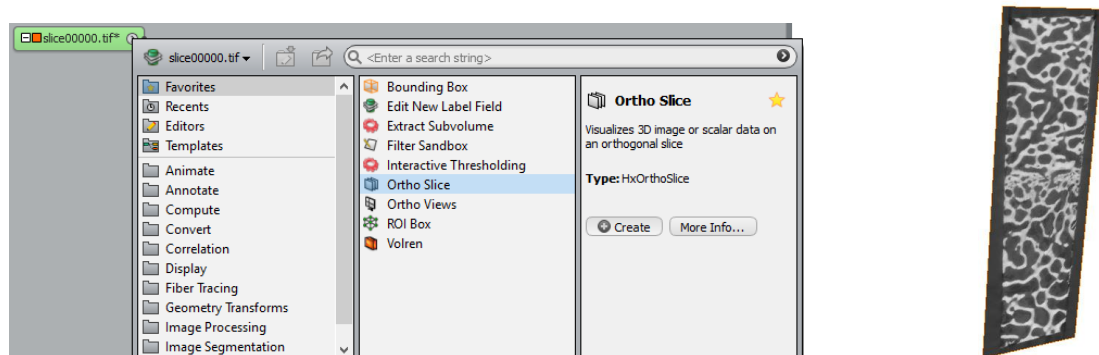


Figure 8 : Vue en coupe

## 2. Créer une surface

- a. Avoir un modèle binaire

La première chose à faire, est de créer une image binaire, c'est-à-dire, juste deux nuances, pour mon cas — un os — il ne restera plus que la partie « os » et la partie « vide » avec une frontière nette. Tout d'abord, il faut utiliser le module « Filter Sandbox » : toujours en cliquant sur « > » dans le premier objet créé (vert et non pas les modules qui permettent la visualisation (orange, jaune)), pour enlever certaines impuretés des coupes en nuance de gris :

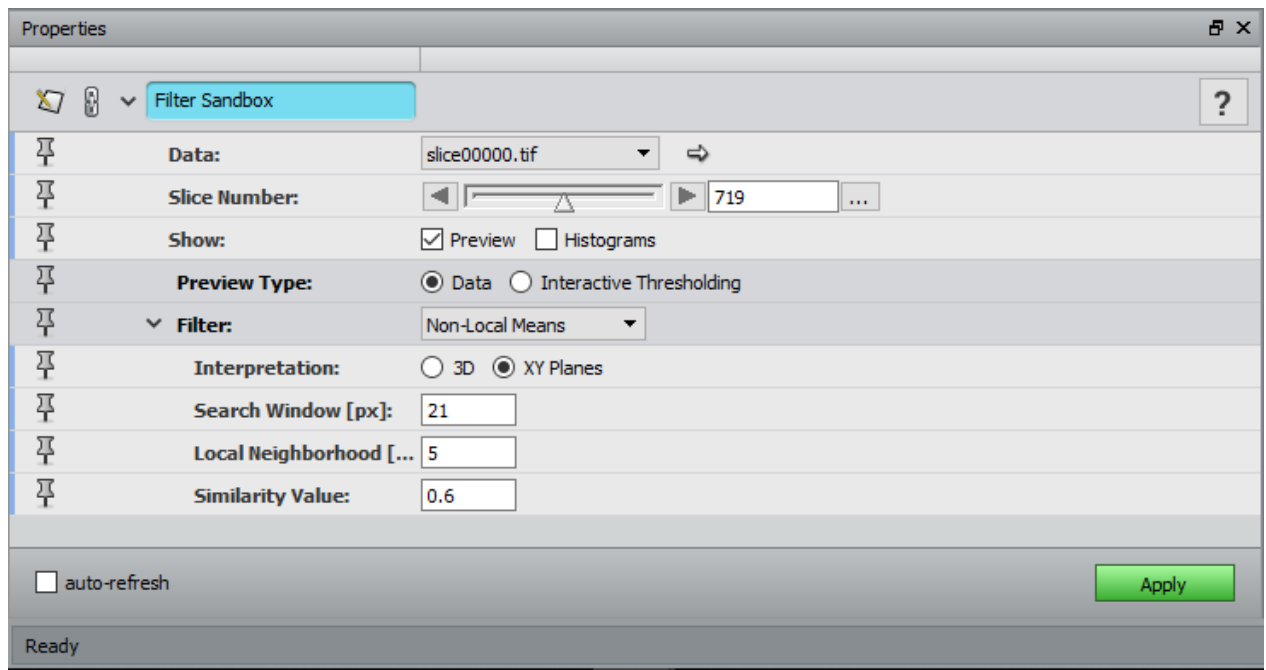


Figure 9 : Filter Sandbox - Calibration

Sélectionner « Non-Local Means » pour le réglage de « Filter Sandbox » et laisser les autres options par défaut. Cliquer sur « Apply ».

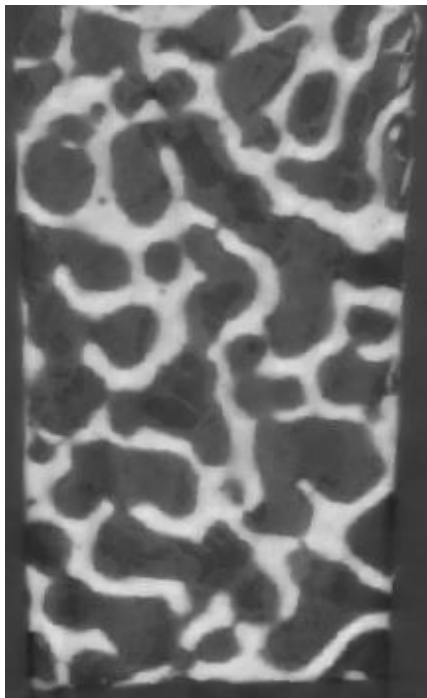


Figure 10 : Avant Filter Sandbox

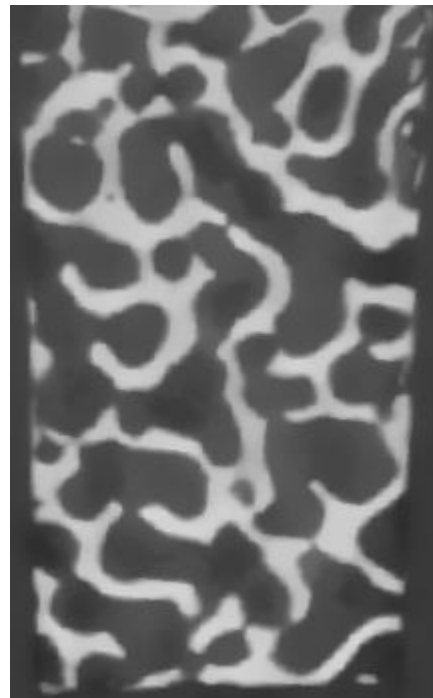


Figure 11 : Après Filter Sandbox

On peut maintenant passer à la binérisation, grâce à la fonction « Interactive Thresholding » appliquée sur le nouvel objet qui est apparu après avoir utilisé la fonction « Filter Sandbox ». Il s'agit de définir exactement quelle partie (quelles nuances de gris) sont de l'os, et les quelles ne le sont pas. Pour un modèle avec plusieurs matériaux, il faudra probablement faire la procédure plusieurs fois afin de séparer les différentes parties de l'échantillon, à supposer que le calibrage de la machine soit bien fait et que les propriétés des matériaux ne soient pas trop similaires — et donc que les

différents matériaux apparaissent bien avec une intensité différente. Pour sélectionner les régions qui vous intéressent, déplacez les curseurs dans la case « Intensity Range » ou rentrez directement les valeurs, si vous en avez d'une expérience précédente.

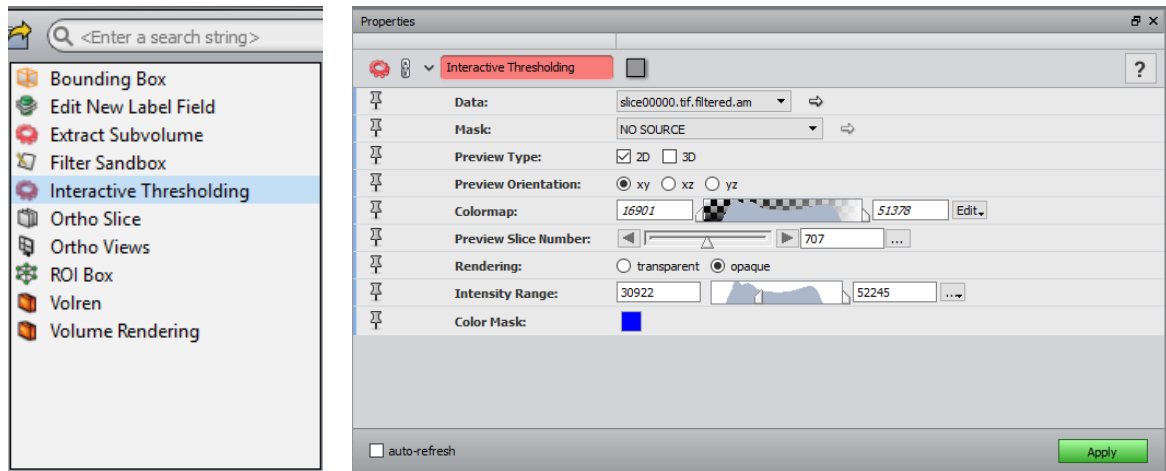


Figure 12 : Interactive Thresholding - Création et calibration

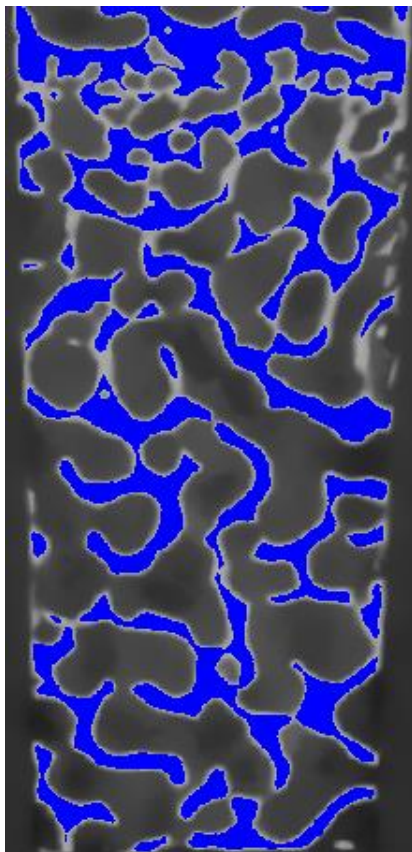


Figure 13 : Mauvaise binérisation

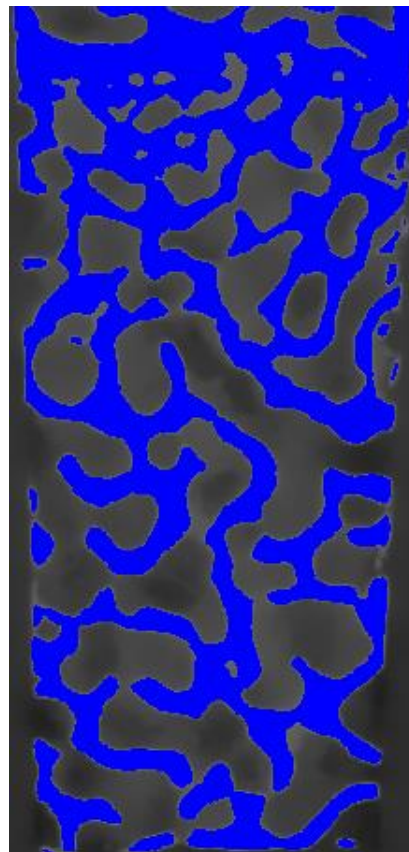


Figure 14 : Bonne binérisation (à mon sens)

A ce moment de la procédure, si vous comptez faire beaucoup de modélisations basées sur des scans similaires, donc : avec la même machine, le même calibrage, le même genre d'échantillons, le même genre de modèles, etc., il peut être utile de noter les valeurs qui apparaissent dans les cases « Intensity Range », pour pouvoir réutiliser les mêmes dans les futures modélisations, et avoir des modélisations plus homogènes.

### b. Retirer les éléments flottants

Les éléments flottants sont un problème pour le logiciel Akantu, et doivent être supprimés du modèle. Ceci peut être fait grâce à la fonction « Remove small spots » disponible dans Avizo. Cliquez sur « > » de l'objet créé après la binérisation. Cette fois, il faudra utiliser la barre de recherche, car la fonction n'est pas proposée directement par Avizo.

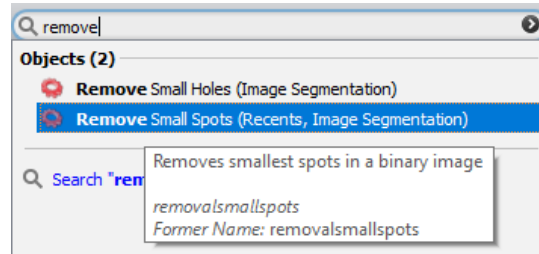


Figure 15 : Remove small spots

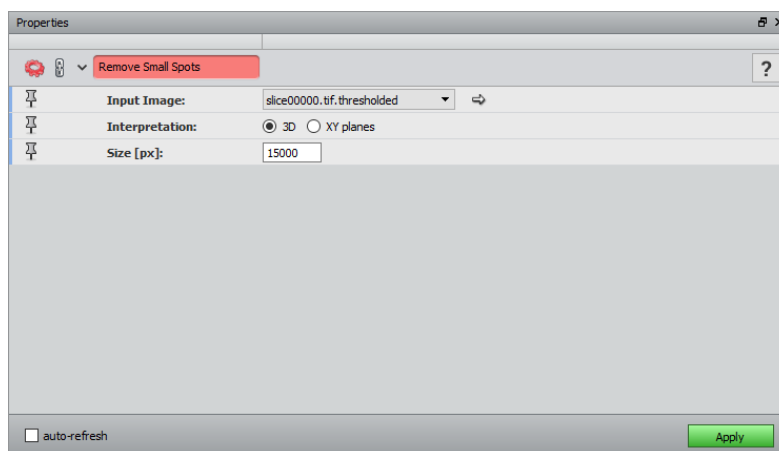


Figure 16 : Taille des objets à retirer

Pour mon modèle, la taille qui est fixée n'est pas importante, du moment qu'elle est assez grande. Ceci est dû au fait que l'objet d'intérêt est la structure principale et donc, le plus gros objet. Si la taille des éléments que je retire est trop grande, la totalité du modèle sera supprimé. Si cela arrive, il suffit de faire un retour en arrière (supprimer le module « Remove small spots ») et réessayer avec une valeur plus petite.

### c. Sélectionner une partie d'intérêt du volume scanné

Cette étape n'est pas nécessaire pour la création d'un modèle 3D, mais peut être utile dans l'éventualité où la totalité du modèle scanné n'est pas intéressante. L'option permet également de réduire considérablement la taille de l'objet, et donc d'avoir des temps de calculs très réduit et empêcher le logiciel d'être ralenti. Ceci peut être souhaitable au début, pendant la familiarisation avec le logiciel, pour créer des modèles factices, et voir comment ils peuvent être modélisés, sans devoir attendre trop longtemps dans le cas d'erreurs de manipulation.

Il faudra donc utiliser la fonction « Extract Subvolume », après quoi on a la possibilité de choisir un volume d'intérêt avec la souris, ou de rentrer directement la taille du sous-volume. Cette deuxième possibilité peut être utile dans le cadre d'une série de modélisations sur différents échantillons, en voulant tout le temps garder le même sous-volume.

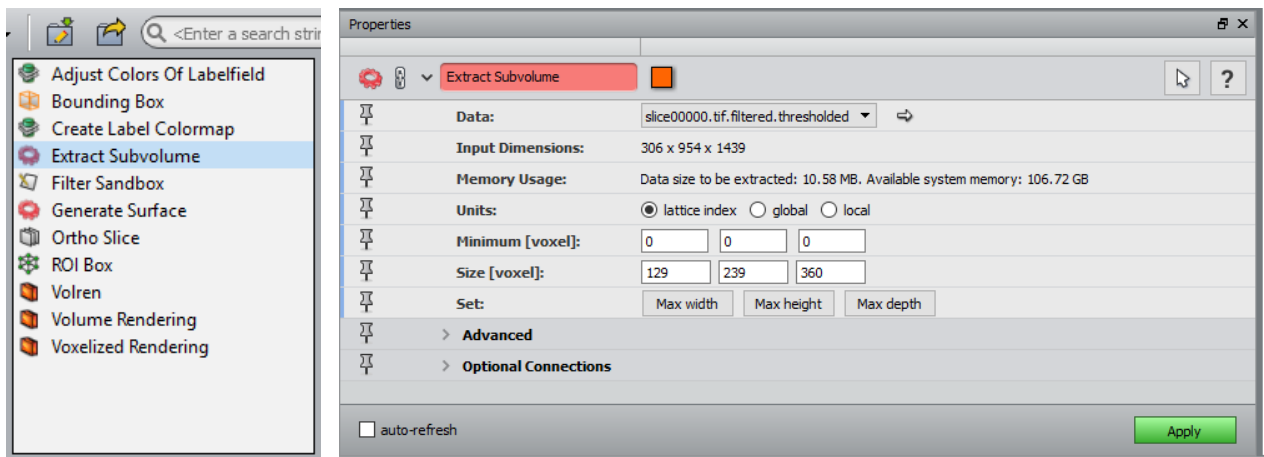


Figure 17 : Extract Subvolume - Création et calibration

#### d. Générer une surface

Vous pouvez, à présent, générer une surface pour votre modèle. Cliquez sur le « > » du nouvel objet généré après l'opération « Extract subvolume » et choisissez « Generate Surface ». Après cette étape, il est possible de visualiser la surface qui a été générée par le logiciel. Cliquez sur « > » du nouvel objet et utilisez la fonction « Surface View ».

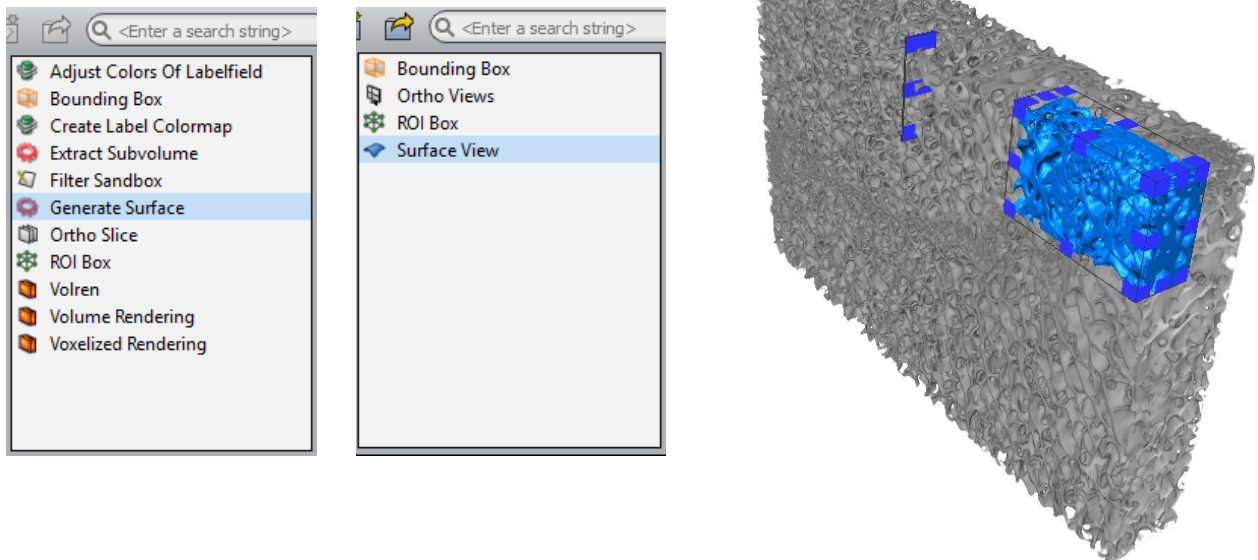


Figure 18 : Générer et visualiser une surface

A ce point de la procédure, il est également possible de voir apparaître des éléments flottants, ce qui, à nouveau, est problématique. Pour remédier à cela, Avizo possède une fonction : au moment de la création de la surface, dans la ligne « Smoothing », il faut changer « Unconstrained Smoothing » et le remplacer par « Constrained Smoothing ». Ceci va forcer le logiciel à suivre au plus proche le volume représenté par les voxels.



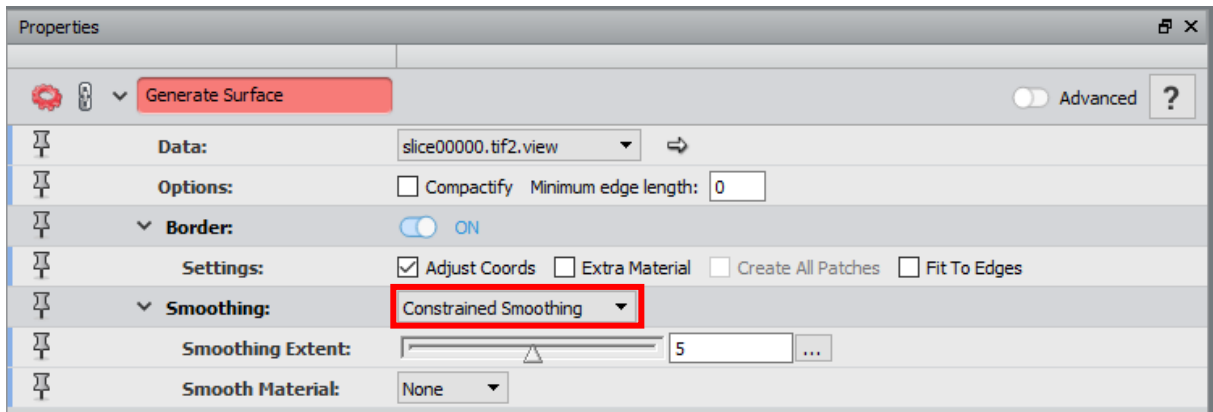


Figure 19 : "Constrained Smoothing" au moment de créer la surface

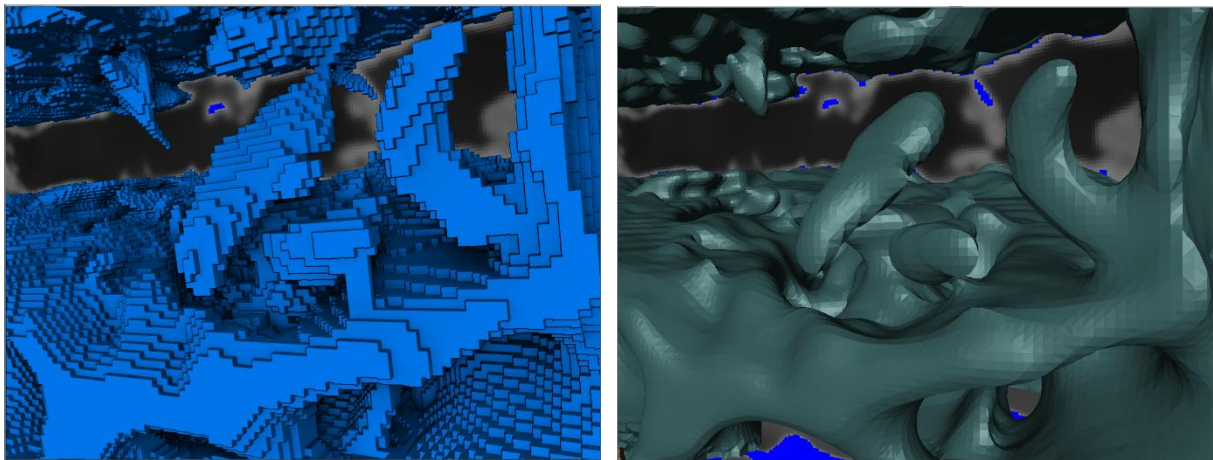


Figure 20 : Avant/après la création de la surface, sans utiliser "Constrained Smoothing"

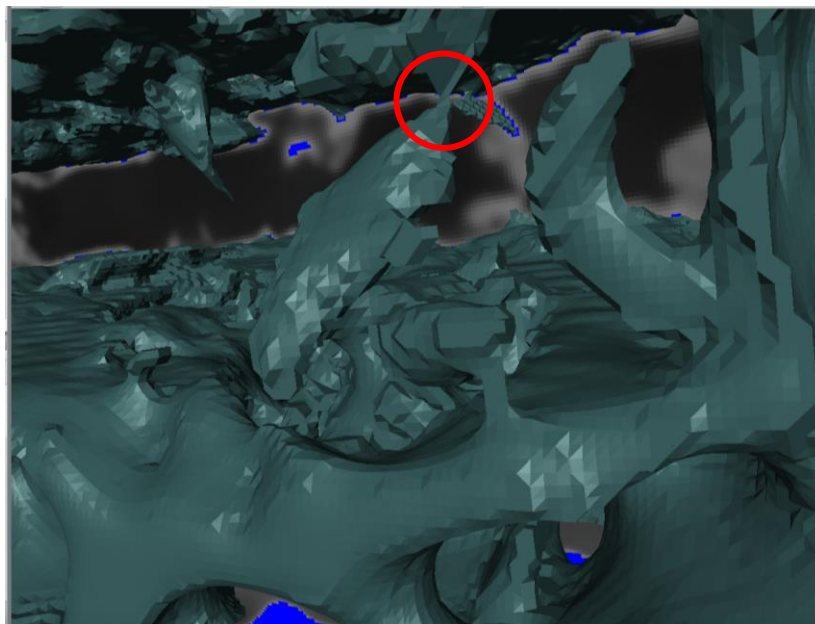


Figure 21 : Après la création de la surface, en utilisant "Constrained Smoothing"

Pour avoir un « smoothing » maximal, il faut mettre une valeur haute, jusqu'à 9 au maximum. Au contraire, pour avoir un « smoothing » minimal, il faut une valeur basse, jusqu'à 1 au minimum. Le

problème qui survient en utilisant cette méthode, c'est que si le « smoothing » est mis très bas, par exemple 1, la surface générée sera en forme « d'escalier », car elle suivra exactement la forme des voxels. On aura donc une représentation peu fidèle du modèle réel.

A ce moment de la procédure, une bonne idée est de regarder la taille du modèle qui a été généré et, s'il est trop conséquent, le simplifier. Ceci peut être fait directement depuis l'objet qui a été créé après « Generate Surface ». Dans la ligne « Surface », on peut voir le nombre d'éléments présent dans le modèle. De manière générale, au-dessus de 1-2 million de triangles, les calculs deviennent relativement long. J'ai essayé de faire la procédure avec 5 millions de triangles, cela aurait été possible, mais j'ai abandonné après le premier « remesh » (voir 3.b), qui a pris 4 jours pour se terminer. Dans le cadre de la création de cette marche à suivre, j'ai simplifié mon modèle en gardant 30% du nombre total de triangles générés. Pour simplifier le modèle, il faut cliquer sur « Simplification Editor », après quoi il est possible de rentrer le nombre de triangles souhaité pour la surface de l'élément modélisé. Une fois le nombre d'éléments rentré, cliquez sur « Simplify Now ».

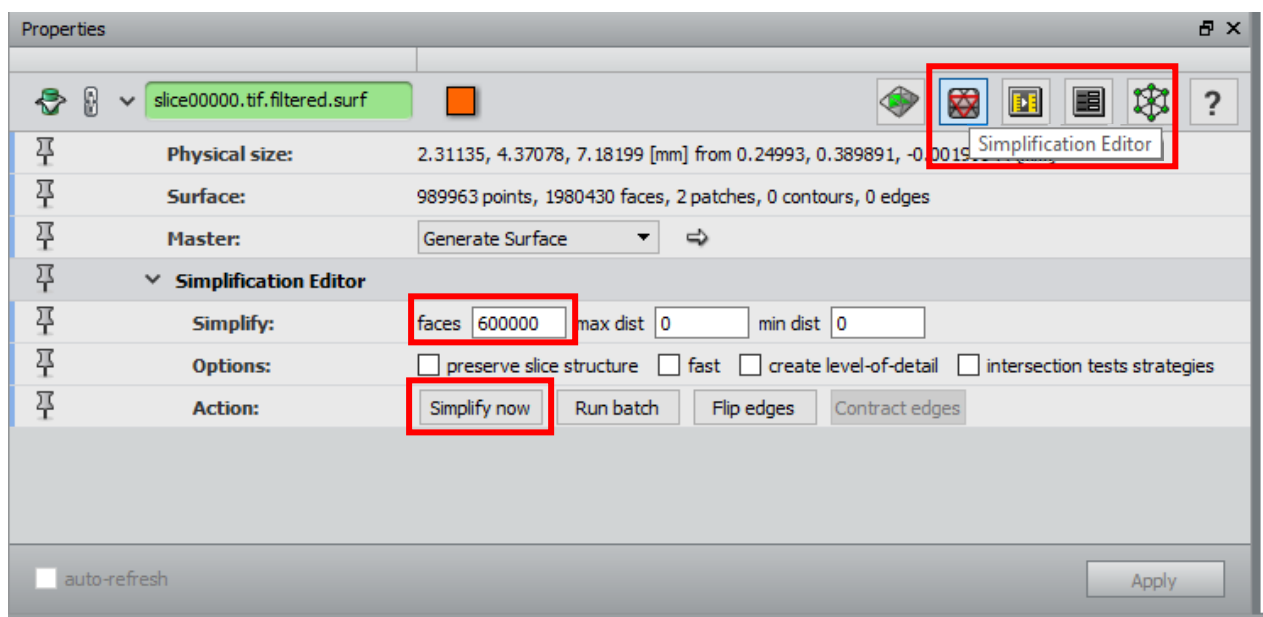


Figure 22 : Simplification Editor - Calibration

Avec une résolution à 30% de la résolution initiale, on garde une qualité de modèle acceptable, cependant, cela dépend très probablement du type de modèle et de la complexité de la structure modélisée. Pour mon exemple, la structure est très complexe, et donc 30% n'est peut-être pas idéal, cependant il se peut qu'une résolution de 10% soit suffisante pour un autre genre de structure. L'important est de limiter le nombre de triangles.

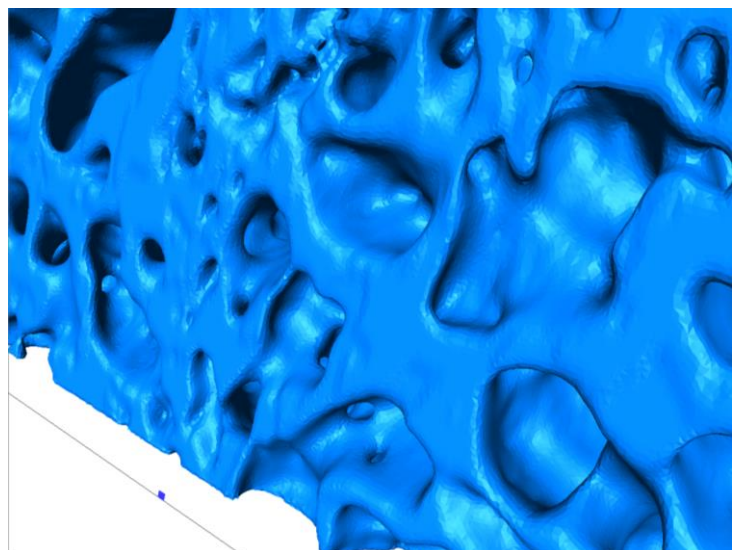


Figure 23 : Qualité de la surface avec 30% de la résolution initiale

### 3. Préparation pour générer un modèle en tétraèdres

#### a. Test des triangles de surface

Avant de pouvoir générer un modèle, il faudra corriger les erreurs de modélisation qui se sont produites au moment de la création de la surface. Pour ce faire, Avizo dispose de plusieurs tests destinés à vérifier les intersections, le ratio d'aspect ainsi que l'orientation des triangles.

Pour avoir accès à ces tests, vous devez cliquer sur l'objet de surface générée après la simplification et sélectionner le « Surface Editor ». Vous avez maintenant accès aux tests dans le menu « Surface » puis « Tests ».

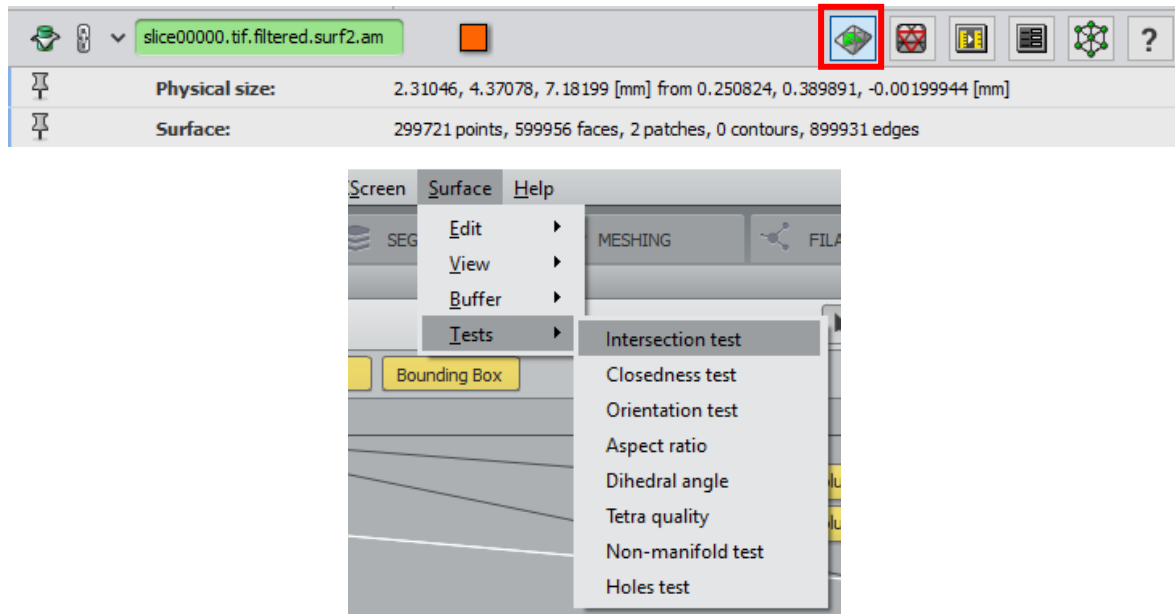


Figure 24 : Test des triangles de la surface

#### i. Intersection test

Ce test vérifie s'il y a des intersections sur la surface générée. Ces intersections peuvent être : soit une surface qui passe à travers une autre soit, sur la même surface, deux triangles qui s'intersectent. Après chaque correction, cliquez sur « Compute » (🟢) dans la fenêtre d'édition pour aller au prochain triangle avec un problème d'intersection. Pour le premier type d'intersection, ma solution est d'utiliser la fonction « Translate Vertices » (📏) de la manière suivante :



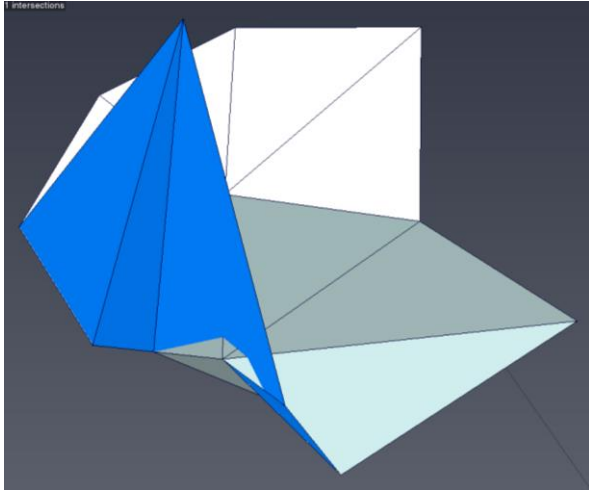


Figure 25 : Problème d'intersection

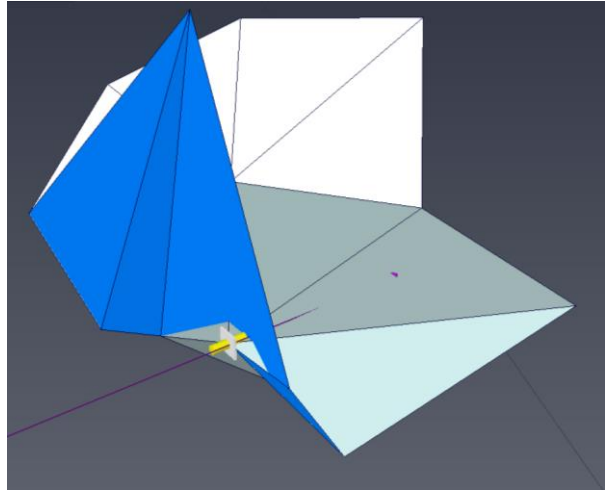


Figure 26 : Utiliser "Translate Vertices"

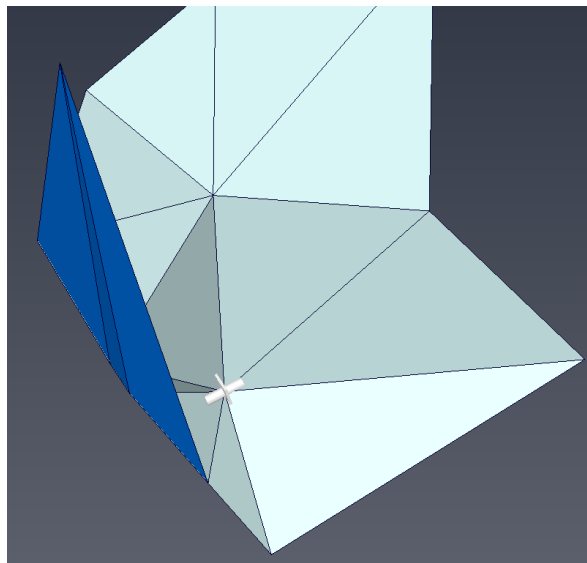



Figure 27 : Intersection corrigée

Il s'agit donc de cliquer sur l'élément qui traverse la surface, et de le déplacer de l'autre côté de cette dernière. Si jamais le module qui permet de déplacer le sommet n'est pas dans le bon sens, vous pouvez cliquer sur CTRL, ça le fera tourner.

Pour le deuxième type d'intersection, j'utilise la fonction « Contract Edge » ():

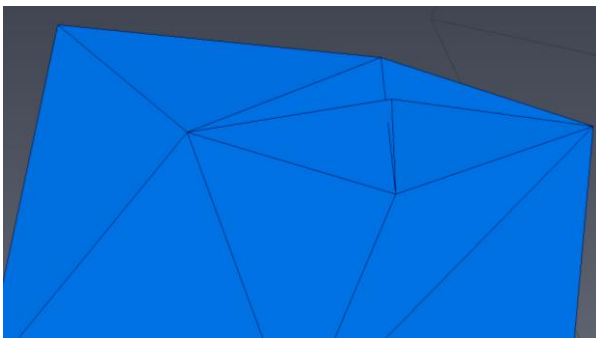


Figure 28 : Disposition avant la correction

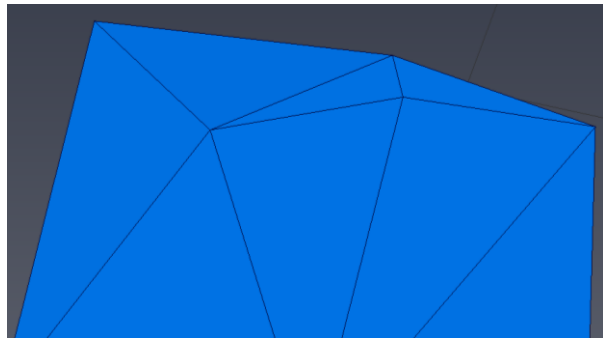


Figure 29 : Disposition après la correction

## ii. Aspect ratio

Ce test vérifie le ratio d'aspect des triangles. Il va détecter les triangles qui sont trop « plats » et vous demander de les corriger. Il existe un fix automatique, qui devrait corriger une bonne partie des erreurs. Pour la correction automatique, il faudra aller dans « Surface », « Edit » et sélectionner « Prepare Generate Tetra Grid ». Une boîte de dialogue va s'ouvrir. Laissez les paramètres par défaut et cliquez sur « Fix ». Une fois la correction terminée, fermez la boîte de dialogue et relancez un test « Aspect ratio » pour voir s'il reste des triangles à corriger. Ceci est à faire directement après avoir lancé le test « Aspect ratio ».

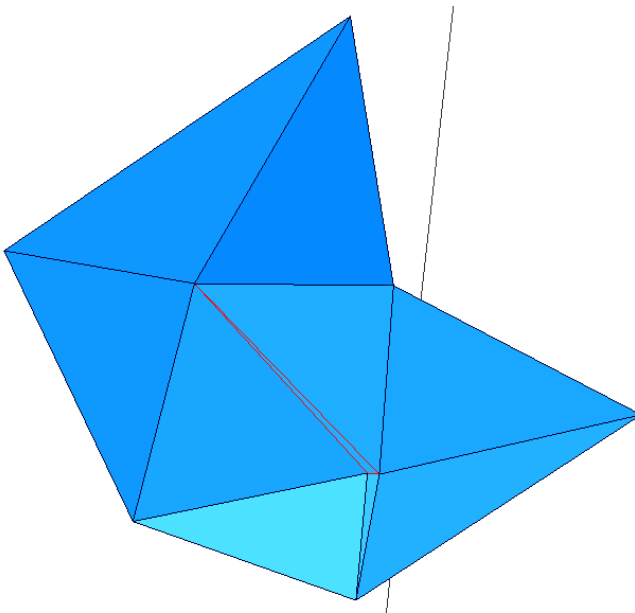


Figure 30 : Triangle typique avec un mauvais ratio

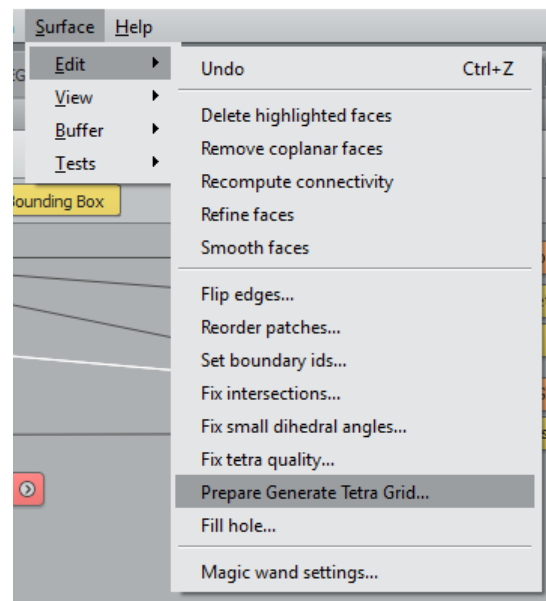


Figure 31 : Fix automatique pour le ratio d'aspect

Il reste souvent plusieurs triangles qui ont un mauvais ratio. Vous devrez ajuster ces derniers à la main. Mon conseil est d'utiliser l'outil « Translate vertices » (⊕). Il faudra cliquer sur l'intersection que vous voulez déplacer, puis cliquer sur la partie rectangulaire du curseur qui va apparaître, et le déplacer à l'endroit voulu. Une autre solution que j'avais dû utiliser au début, parce que le déplacement avec la souris ne marchait pas, est de cliquer sur l'intersection, puis maintenir SHIFT et cliquer à l'endroit où je voulais déplacer le point. Cette deuxième technique ne marchait plus quand j'avais la possibilité de déplacer les intersections à la souris.

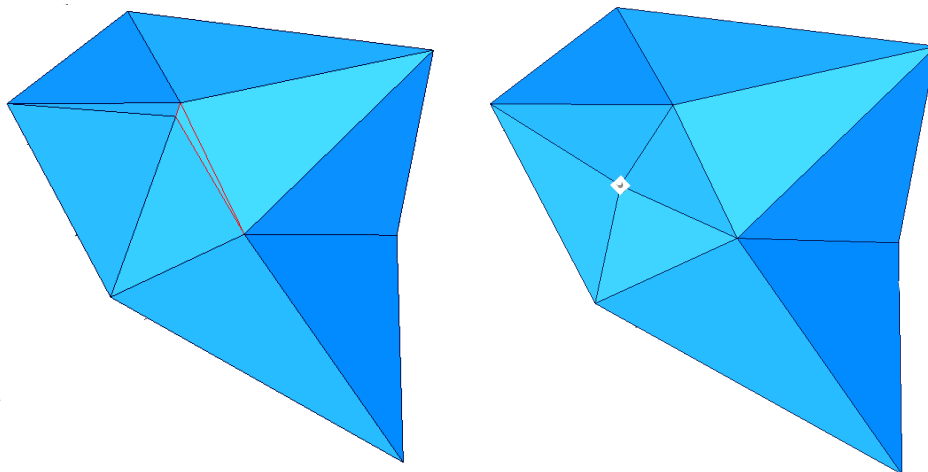


Figure 32 : Utilisation de l'outil "Translate vertices"

Idéalement, après avoir corrigé les triangles les plus critiques, le ratio le plus grand devrait être en dessous de 20-30. Après chaque correction, cliquez sur « Compute » (🔄) dans la fenêtre d'édition pour aller au prochain triangle avec un mauvais ratio.

### iii. Orientation test

Ce test détecte les triangles qui n'ont pas la bonne orientation. Le manuel d'Avizo dit qu'il y a un fix automatique, mais je ne l'ai pas trouvé. Pour la correction manuelle, je conseille d'utiliser l'outil « Contract Edge » (🔗). Pour obtenir un bon résultat, je clique sur la partie extérieure du triangle (vers la pointe), ce qui fait disparaître le triangle avec la mauvaise orientation, et va arranger la surface en conséquent.

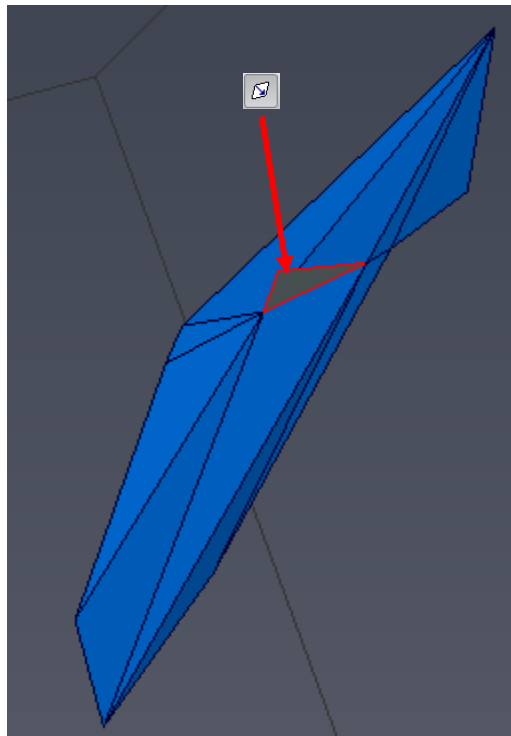


Figure 33 : Triangle typique avec une mauvaise orientation

A nouveau, après chaque correction d'orientation, cliquez sur « Compute » (🔄) pour arriver au prochain triangle avec une mauvaise orientation et vérifier que votre modification a bien diminué le nombre de triangles avec une mauvaise orientation.

### b. Remesh de la surface

Il y aura deux remesh à faire. Cet outil va réduire le nombre de triangles sur la surface ainsi que leur donner un meilleur aspect. A nouveau, cliquez sur « > » du dernier objet créé (la surface dont vous avez corrigé les erreurs), puis cherchez dans la barre de recherche la fonction « Remesh surface ».

*i. Premier remesh*

Voici les paramètres qui sont importants : Il faut garder le pourcentage dans la ligne « Desired Size » à 50%. Sur la ligne « Error Thresholds », dans la case « Smoothness », entrez 0.6. Sur la ligne « Contour Options », cochez la case « fix contours ».

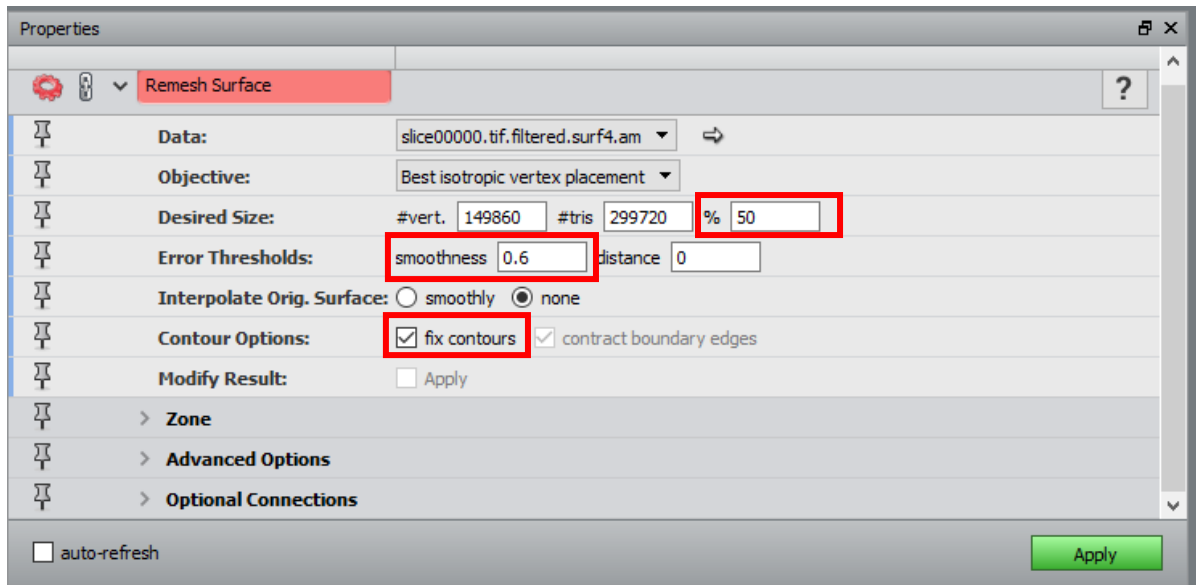


Figure 34 : Premier remesh - Calibration

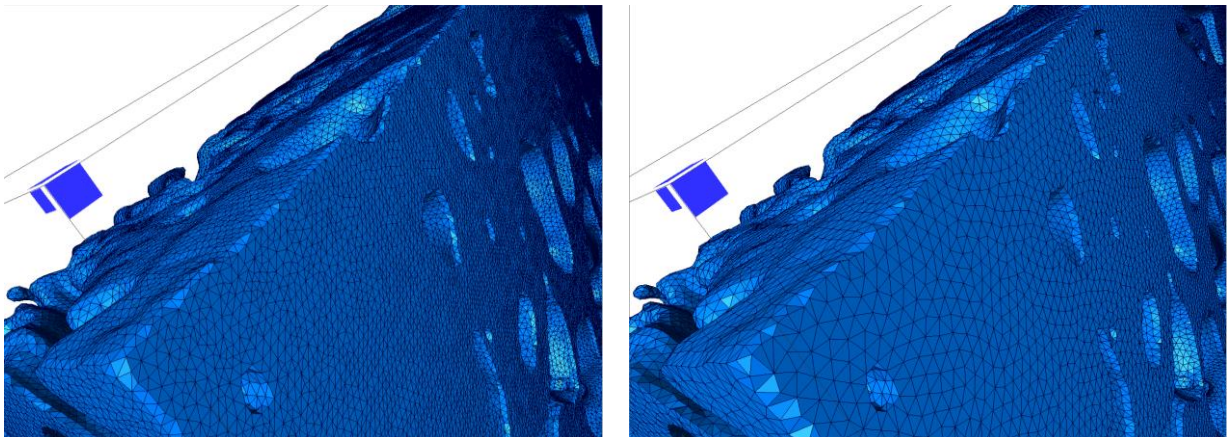


Figure 35 : Comparaison avant/après le premier remesh

## ii. Deuxième remesh

Même procédure pour créer un deuxième objet « Remesh surface », cette fois sur l'objet créé après le premier remesh. Les paramètres importants sont : Sur la ligne « Desired Size », il faut maintenant mettre le pourcentage à 100%. Sur la ligne « Error Thresholds », dans la case « Smoothness », entrez 0.6. Enlevez la coche dans la case « fix contours » et cocher la case « Only around contours » dans la section « Zone ».

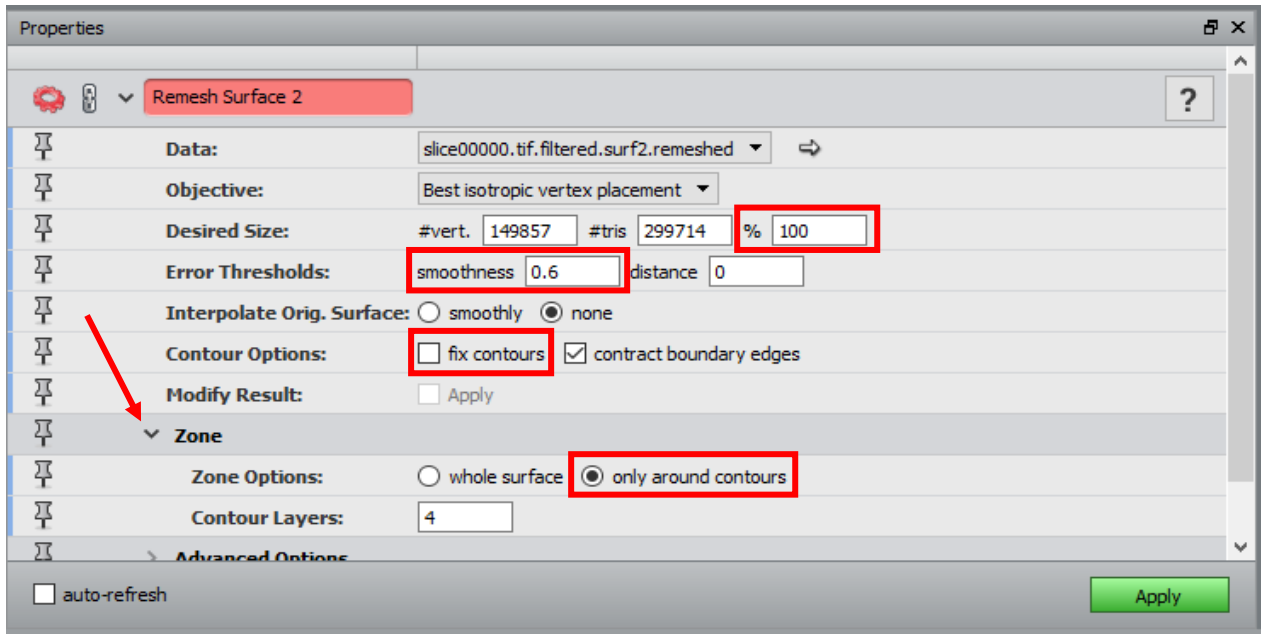


Figure 36 : Deuxième remesh - Calibration

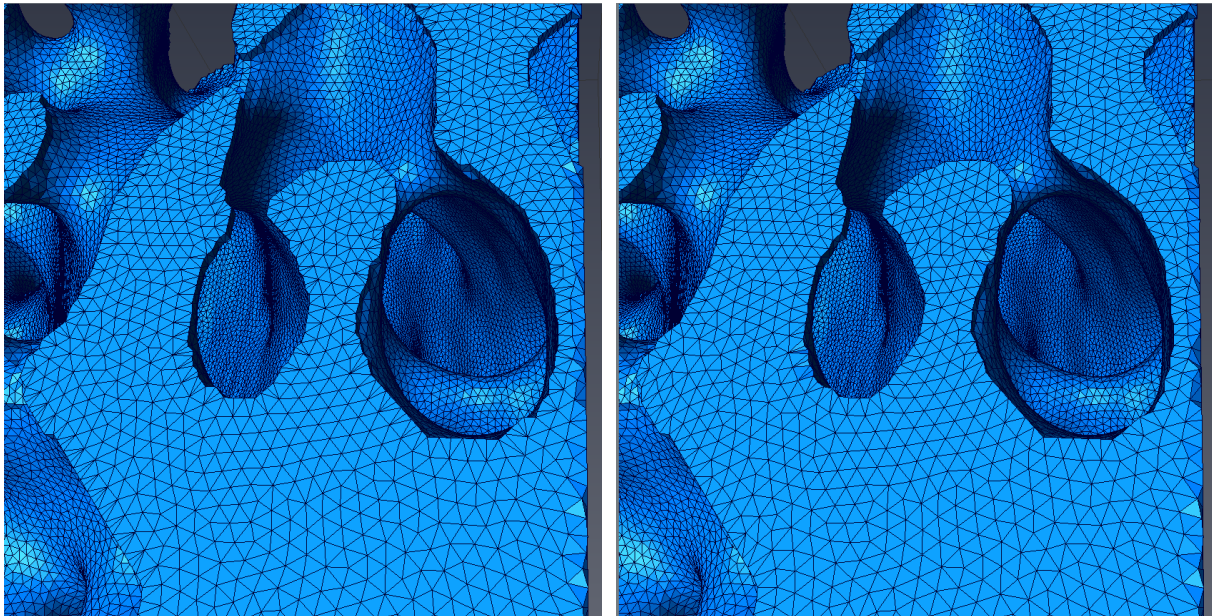


Figure 37 : Comparaison avant/après le deuxième remesh

Ce « remesh » va améliorer les triangles aux contours uniquement, en gardant les triangles au milieu de la surface tel qu'ils sont.

A ce point, vous pouvez repasser par les étapes du « Surface editor », pour corriger les dernières erreurs (Intersection, Ratio d'aspect, Orientation) avant de passer à l'étape finale.



#### 4. Générer le modèle en tétraèdres

Pour cette dernière étape, il faudra à nouveau cliquer sur « > » du dernier objet généré (après le deuxième remesh de surface) et, dans la barre de recherche, trouver la fonction « Generate Tetra Grid ». Avant de créer le modèle final, vous devrez lancer le « Check » pour vérifier que tout est ok. Si ce n'est pas le cas, il faut retourner à l'étape de l'éditeur de surface. Une fois que toutes les cases sont à « ok », vous pouvez lancer le générateur en cliquant sur « Run Now ».

	Region	Closedness	Volume	Intersection	Orientation	Mean edge length	Mesh size	Estimated cell number	Largest triangle aspect ratio	Smallest dihedral angle	Largest tetrahedron aspect ratio
1	Material1	ok	ok	ok	ok	4.6213758e-05	4.6213758e-05	3766073	ok	ok	ok

Figure 38 : Check avant de lancer le générateur de tétraèdres

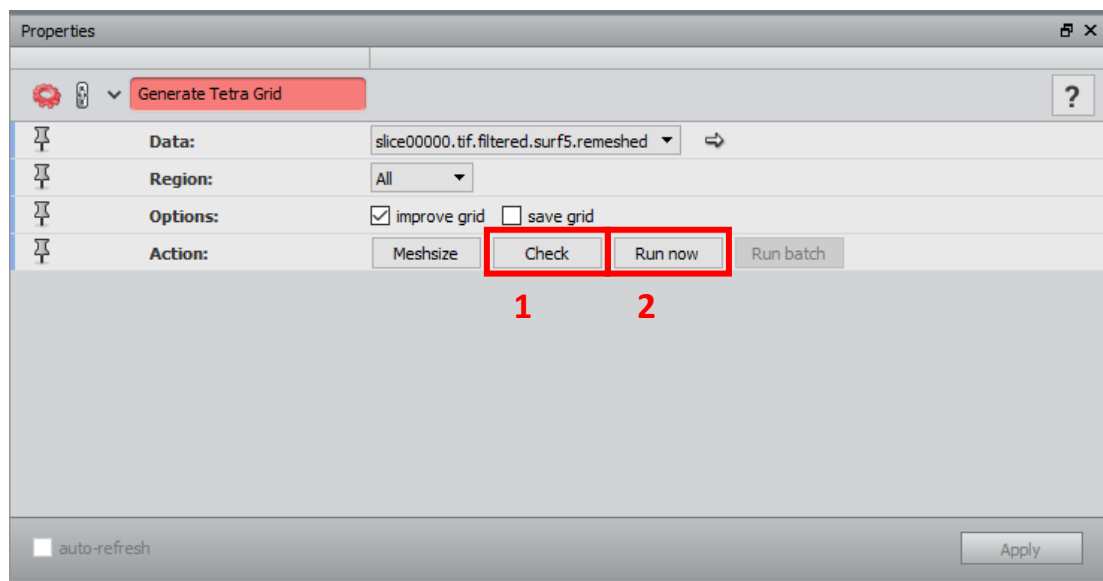


Figure 39 : Generate Tetra Grid

Finalement, pour voir le résultat de votre modélisation, cliquez sur le « > » de l'objet créé après l'utilisation du module « Generate Tetra Grid » et cliquez sur « Tetra Grid View ».

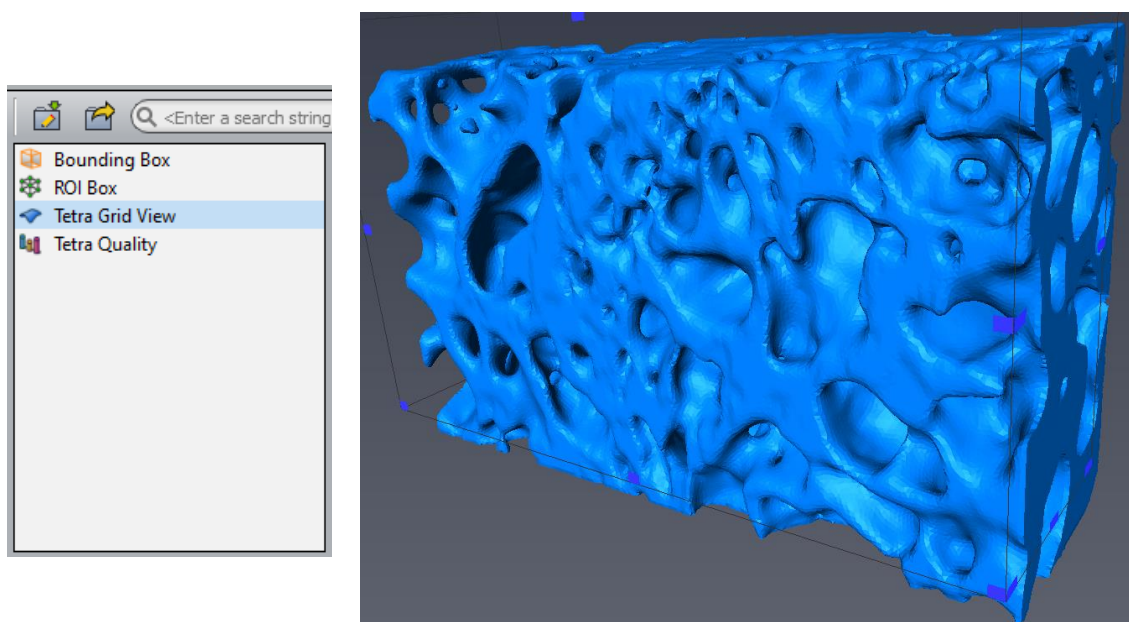


Figure 40 : Visualisation du résultat final dans Avizo

## 5. Exporter le modèle de façon à pouvoir l'utiliser avec Akantu

Cliquez sur le « > » du dernier objet créé, cliquez sur « Export Data As », et choisissez « ABAQUS Input (\*.inp) ».

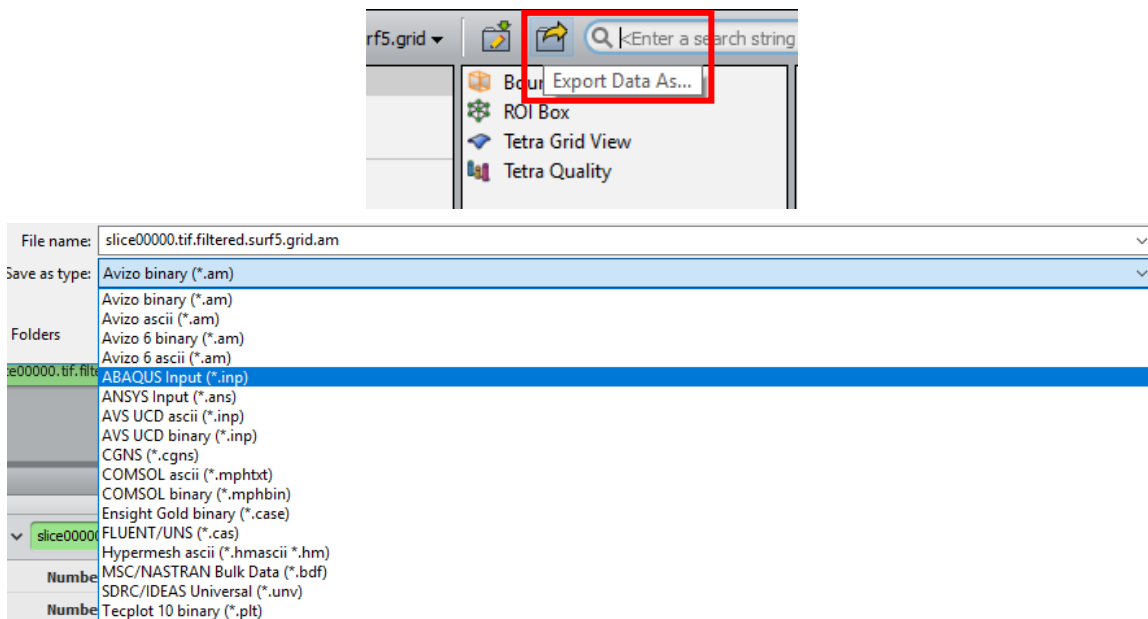


Figure 41 : Export du modèle pour Akantu

## 6. Dernière chose importante

Il est possible d'obtenir directement la taille du modèle ainsi que ses coordonnées max et min, ce qui sera utile au moment de la modélisation dans Akantu. Pour ce faire, cliquez simplement sur votre dernier objet, puis « Units Editor ». S'il n'est pas disponible, cliquez sur « Data Parameter Editor », qui donnera la même information, avec un formatage plus rustique.

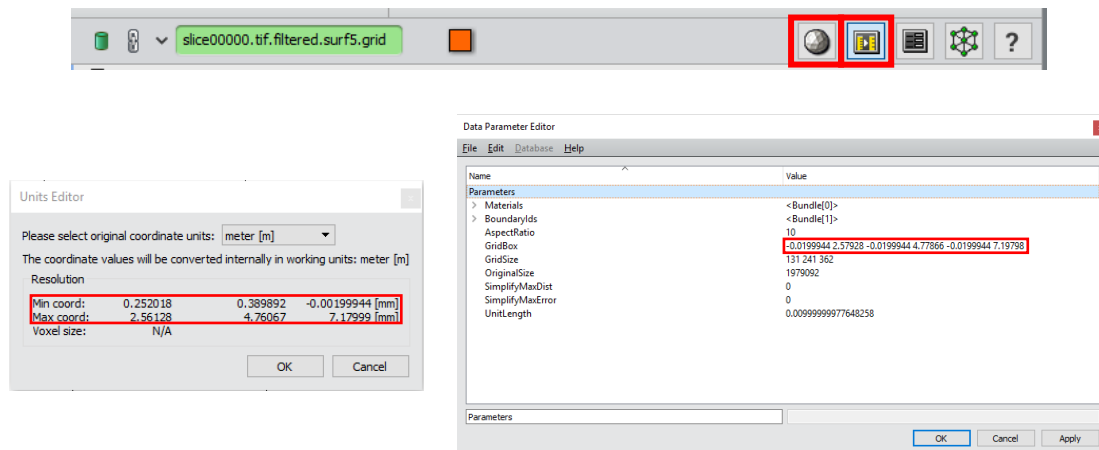


Figure 42 : Taille et position de l'objet final

### III. Essais de calcul simples sur un modèle sorti d'Avizo

#### 1. Caractéristiques de l'os

Les caractéristiques d'un os sont difficiles à déterminer et peuvent varier grandement en fonction de nombreux facteurs. Les facteurs principaux pour la variation des caractéristiques sont les suivants :

- L'espèce animale de laquelle l'os est extrait (Humain, vache, rat, etc...)
- L'âge (jeune, vieux)
- La santé (Maladie osseuse, niveaux de calcium (carence en calcium), etc...)
- L'os en lui-même (Fémur, tibia, etc...)
- Quel endroit de l'os (Cortical : partie dense sur l'extérieur de l'os, trabéculaire : partie poreuse à l'intérieur de l'os)
- Orientation de la prise de l'échantillon (Particulièrement pour l'os trabéculaire qui est très anisotrope)
- « Fraicheur » de l'échantillon et la manière avec laquelle il a été conservé. Les qualités mécaniques restent plus proche de la réalité si l'échantillon est conservé dans une solution spéciale qui garde l'os humide, et permet un résultat plus fidèle à la réalité. Si l'os n'est pas conservé dans cette solution, il devient plus fragile.

Les intervalles typiques pour les caractéristiques d'un os sont les suivants :

- Module de Young typique pour un os trabéculaire : Peut varier de 10 à 3000 MPa, ceci dépend de où l'échantillon est pris, ainsi que dans quelle direction (l'os trabéculaire est anisotrope)
- Déformation ultime : typiquement entre 1.0 et 2.5%
- Coefficient de poisson : peut varier entre 0.03 et 0.6.

Loi de comportement d'un os :

Extrait de « Standard handbook of biomedical engineering and design » :

« When trabecular bone is loaded in compression beyond its elastic range, unloaded, and reloaded, it displays loss of stiffness and development of permanent strains. In particular, it reloads with an initial modulus close to its intact Young's modulus but then quickly loses stiffness. The residual modulus is statistically similar to the perfect-damage modulus (a secant modulus from the origin to the point of unloading). In general, the reloading stress-strain curve tends to reload back toward the extrapolated envelope of the original curve. Phenomenological, trabecular bone therefore exhibits elements of both plasticity and damage.

[...] Minor stress relaxation has been shown to occur and depends on the applied strain level, indicating that the human trabecular bone is nonlinearly viscoelastic. » (Keaveny, Morgan and Yeh, 2004, p. 8.15)



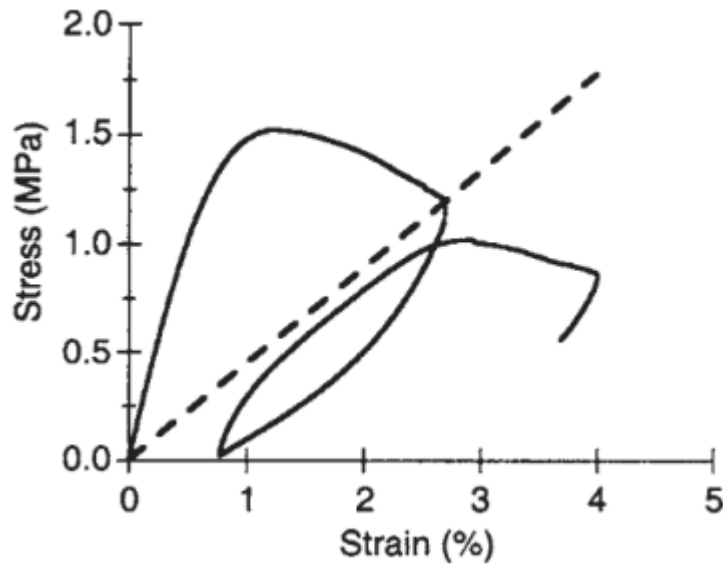


Figure 43 : Compressive load-unload-reload behavior of human vertebral trabecular bone.

Ceci est utile pour Akantu, qui demande une loi de comportement. Pour un os trabéculaire, il faut donc probablement choisir une loi viscoélastique.

*Note : Pour des essais dans le domaine du génie civil, les valeurs caractéristiques des matériaux sont beaucoup mieux connues et moins variables, donc la modélisation est simplifiée.*

## 2. Essai de traction sur un os en laboratoire

Dans le cadre d'un autre projet, des étudiants ont eu besoin d'effectuer un essai de traction dans le tomographe sur un échantillon d'os. Nous avons profité de ce test pour récupérer les informations d'effort et déformation, pour essayer d'approximer un module d'élasticité. J'ai tracé ci-dessous la courbe effort/déformation obtenue à partir des résultats de l'essai de traction, et ai approximé un module d'élasticité. L'essai a été effectué sur un échantillon d'os trabéculaire prélevé dans un fémur bovin. L'échantillon avait une taille de 30mm\*12mm\*6mm.

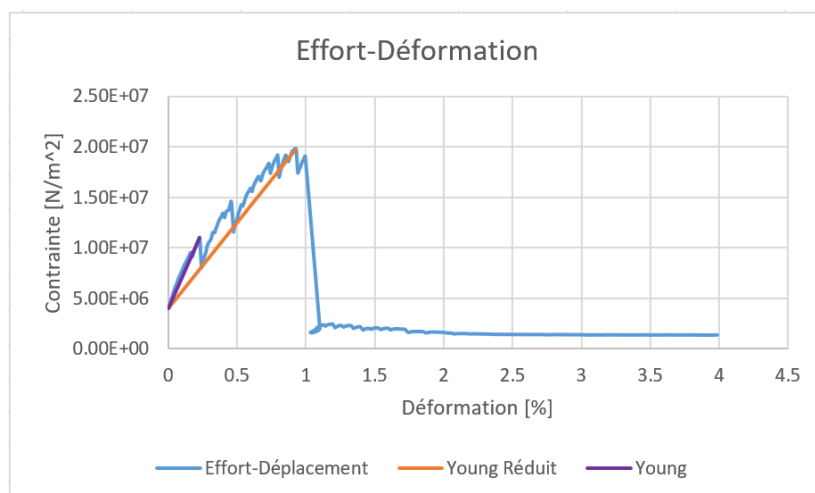


Figure 44 : Courbe effort/déplacement pour l'estimation du module d'élasticité d'un échantillon d'os

$$E_{\text{élastique}} = 3060 \text{ [MPa]}$$

$$E_{\text{Réduit}} = 1697 \text{ [MPa]}$$

Sur cette courbe, j'ai représenté le module de Young effectif. Après les calculs, l'échantillon d'os étant poreux, j'avais obtenu un module apparent, en le calculant avec la surface de l'échantillon. Pour arriver à un module effectif, j'ai utilisé matlab pour analyser les images provenant du tomographe, et pour trouver un rapport  $\frac{os}{os+vide}$ . En multipliant la surface pour le calcul de  $\sigma$  par cette valeur, j'ai trouvé le module effectif.

Pour trouver ce rapport, j'ai d'abord du binariser l'image provenant du tomographe, recadrer la partie d'intérêt pour ne pas avoir une lecture faussée provenant des encoches dans l'échantillon et enfin trouver le rapport de noir (vide) et blanc (os) dans l'image résultante. Le résultat final est une moyenne de ce rapport sur toutes les tranches.

$$\left(\frac{os}{os + vide}\right)_{tot} = \frac{\sum_i^n \left(\frac{os}{os + vide}\right)_i}{n} = 0.3424 = 34.2\% \text{ d'os}$$

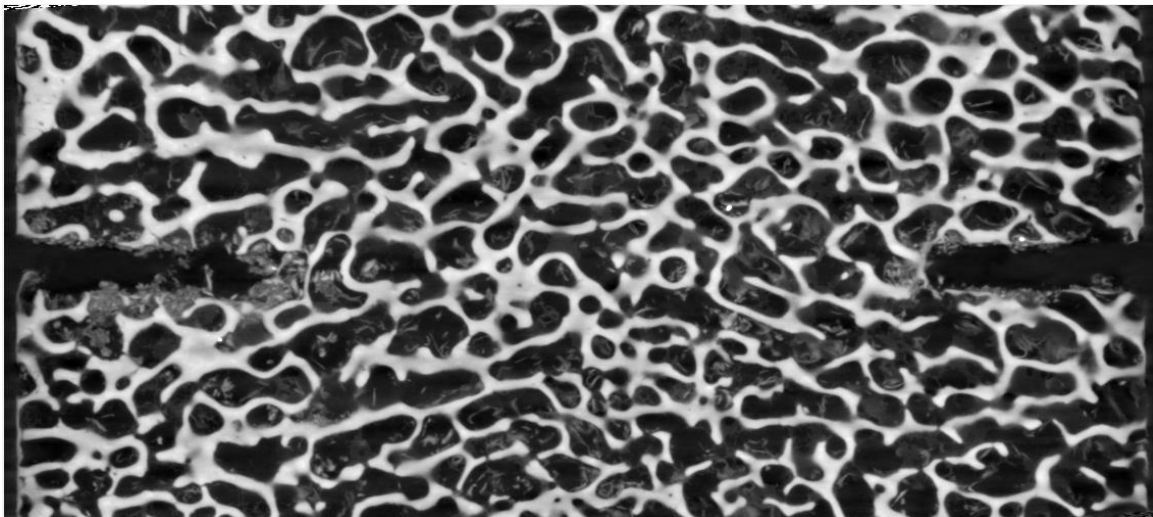


Figure 45 : Image d'une tranche telle qu'elle l'est à la sortie du tomographe

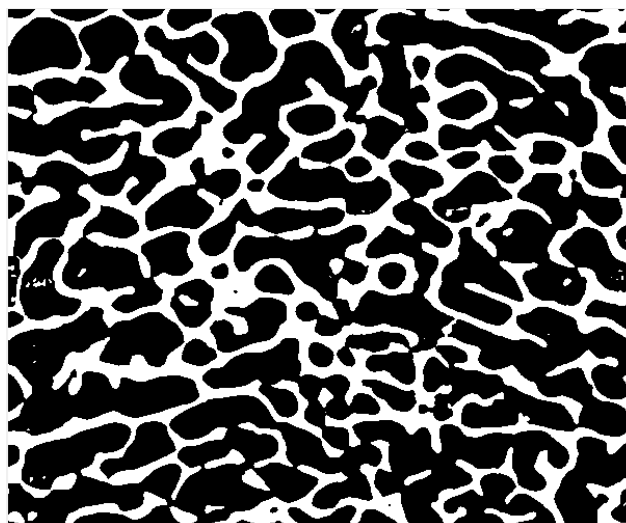


Figure 46 : Image d'une tranche après l'avoir coupée dans sa région d'intérêt et binarisée pour l'analyse avec matlab

### 3. Essai de traction simple avec Akantu

Pour ces calculs, les caractéristiques d'un os étant très variables, il a été nécessaire de prendre une décision. Comme le calcul est utilisé à la seule fin de vérifier que le modèle est bien viable et utilisable dans Akantu, les valeurs ont été posées arbitrairement à :

- $E^1 = 1000$  [MPa]
- $\nu = 0.25$

Et nous avons procédé à 6 essais de traction uniaxiale<sup>2</sup> :

- 3 étaient « Displacement controlled », avec une déformation de 1%, dans les directions x, y et z : en bloquant les coordonnées  $x_{min}$ ,  $y_{min}$  et  $z_{min}$ , respectivement, et en imposant la déformation à l'autre extrémité.
- 3 étaient « Force controlled », en plaçant une force de 1000 [N] sur chaque nœud à la surface y-z pour l'essai dans la direction x, x-z pour l'essai dans la direction y, x-y pour l'essai dans la direction z, et en bloquant les surfaces opposées respectives, de la même manière que pour le « displacement controlled ».

Avec les résultats obtenus, j'ai calculé les modules de Young, pour voir si l'ordre de grandeur est similaire, et si les deux séries d'essais donnent les mêmes valeurs. Pour ces calculs, je me suis servi de Paraview pour afficher les résultats provenant d'Akantu.

Pour extraire les valeurs de Paraview, j'ai effectué une coupe dans le modèle, très proche de la surface où les déplacements/forces sont imposés, comme suit :

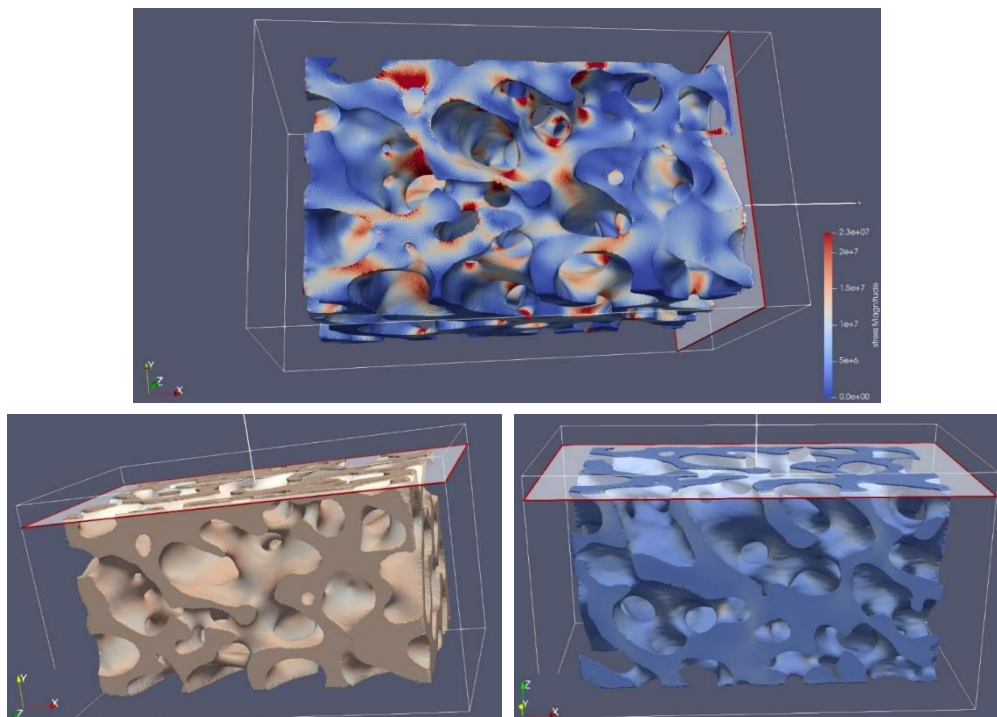


Figure 47 : Paraview - Coupes pour l'essai de traction en direction x, y et z, respectivement

<sup>1</sup> La valeur a été placée à 1000 [MPa] et pas à une des valeurs trouvées au chapitre (III. 2.) car j'ai corrigé cette valeur après que les calculs aient été fait avec Akantu. Avant cette correction, les valeurs étaient en dehors des intervalles proposés par Keaveny, Morgan and Yeh.

<sup>2</sup> Les calculs avec Akantu ont été faits par Thibault D. Roch, car réalisé proche de la fin du semestre, que je ne connais pas le logiciel et qu'ils ont été effectués pour illustrer que le modèle provenant d'Avizo fonctionne bien.

Paraview permet de représenter les surfaces coupées sous forme de tableau, avec les caractéristiques de chaque élément présent dans la coupe. J'ai utilisé ces données pour le calcul du module :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

a. Displacement controlled

On a posé  $\epsilon = 1\%$ . On peut lire directement  $\sigma$  dans le tableau de valeurs sorti de Paraview. Comme le tableau donne  $\sigma$  pour chaque élément de la surface, j'ai fait une moyenne de l'effort de tous les éléments de la surface pour pouvoir approximer le module d'élasticité.

$$E_x = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon}; \quad E_y = \frac{\sigma_{yy}}{\epsilon}; \quad E_z = \frac{\sigma_{zz}}{\epsilon}$$

Avec

$$\sigma_{xx} = \frac{\sum_i^n \sigma_{xx,i}}{n}; \quad \sigma_{yy} = \frac{\sum_i^n \sigma_{yy,i}}{n}; \quad \sigma_{zz} = \frac{\sum_i^n \sigma_{zz,i}}{n}$$

$n$  : Nombre d'éléments sur la surface considérée

Note : Dans Paraview,  $\sigma_{xx} = stress:0$  ;  $\sigma_{yy} = stress:4$  ;  $\sigma_{zz} = stress:8$

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Résultats de l'essai de traction "Displacement controlled"

Direction de l'essai	$\sigma = \sigma_{moy} [N/m^2]$	$\epsilon$	$E [MPa]$
x	5'167'250	0.01	516.7
y	3'631'414	0.01	363.1
z	3'852'499	0.01	385.2

### b. Force controlled

La méthode est un peu moins directe pour ce calcul. En effet, ici on a imposé une force sur tous les nœuds d'une surface, il faut donc regarder combien il y a de nœuds pour trouver la force imposée et la surface d'os dans la coupe pour trouver l'effort. Ceci vient directement du modèle et des paramètres de bases imposés pour le test. Il faut également trouver le déplacement de la coupe grâce à Paraview, qui va donner  $\Delta L$ , et la longueur de l'échantillon, qui est aussi une valeur fixe du modèle.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

#### Exemple pour le calcul de $E_x$ :<sup>3</sup>

Le nombre de nœuds avec une force imposée est donné au moment du calcul avec Akantu :

$$n_{noeud,x} = 9247$$

Force par élément :

$$F = 1000 [N]$$

Force totale :

$$F_{tot} = 9'247'000 [N]$$

Air de la partie osseuse (tirée de Paraview) :

$$A_{os} = 2.512 [m^2]$$

$\sigma_{xx}$

$$\sigma_{xx} = \frac{F_{tot}}{A_{os}} = 3.68 \cdot 10^6 [N/m^2]$$

$\Delta L_x$ <sup>4</sup>

$$\Delta L_x = \frac{\sum_i^n \Delta L_{x,i}}{n} = 0.035 [m]$$

$L_x$

$$L_x = 4.57 [m]$$

$\epsilon_{xx}$

$$\epsilon_{xx} = \frac{\Delta L_x}{L_x} = 7.77 \cdot 10^{-3}$$

$$E_x = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{xx}}$$

$$E_x = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{xx}} = 473,7 [MPa]$$

Les valeurs finales sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : Résultats de l'essai de traction "Force controlled"

Direction de l'essai	$\sigma = F_{tot}/A [N/m^2]$	$\epsilon = \epsilon_{moy}$	$E [MPa]$
x	$4.09 \cdot 10^6$	$7.77 \cdot 10^{-3}$	473,7
y	$2.36 \cdot 10^6$	$6.38 \cdot 10^{-3}$	321,1
z	$2.87 \cdot 10^6$	$7.54 \cdot 10^{-3}$	319,2

<sup>3</sup> Les dimensions sont en mètres car elles ont été rentrées dans Akantu en mètres, mais ça ne change pas la valeur du module d'élasticité

<sup>4</sup> Ici, n est le nombre d'éléments sur la surface considéré, pour pouvoir calculer le déplacement moyen de tous les éléments

Note 1 : Dans Paraview,  $\Delta L_{x,i} = \text{displacement}:0$  ;  $\Delta L_{y,i} = \text{displacement} : 1$  ;  
 $\Delta L_{z,i} = \text{displacement}:2$

Note 2 : La différence entre les valeurs en x et les valeurs en y et en z vient probablement du fait que la structure de l'os trabéculaire est très anisotrope. Il est aussi possible que, dû au fait qu'il s'agit d'un très petit échantillon, la structure n'est pas représentative du comportement global.

Les valeurs sont relativement similaires, les différences sont :

- $E_x$  : écart =  $\frac{E_{\text{déplacement}}}{E_{\text{force}}} = 1.09 \rightarrow -9\%$
- $E_y$  : écart = 1.13  $\rightarrow -13\%$
- $E_z$  : écart = 1.21  $\rightarrow -21\%$

Cependant, dû à l'écart entre les valeurs, il faudrait probablement faire encore d'autres tests pour vérifier les résultats.

### c. Analyse graphique

L'interprétation graphique des efforts dans le modèle n'est pas évidente, dû à la complexité de la structure. On peut néanmoins rapidement la regarder, pour voir si elle paraît correcte, et ce que l'on peut en dire.

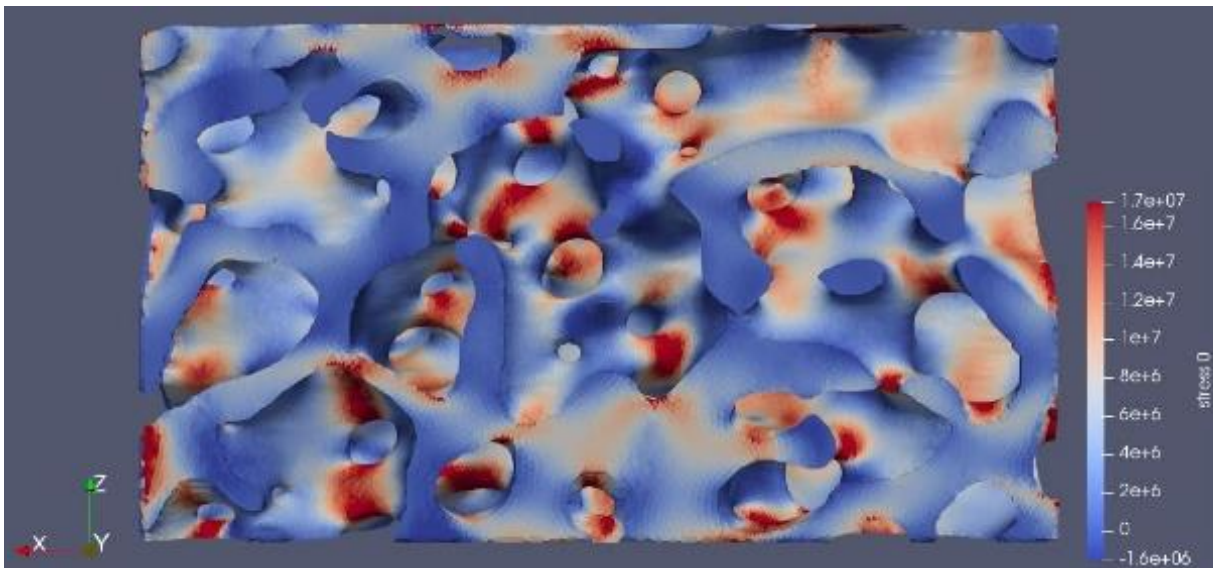


Figure 48 : Résultat graphique pour l'essai de traction dans la direction x, avec des déplacements imposés

On peut voir qu'il y a une concentration des contraintes aux endroits avec une plus petite section, dans le modèle. Ceci est parfaitement logique, vu qu'il y a une section plus petite et une force constante à transmettre à travers l'objet, l'effort doit être plus grand. On remarque également une concentration de contraintes proche des ouvertures, ainsi qu'une tendance similaire à un modèle bielles-et-tirants : une apparition de couples de forces traction-compression autour des ouvertures pour permettre de dévier les efforts. Ceci est également visible dans la figure suivante :



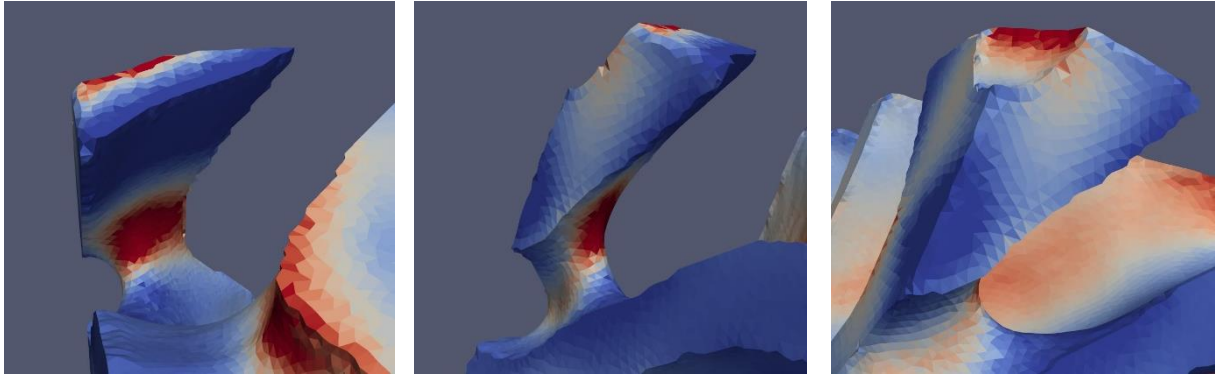


Figure 49 : Représentation de la déviation de l'effort

On remarque également une très forte concentration d'efforts dans des éléments très fins, de l'ordre d'un ou deux ordres de grandeurs plus grand qu'ailleurs dans le modèle. Ceci est dû au fait qu'il s'agit d'un modèle élastique qui ne permet pas la rupture. S'il s'agissait d'un essai réel, ce genre d'éléments se seraient endommagés rapidement.

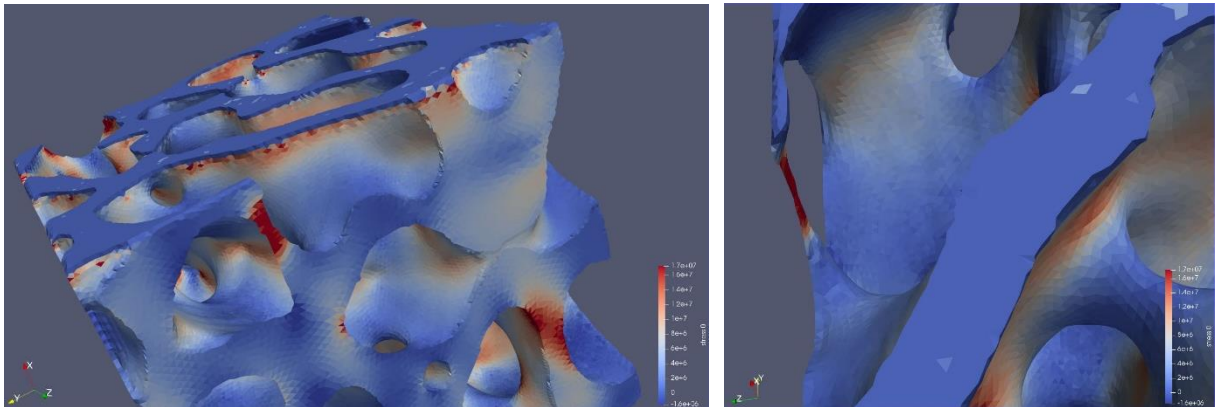


Figure 50 : Concentration d'effort dans les éléments fins

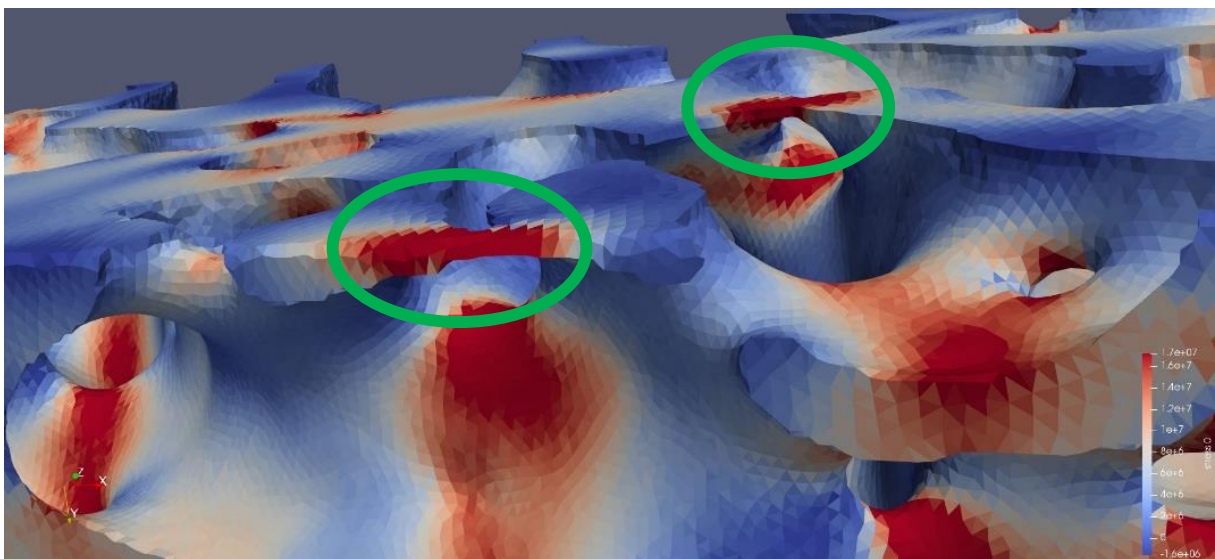


Figure 51 : Concentration d'efforts dans les éléments fins

## IV. Conclusion

L'addition d'un microtomographe à rayons X à l'EPFL permettra également d'aider le Laboratoire de Simulation en Mécanique des Solides. En effet, la création de modèles 3D à partir d'échantillons réels est grandement simplifiée et est rendue beaucoup plus rapide et efficace, grâce à ce nouvel instrument. La procédure expliquée ci-dessus permet de passer des images en coupe d'un spécimen provenant d'un tomographe, en format \*.tif, et de créer une structure en tétraèdres utilisable avec Akantu, en format \*.inp (ABAQUS Input), directement à partir du logiciel Avizo. Après quoi il est possible de faire des essais sur ce modèle, et de sortir des résultats qu'il est possible de comparer avec un échantillon existant.

Au final, la création d'un modèle n'est pas particulièrement difficile, une fois qu'on s'est familiarisé avec le logiciel. Il est possible d'arriver à une structure finale assez rapidement si on limite le nombre de triangles sur la surface initiale. Au-delà de 1 à 2 millions de triangles, l'opération devient laborieuse pour l'ordinateur. Pour un essai avec 5 millions de triangles, une des étapes avait duré plus de 4 jours. Il est donc important de réduire la taille du modèle si nécessaire et si possible, pour arriver à un résultat efficacement. Pour une structure peu complexe, une résolution de 30% par rapport à celle de base peut être suffisante. Si une plus grande résolution est nécessaire, il me semble judicieux de limiter la taille de l'échantillon pour avoir un résultat en un temps raisonnable.

J'ai pu effectuer quelques essais simples de traction uniaxiale à partir d'une portion d'un os qui a été scannée avec le microtomographe. Cet essai a servi à démontrer qu'il est effectivement possible d'utiliser le modèle et que la méthode peut être utilisée à nouveau, à d'autres fins, pour des travaux ultérieurs.



## V. Bibliographie

- Keaveny, Tony M., Elise F. Morgan, et Oscar C. Yeh. 2004. *Standard handbook of biomedical engineering and design*. The McGraw-Hill Companies.
- Ketcham, Richard A., et William D. Carlson. 2001. «Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery : applications to the geosciences.» *Computers & Geosciences* 27, 381-400.
- Konrad-Zuse-Zentrum. 1995-2017. *Avizo 9 - Avizo User's Guide*. Berlin: Informationstechnik Berlin (ZIB).
- Schoeman, L., P. Williams, A. Du Plessis, et M. Manley. 2016. «X-ray micro-computed tomography ( $\mu$ CT) for non destructive characterization of food microstructure.» *Trends in Food Science & Technology* 47, 10-24.

## VI. Images

- Figure 1, Figure 2 (gauche) : Ketcham, Richard A. and Carlson, William D.. 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences* 27, 381-400.
- Figure 2 (droite) : Schoeman, L., Williams, P., Du Plessis, A., Manley, M.. 2016. X-ray micro-computed tomography ( $\mu$ CT) for non-destructive characterization of food microstructure. *Trends in Food Science & Technology* 47: 10-24.
- Figure 43 : Keaveny, Tony M., Elise F. Morgan, et Oscar C. Yeh. 2004. *Standard handbook of biomedical engineering and design*. P. 8.15. The McGraw-Hill Companies
- Autres : Images personnelles et Screen shots d'Avizo, Matlab et Excel