

Optimisation de formes pour l'impression 3D

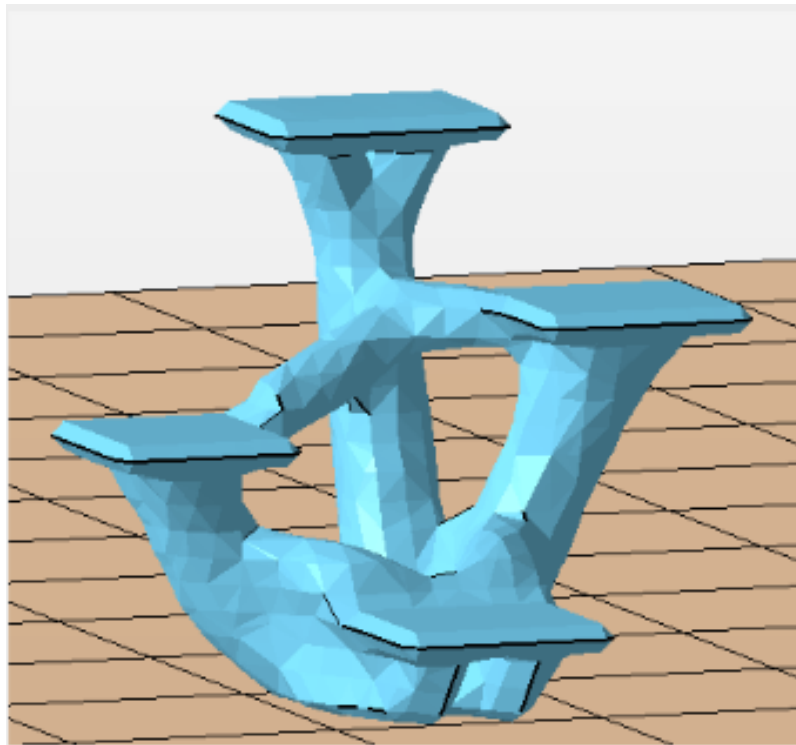


Table des matières

Table des matières	2
I. Optimisation topologique	3
A. Introduction :	3
Les types d'optimisation en mécanique	3
De la conception traditionnelle à l'optimisation topologique	4
B. L'optimisation topologique :	4
Topologie	4
Principe général	5
Pour l'impression 3D	5
C. Maillage et méthode des éléments finis :	5
Principe de la méthode	6
Les méthodes par champs de densité	6
D. Algorithme d'optimisation topologique :	7
II. L'optimisation topologique et l'impression 3D	9
A. Les techniques d'impressions 3D :	9
Aperçu de l'approche SIMP	9
Les limites de l'approche SIMP	10
B. Domaines d'application :	11
Aéronautique et automobile	11
Médical	13
Artistique	13
Architecture	14
III. Modélisation et impression :	15
A. Présentation des logiciels :	15
B. LayOpt :	16
Utilisation du logiciel	16
Création du modèle 3D	18
C. TopOpt3D :	24
Installation et lancement de l'application	24
Utilisation du logiciel	25
Création d'un pont	28
Visualisation du modèle 3D	29
Impression 3D	29
IV. Bibliographie :	30

I. Optimisation topologique

L'objectif clé de l'optimisation topologique est de trouver la forme optimale d'une structure qui équilibre la force et le poids, en allégeant la forme de la pièce sans affecter leurs performances

A partir d'une géométrie initiale d'une pièce, on vise à améliorer les performances de la pièce en jouant sur les paramètres physiques ou géométriques. L'optimisation topologique modifie la topologie initiale de la pièce pour atteindre ce but.

A. Introduction :

L'optimisation porte sur plusieurs "variables" qui sont ici la "forme", le "dimensionnement" ainsi que la "topologie" de la structure.

Dans un premier temps nous allons revenir sur ces "variables" en les définissant correctement et en présentant quelques exemples.

Puis, dans un second temps, nous allons présenter d'une manière plus approfondie le problème en expliquant, d'une part, pourquoi devoir optimiser sur plusieurs variables non indépendantes peut poser problème. D'autre part, nous développerons les méthodes permettant de faire ce type d'optimisation en présentant notamment quelques exemples à travers des applications concrètes.

Les types d'optimisation en mécanique

La conception de structures est généralement définie par ses dimensions, sa forme et sa topologie.

Dans ce contexte, trois types d'optimisation sont possibles:

1. **L'optimisation paramétrique** consiste à faire varier les paramètres tels que l'épaisseur et la longueur.
2. **L'optimisation de forme**, également appelée optimisation géométrique, permet de modifier la forme d'une structure. Par exemple, un volume limité sera plus efficacement rempli en sphère plutôt qu'en cube.
3. **L'optimisation topologique** autorise des modifications plus complexes de la structure, telles que l'ajout ou la suppression de trous ou d'éléments structurels. Cette méthode est plus flexible que les autres.

De la conception traditionnelle à l'optimisation topologique

Traditionnellement, les ingénieurs procédaient par des essais successifs de façon manuelle et ce en appliquant des charges sur une pièce déjà fabriquée et évaluant les endroits où elle faiblit. En cas d'échec à satisfaire aux critères mécaniques spécifiés, ils doivent repenser la conception et recommencer le processus, jusqu'à obtenir une pièce qui réponde aux contraintes exigées. Cette méthode est extrêmement coûteuse et imprécise.

Cette façon d'optimisation manuelle a été ensuite remplacée par des méthodes d'analyse de sensibilité qui sont utilisées pour optimiser la forme d'une structure.

La forme est représentée par un nombre limité de paramètres descriptifs, tels que des points de contrôle sur les bords, et la variation des performances de la structure par rapport à ces paramètres est analysée pour améliorer itérativement la forme initiale.

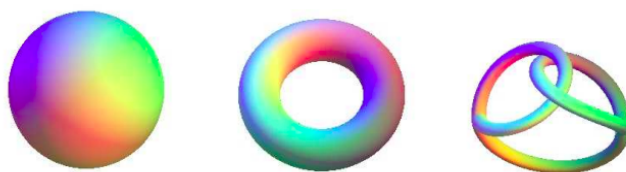
Cependant, l'efficacité du résultat dépend fortement de la façon dont la forme est représentée au départ et de la finesse de cette représentation. La méthode ne permet de varier la forme que par des modifications à sa frontière, sans changer sa topologie, ce qui peut limiter les gains de performance potentiels. De plus, cette méthode peut être très coûteuse en temps de calcul dans le cas où la forme s'écarte considérablement de la forme initiale.

Une autre méthode plus efficace est l'optimisation topologique par homogénéisation qui optimise automatiquement une structure sans restrictions sur sa topologie. L'optimisation topologique est une méthode qui inverse le processus classique et permet de concevoir une pièce en utilisant des données d'entrée constituées généralement de la charge et le volume limité, et en produisant en sortie une structure optimisée qui répond aux exigences de chargement spécifiées.

B. L'optimisation topologique :

Topologie

La topologie traite de la façon dont les objets peuvent être reliés les uns aux autres et des propriétés qui restent inchangées lorsque ces objets sont étirés, déformés ou pliés. Si à partir d'une forme initiale on effectue une déformation continue on considère que ces deux formes sont de même topologie.



En optimisation topologique, la topologie est utilisée pour concevoir et optimiser des objets en utilisant des critères tels que la résistance, la rigidité et le poids, en prenant en compte les propriétés topologiques telles que la continuité et la connexité.

Principe général

L'ingénieur commence par créer un modèle CAO, y appliquant les charges, contraintes et prenant en compte les paramètres du projet. Le logiciel élimine ensuite le matériau en excès pour générer un seul modèle de maillage optimisé que l'ingénieur peut examiner.

Pour l'impression 3D

L'optimisation topologique de structures pour l'impression 3D vise à utiliser des techniques mathématiques pour améliorer les propriétés physiques des objets imprimés en 3D, telles que la résistance, la rigidité, la conductivité thermique ou électrique, la densité, la perméabilité, etc. Cela permet de réduire les coûts, d'augmenter les performances et d'améliorer la fonctionnalité des objets imprimés.

Elle peut également être utilisée pour créer des structures poreuses ou des microstructures pour des applications telles que les implants médicaux ou les échangeurs de chaleur. En utilisant cette approche, les concepteurs peuvent concevoir des structures plus légères, plus résistantes et plus efficaces pour une utilisation spécifique, ce qui réduit les coûts de fabrication et améliore les performances des produits finis

C. Maillage et méthode des éléments finis :

En optimisation topologique, le maillage est une étape préliminaire utilisée pour discréditer l'objet sous forme de nœuds et de cellules connectées. Les nœuds représentent des points spécifiques sur l'objet, tandis que les cellules représentent les régions entre les nœuds. Cette structure discrète permet d'appliquer des algorithmes numériques pour concevoir et optimiser la forme de l'objet en modifiant la position et la connexion des nœuds.

Un maillage adaptatif surveille la forme de l'objet tout au long du processus d'optimisation et ajoute ou supprime des nœuds pour maintenir une répartition homogène des nœuds dans les zones où la forme de l'objet change rapidement. Par exemple, dans les zones où la forme change rapidement, un maillage adaptatif ajoutera plus de nœuds pour capturer les détails de la forme, ce qui peut améliorer la précision des résultats. Cela peut également réduire le temps de calcul et les erreurs liées à la représentation discrète de la forme de l'objet.

Les algorithmes de maillage sont souvent utilisés en combinaison avec des algorithmes d'optimisation pour trouver la forme optimale d'un objet en fonction des critères de conception souhaités.

Lors de l'optimisation topologique, la forme de l'objet est soumise à des contraintes mécaniques telles que des charges et des contraintes de déformation. La méthode des éléments finis permet de calculer la réponse de l'objet à ces contraintes en divisant la forme de l'objet en une série de petits éléments discrets connectés. Chaque élément est ensuite analysé séparément pour estimer les propriétés mécaniques de l'objet dans cette zone.

Chaque élément fini est associé à une équation mathématique qui décrit la distribution de la contrainte et de la déformation dans cet élément. Les équations pour chaque élément fini sont résolues simultanément pour produire une solution globale qui décrit les contraintes et les déformations à travers tout l'objet.

Le processus consiste à faire varier la topologie en modifiant la position et la connexion des nœuds, l'optimisation peut être répétée jusqu'à ce que la forme optimale soit trouvée.

Principe de la méthode

On commence par définir les critères de conception souhaités comme la force, la masse... ainsi qu'une fonction de densité qui permet de représenter la distribution de la masse dans l'objet d'étude. Une première étape consiste à discréditer l'objet en réalisant un maillage sur la forme initiale. Ensuite on résout le problème en utilisant la méthode des éléments fins par exemple qui permettra de calculer les forces et les contraintes exercées sur l'objet.

Rappelons qu'une forme est représentée, en chaque point, par une densité de matériau et par les propriétés mécaniques du composite. Le but ici est d'optimiser la fonction de densité afin d'atteindre les critères de conception souhaités cela en modifiant la position des nœuds. Une fois la mise à jour de la forme effectuée (en se basant sur les résultats de l'optimisation de la fonction de densité) on vérifie si les critères de conception sont valides ou pas. Ce processus est répété jusqu'à ce que les critères de conception soient satisfaits.

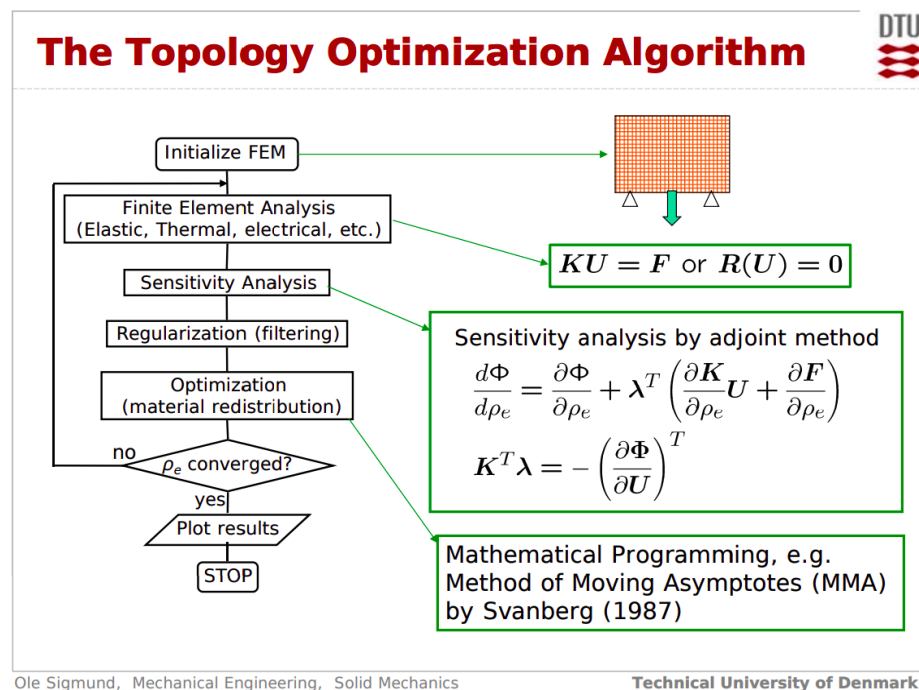
Les méthodes par champs de densité

L'approche de la densité en topologie d'optimisation consiste à déterminer la distribution optimale de la matière dans un domaine. Pour cela on utilise une variable de densité pour chaque point dans ce domaine. Cette variable de densité peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 1, ou:

- 0 représente un point est vide
- 1 représente un point plein de matière

Les valeurs de densité intermédiaire représentent des points partiellement remplis de matière. En utilisant des algorithmes d'optimisation, le but est de trouver la distribution optimale de densité qui minimise une fonction objective telle que le coût total ou la masse totale, tout en respectant des contraintes telles que les limites de résistance et de déformation. Cette approche permet donc de trouver des structures optimales plus légères et plus efficaces.

D. Algorithme d'optimisation topologique :



Les principales étapes de cet algorithme sont :

1. Une analyse par éléments finis : cette étape consiste à créer un modèle mathématique pour simuler les comportements mécaniques, élastiques, thermiques.. de la structure d'étude. L'initialisation FEM consiste à fixer les conditions initiales ; géométrie, conditions aux limites, les charges ...
2. Analyse de sensibilité : Cette analyse est effectuée pour déterminer les dépendances de la fonction objective par rapport à la densité de matière dans chaque point du domaine.
3. Régularisation : Le processus de régularisation (ou filtrage) permet de lisser la solution pour éviter les artefacts tels que les trous, les trous d'air, les bords déchiquetés...

4. Optimisation : L'étape d'optimisation consiste à utiliser les résultats de l'analyse de sensibilité pour redistribuer la matière dans le domaine en utilisant des algorithmes d'optimisation pour minimiser la fonction objective (telles que la méthode du gradient conjugué).

Après avoir redistribué la matière, l'analyse par éléments finis est réinitialisée pour déterminer les nouvelles propriétés de la structure. Le processus se poursuit jusqu'à ce que la solution soit convergée, c'est-à-dire qu'elle ne change plus de façon significative à chaque itération. A la fin, les résultats sont tracés pour visualiser la distribution optimale de la matière.

II. L'optimisation topologique et l'impression 3D

L'optimisation topologique est importante pour l'impression 3D car elle permet d'améliorer les propriétés mécaniques des pièces imprimées en 3D en réduisant le poids et en maximisant la résistance.

Cela se traduit par une réduction des coûts de production et une amélioration de la qualité des produits finis. De plus, l'optimisation topologique peut également permettre de minimiser les défauts d'impression et d'augmenter la vitesse d'impression en minimisant la quantité de matériaux utilisés.

A. Les techniques d'impressions 3D :

Aperçu de l'approche SIMP

L'approche SIMP (Stiffness-controlled Topology Optimization) est un processus d'optimisation topologique qui vise à optimiser la rigidité d'une pièce imprimée en 3D. La rigidité est un facteur clé pour les propriétés mécaniques des pièces imprimées en 3D, car elle détermine la capacité de la pièce à résister aux forces et aux charges. Le processus SIMP consiste en plusieurs étapes :

- 1) Définition des contraintes : Les contraintes pour la pièce, telles que les dimensions, les charges prévues, les contraintes géométriques, etc., sont définies en première.
- 2) Modélisation de la pièce : La pièce est modélisée en utilisant des logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) pour créer une représentation numérique de la pièce.
- 3) Simulation numérique : Une simulation numérique est effectuée pour déterminer la rigidité de la pièce dans sa forme actuelle en utilisant des logiciels de simulation FEA (Analyse par Éléments Finis).
- 4) Optimisation topologique : Des algorithmes d'optimisation topologique sont utilisés pour optimiser la conception de la pièce en maximisant la rigidité. Cela peut inclure la suppression de matériaux inutiles, la modification de la forme de la pièce et l'ajout de renforts supplémentaires.
- 5) La simulation numérique est répétée pour vérifier que la rigidité a été optimisée selon les contraintes définies. Si la rigidité n'a pas été optimisée, le processus d'optimisation topologique est répété jusqu'à ce que la pièce optimisée atteigne la rigidité souhaitée.
- 6) Exportation de la pièce optimisée : La pièce optimisée peut être exportée vers un fichier STL (Stereolithography) pour être utilisée dans des logiciels de CAO pour la production de la pièce imprimée en 3D.

L'approche SIMP peut être utilisée pour optimiser une variété de pièces imprimées en 3D, y compris les boîtiers, les composants mécaniques, les supports, les fixations et les structures. Cette approche peut aider à réduire les coûts de production, à améliorer les propriétés mécaniques des pièces et à réduire la quantité de matériaux nécessaire pour produire des pièces de qualité.

Les limites de l'approche SIMP

L'approche SIMP (Structural Optimization of Material Properties) pour l'impression 3D est une méthode de conception d'objets 3D qui optimise les propriétés structurelles en utilisant des algorithmes de simulation. Cependant, cette approche présente plusieurs limitations qui peuvent affecter la qualité et la précision des objets 3D imprimés.

Complexité algorithmique : L'optimisation des propriétés structurelles peut être un processus très complexe, notamment pour des objets 3D de grande taille ou avec des formes complexes. Les algorithmes de simulation utilisés dans l'approche SIMP peuvent prendre beaucoup de temps pour s'exécuter et produire des résultats fiables.

Précision limitée : En utilisant SIMP, les propriétés matérielles sont souvent simplifiées pour améliorer la rapidité de l'optimisation. Cependant, cette simplification peut entraîner une perte de précision dans la représentation des objets 3D, notamment dans les zones avec des formes complexes ou des transitions de densité importantes.

Restreint aux matériaux isotropes : SIMP ne peut être utilisé que pour des matériaux isotropes, c'est-à-dire des matériaux qui ont les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions. Cela peut limiter la qualité de la représentation des objets 3D, en particulier pour les matériaux qui ont des propriétés mécaniques anisotropes, telles que les fibres de renforcement.

Besoin de données d'entrée de haute qualité : Pour que SIMP soit efficace, il est nécessaire d'utiliser des données d'entrée de haute qualité, telles que des modèles de simulation fiables et des propriétés matérielles précises. Si les données d'entrée sont inexactes, cela peut entraîner des erreurs importantes dans les résultats de l'optimisation et affecter la qualité de l'objet imprimé.

B. Domaines d'application :

L'optimisation topologique peut être utilisée dans de nombreux domaines, le point commun entre l'ensemble de ces domaines pouvant parfois fortement être différents sur la forme et au premier abord est que dans chacun de ces domaines nous retrouvons la présence de matière, de forme sans laquelle quasiment rien ne pourrait être fait, créé.

La matière, sous n'importe quelle forme qu'elle puisse être, est donc l'une des pièces maîtresses de ces domaines, ce rôle bien spécifique et son importance amènent le fait que l'on puisse vouloir optimiser divers paramètres par rapport à celle-ci.

Un exemple simple serait par exemple de vouloir diminuer la quantité de métal dans l'aile d'un avion tout en gardant la résistance de celle-ci ainsi que d'autres de ses facteurs. On pourrait même supposer pouvoir augmenter ses critères tout en diminuant la matière, le fait de diminuer la quantité de matières peut, pour ne citer que cela, permettre de diminuer la consommation de kérosène de l'avion ou le prix de fabrication de celui-ci.

Ceci n'étant qu'un exemple de l'ensemble des possibilités offertes par l'optimisation topologique, nous allons par la suite donner plusieurs domaines dans lesquels cette optimisation est utilisée, de plus des exemples seront donnés afin de pouvoir visualiser de manière concrète les améliorations permises.

Aéronautique et automobile

Nous avons cité comme exemple précédemment le fait de pouvoir diminuer la quantité de métal dans un avion afin de pouvoir effectuer des économies ou réduire la consommation amenant sur une réduction de la pollution produite.

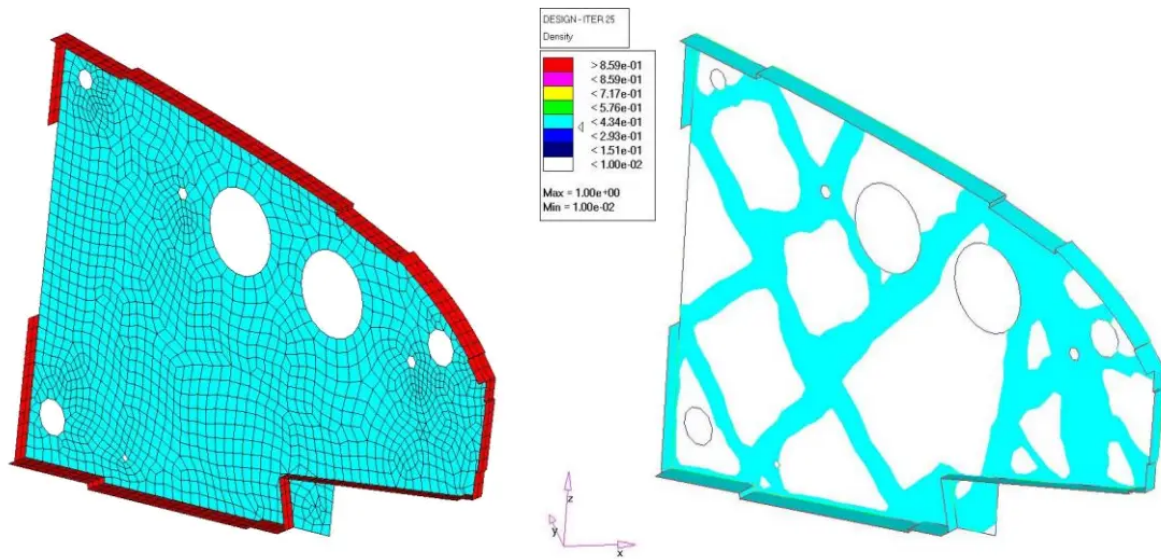
Désormais, penchons-nous sur un exemple concret dans le monde de l'aéronautique avec la modification de la composition d'une aile d'avion. Cependant, avant de pouvoir de présenter cet exemple, il faut savoir que d'un point de vue industriel, l'optimisation topologique est utilisée depuis une vingtaine d'années, depuis ses débuts dans les années 2000 de nombreux perfectionnements ont eu lieu.

En effet, lors de ses débuts nous ne pouvions l'utiliser que sur des objets de petite taille avec peu de détails et des formes simples, nous étions alors limités par les calculs trop coûteux ou parfois par la complexité du travail demandé.

C'est en octobre 2017 que des chercheurs danois publieront une méthode permettant d'optimiser des objets de taille bien plus grande avec des formes plus complexes. Pour citer un exemple de progrès ayant eu lieu il n'y a pas très longtemps, il y a le fait que l'on ne pouvait résoudre des modèles 3D possédant au plus cinq millions de voxels, un nouveau programme permet désormais de résoudre des modèles ayant jusqu'à un milliard de voxels.

Cette amélioration a permis la "découverte" de nouvelles formes qui sont malheureusement trop complexes pour pouvoir être créées, cependant de nombreux espoirs se reposent sur

l'imprimerie 3D qui offre de nouvelles possibilités un nouveau futur aux possibles formes que l'on peut créer.



(Optimisation topologique d'un composant de nervure de bord d'un Airbus A380)

En automatique nous retrouvons aussi cela afin pouvoir alléger les “supports” des véhicules et ainsi permettre un gain au niveau du rendement énergétique et de la puissance tout en gardant une certaine sécurité pour l'utilisateur avec entre autres la stabilité et la solidité de la carrosserie. Au niveau de la sécurité, nous pouvons aussi réussir à créer de nouvelles structures qui lorsqu'elles subissent un choc ont une certaine déformation afin de réduire les risques de possibles blessures. Par exemple, le groupe “AirBus” a présenté en 2016 un projet de cadre de moto imprimé en 3D.



(Cadre d'une moto obtenu à partir d'une optimisation topologique)

Médical

Les imprimantes 3D ont permis de faire de nombreuses avancées dans le domaine médical, la possibilité de pouvoir imprimer des pièces avec la forme que l'on souhaite a ouvert diverses portes avec l'arrivée de nouvelles prothèses par exemple.

L'optimisation topologique peut être utilisée pour améliorer des conceptions déjà existantes en ajoutant notamment des structures en treillis plus légères, ce qui permet par la suite d'obtenir une durée de vie plus longue pour l'implant et aussi, et surtout, une meilleure intégration à la partie du corps sur laquelle la partie se situe. On parlera alors d'ostéointégration pour décrire ce concept.

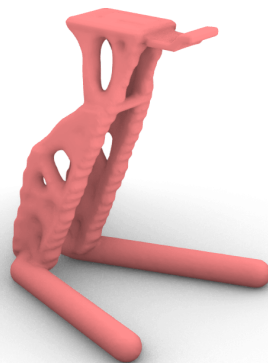
D'autres domaines du médical font aussi appel à l'optimisation topologique tels que les nanotechnologies que l'on peut retrouver au niveau de la manipulation des cellules, la chirurgie ou encore les systèmes optiques.

Artistique

L'optimisation topologique offrant de nouvelles formes complexes et innovantes tout en permettant de garder une résistance plus que correcte, nous retrouvons de plus en plus d'artistes ou de décorateurs l'utilisant afin d'offrir des formes inédites à des objets du quotidien.

Que cela soit pour un support de casque, un support de table ou encore des pavillons, l'ensemble de ces "constructions" ont pour la plupart des formes que l'on connaît tous, que l'on a déjà vu des centaines, des milliers de fois. Même si des architectes apportent la possibilité d'avoir de nouvelles formes innovantes, elles restent tout de même, dans la globalité, assez proches entre elles.

L'optimisation topologique a permis, comme nous avons pu le dire de nombreuses fois avant, d'obtenir de nouvelles formes complexes que l'on n'imaginait pas forcément. Par exemple nous avons le support de casque suivant :



(Support de casque obtenu grâce à l'optimisation topologique)

Lors de nos recherches nous avons trouvé le site suivant répertoriant de nombreux projets utilisant l'optimisation topologique sur des objets du quotidien :

https://parametrichouse.com/?s=topos&asl_active=1&p_asid=1&p_asl_data=cXRyYW5zbG F0ZV9sYW5nPTAmc2V0X2ludGI0bGU9Tm9uZSZzZXRfaW5jb250ZW50PU5vbmUmc2V0X 2luZXhjZXJwdD1Ob25lJnNldF9pbnBvc3RzPU5vbmU=

Finalement, nous avons pu nous rendre compte à travers ce site que même si cette optimisation est principalement dans des domaines industriels afin d'optimiser divers facteurs tels que les coûts de fabrication, la résistance ou l'élasticité. Elle peut aussi être utilisée dans bien d'autres domaines avec des applications plus ou moins directes, le domaine de l'art faisant bien sûr partie de ceux-ci. Les formes innovantes proposées par l'optimisation topologique pour des objets du quotidien ou simplement pour des œuvres permet d'ouvrir une nouvelle porte à l'art.

Nous pouvons voir cela comme une suite à ce que l'imprimerie 3D avait apporté à l'art, la combinaison de cela à l'optimisation topologique afin de pouvoir mettre en œuvre des formes que nous n'aurions pas pu autrement obtenir. C'est une nouvelle manière pour les artistes de s'exprimer.

Architecture

Le dernier domaine auquel nous allons nous intéresser dans cette partie est celui de l'architecture. Lorsque l'on parle d'optimisation de structure, nous pensons quasiment tous à l'architecture et plus particulièrement aux ponts, en effet, ceux-ci possèdent de nombreuses contraintes qu'il faut satisfaire afin de pouvoir offrir principalement une longévité dans le temps à la structure et surtout une résistance accrue aux différents phénomènes météorologiques.

Nous avons fait le choix de principalement présenter des exemples que nous avons obtenus en utilisant des logiciels permettant de générer des ponts à partir de divers paramètres comme la longueur de celui-ci, les forces appliquées ou les points de fixation entre celui-ci et le sol.

III. Modélisation et impression :

Nous avons pu découvrir ce qu'est l'optimisation topologique dans les parties précédentes et approfondir ce sujet en allant, d'une part, dans la théorie utilisée que cela soit avec les méthodes des éléments finis, le maillage ou encore les algorithmes utilisés. D'autre part, nous avons aussi pu découvrir des domaines totalement différents dans lesquels nous retrouvons diverses applications de l'optimisation topologique.

Une nouvelle étape est alors de créer des formes ou des objets, en deux dimensions ou en trois dimensions, pour cela nous allons utiliser des logiciels gratuits permettant de nous initier à l'optimisation topologique.

A. Présentation des logiciels :

Les logiciels que nous allons présenter dans cette section sont des logiciels gratuits permettant une initiation à l'optimisation topologique, étant donné qu'ils sont gratuits ils ne permettent pas de faire toutes les formes ou tous les objets possibles et inimaginables mais ils laissent tout de même une très grande liberté à l'utilisateur.

“LayOpt” et “TopOpt3D” sont deux logiciels qui ont été créés par le “TOPOPT GROUP” qui est une équipe de recherche se situant à l'Université Technique du Danemark (TDU) et plus précisément au département d'ingénierie mécanique. “TopOpt” étant une abréviation de “Topology Optimization”.

Cette équipe est notamment connue pour être leader mondial dans la recherche et le développement d'applications de méthodes d'optimisation topologique basées sur la densité.

Ce groupe travaille de manière conjointe avec le département de mécanique et le département d'informatique afin de pouvoir, comme nous l'avons dit juste avant, promouvoir de nouvelles extensions théoriques et des applications pratiques de méthode d'optimisation topologique.

Voyons maintenant comment utiliser ces deux logiciels afin de pouvoir obtenir des modélisations d'objets pour pouvoir par la suite les imprimer en 3D.

Un dernier point très important à savoir est que les deux logiciels que nous allons présenter et utiliser optimisent par rapport à des forces de “poids”, le but est alors d'avoir des objets résistants à des forces définies et étant les plus légers possibles.

Nous avons aussi utilisé les logiciels gratuits suivants :

- paint.net
- InkScape
- Blender
- MeshMixer
- Netfabb

B. LayOpt :

LayOpt est une application web interactive qui permet de trouver rapidement la disposition optimale d'une charpente à joints boulonnés.

L'objectif est de trouver le treillis de volume minimum qui peut transmettre un ensemble de charges à un ensemble de supports, en respectant une région spécifiée, le domaine de conception, qui peut être de n'importe quelle forme polygonale et peut inclure des zones interdites.

LayOpt utilise les principes de conception plastique pour trouver le treillis de volume minimum dans les cas impliquant un ou plusieurs cas de charges.

Utilisation du logiciel

Menu principal

Le menu principal permet de configurer un nouveau problème ou de sauvegarder ou charger un problème qui existe déjà.

Des exemples pré-construits sont également disponibles.

Les problèmes peuvent être sauvegardés sous forme de fichier .xm et partagés avec d'autres via un lien.

Il est possible de sauvegarder les solutions sous forme d'images, avec la possibilité de sélectionner le type d'image et de donner un nom de fichier personnalisé dans le menu.

La barre d'outils

Elle contient les outils qui permettent de dessiner un problème structurel sur la toile et d'obtenir la disposition optimale (volume minimum) de la treillis.

parmi les outils existant on a :

Modifier



L'outil de déplacement permet de déplacer des objets sur la toile.



L'outil de suppression supprime des objets de la toile

Grille






Le bouton afficher/masquer la grille permet de basculer la visibilité de la grille nodale.




Le curseur d'espacement de la grille modifie la résolution de la grille nodale.

Domaine




L'outil de suppression de domaine dessine un polygone qui définit le domaine de conception autorisé.

-  L'outil d'ajout de trou permet de créer des trous dans le domaine de conception.
-  L'outil d'ajout de sommet ajoute un nouveau sommet à un trou existant ou au domaine de conception.
-  Le curseur de rapport de contrainte contrôle les forces relatives en compression ou en tension du matériau utilisé dans la conception.



Charges

-  L'outil d'ajout de charge ajoute une charge ponctuelle à l'emplacement spécifié.


Supports

-  L'outil d'ajout de support d'extrémité ajoute un support dans les deux directions au point spécifié.
-  L'outil d'ajout de support de rouleau ajoute un support dans une direction au point spécifié.
-  L'outil d'ajout de support de ligne applique un support dans toutes les directions le long d'un bord du domaine de conception.

Résoudre

-  Le bouton de démarrage/pause de la résolution contrôle si le problème est automatiquement envoyé au solveur lorsque des modifications sont apportées.
-  Le curseur d'optimisation géométrique contrôle le nombre d'itérations d'optimisation géométrique qui seront utilisées.

Simplifier

-  Le curseur de simplification contrôle le pourcentage d'augmentation de volume autorisé pour produire une solution plus simple.

Nous avons élaboré cette documentation en nous appuyant sur le guide d'utilisation de l'application, qui contient toutes les informations mentionnées ci-dessus et bien plus encore. Le lien vers le guide est disponible ci-dessous :

<https://www.layopt.com/truss/>

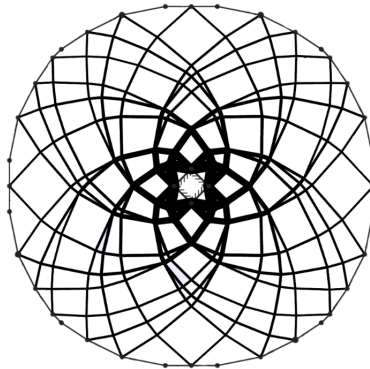
Création du modèle 3D

Une fois le modèle 2D créé il faut le transformer en un modèle 3D si l'on veut pouvoir l'imprimer en 3D, malheureusement nous ne pouvons exporter le modèle 2D qu'au format xml, svg, gif ou png.

Le format svg aurait pu être intéressant cependant le résultat ne l'est pas car nous n'obtenons que des courbes sans présence de matière où il faudrait, c'est pourquoi nous allons expliquer comment à partir d'une image au format png avoir un fichier obj à imprimer en 3D.

La première partie consiste à télécharger notre modèle au format png et de l'ouvrir dans un éditeur d'image tel que **Paint** afin de supprimer les couleurs de l'image et n'avoir que du noir et blanc.

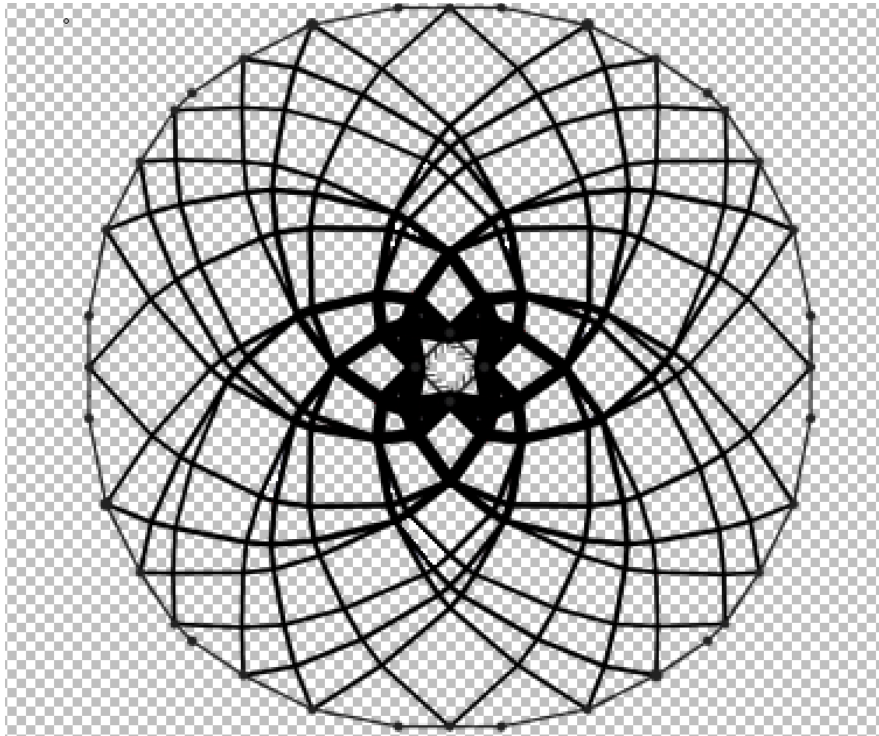
Par exemple nous obtenons cette image :



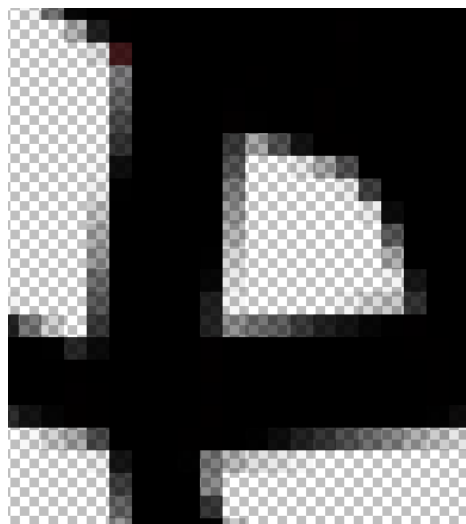
Une fois l'étape précédente effectuée il faut maintenant supprimer les zones blanches de notre image afin d'avoir du "vide" à la place, pour cela il est possible d'utiliser un site tel que le suivant : <https://www.remove.bg/>

Après avoir mis l'image sur le site nous récupérons la même sauf que cette fois-ci nous aurons bien des zones de "vide" tout autour des lignes noires. On récupère cette image afin de par la suite transformer l'ensemble des pixels qui ont une couleur entre le blanc et le noir comme un gris transparent, par exemple, en un pixel noir. L'idée est de n'avoir que des pixels blanc ou noir, aucune autre couleur.

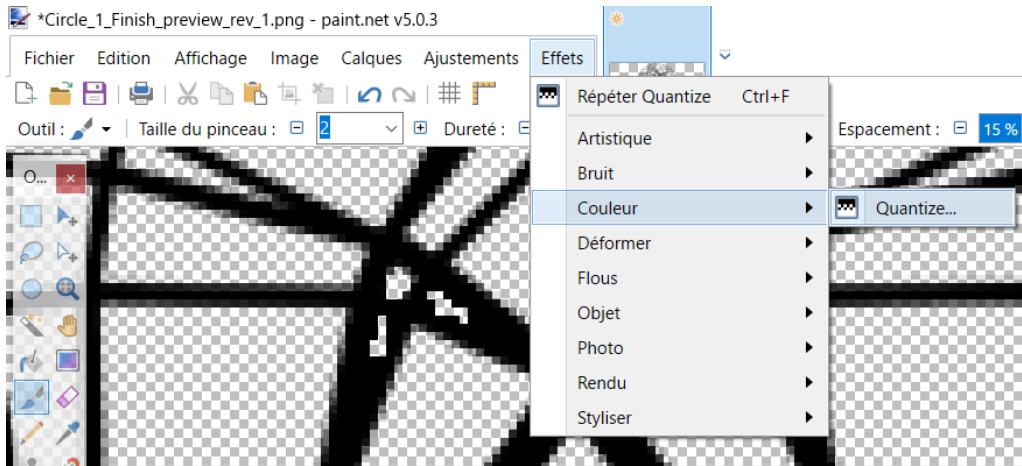
Pour faire cette opération nous avons utilisé le logiciel **Paint.Net**, une fois l'image chargée dans celui-ci nous obtenons :



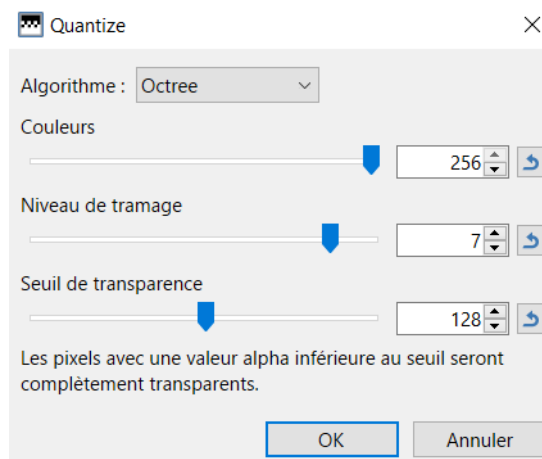
D'une part, nous voyons bien qu'il y a du vide tout autour des lignes noires, d'autre part, si l'on agrandit à n'importe quel endroit nous remarquons des pixels comme les suivants :



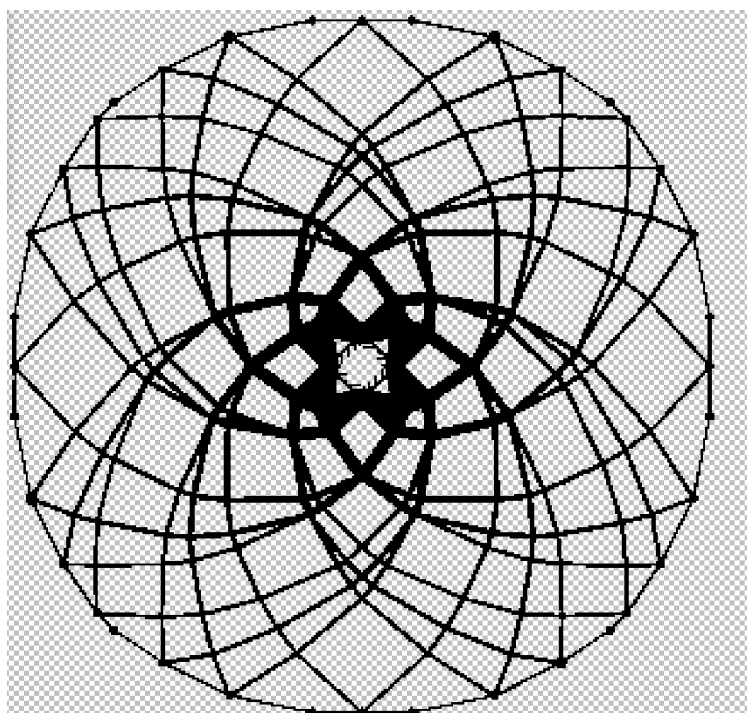
Nous voyons clairement des pixels qui ne sont pas noirs mais plus transparents, pour transformer ces pixels nous allons dans le menu Effet -> Couleur -> Quantize et nous paramétrons comme sur la photo ci-dessous.



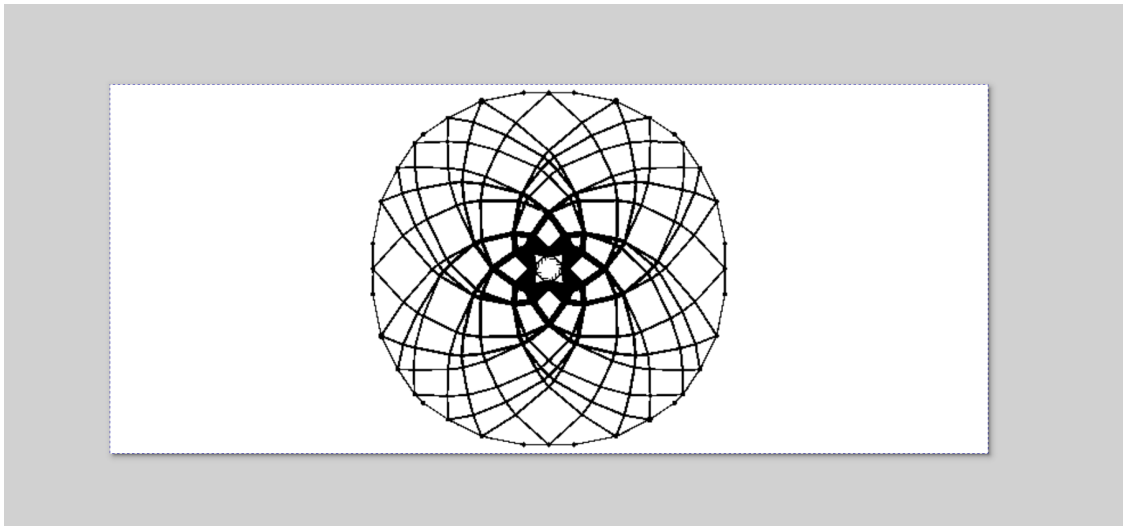
Paramètres pour Quantize :



Une fois avoir appuyé sur le bouton OK nous obtenons l'image suivante :

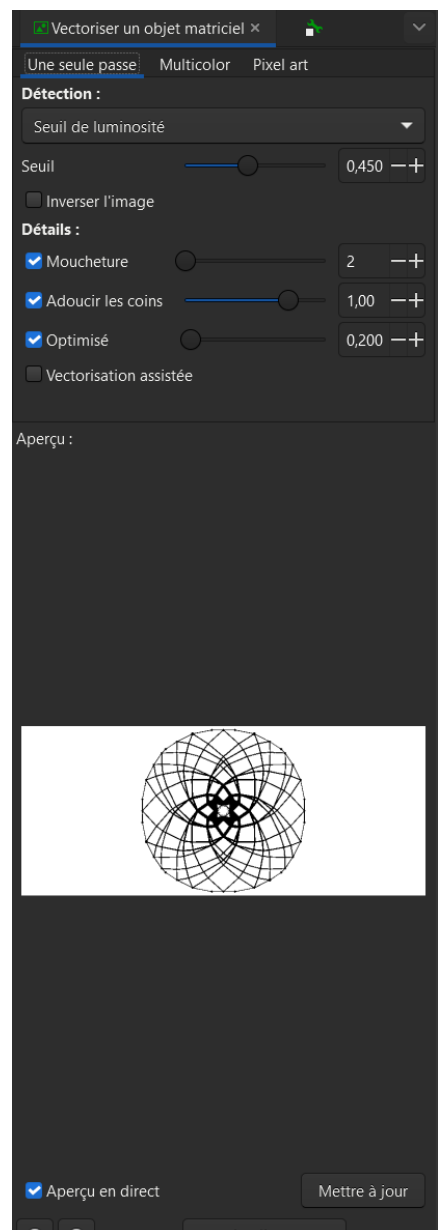


Il faut désormais vectoriser l'image pour pouvoir par la suite l'enregistrer au format svg, pour cela nous utilisons le logiciel **InkScape**, nous ouvrons l'image obtenue juste avant dans le logiciel et nous faisons une sélection avec la souris de l'ensemble de l'image ce qui donnera le rendu suivant :



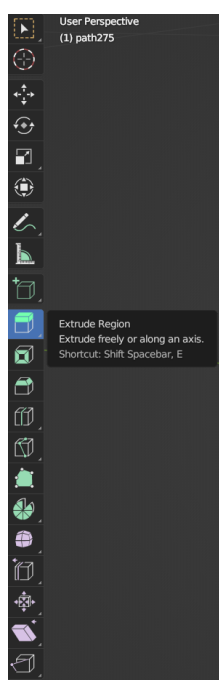
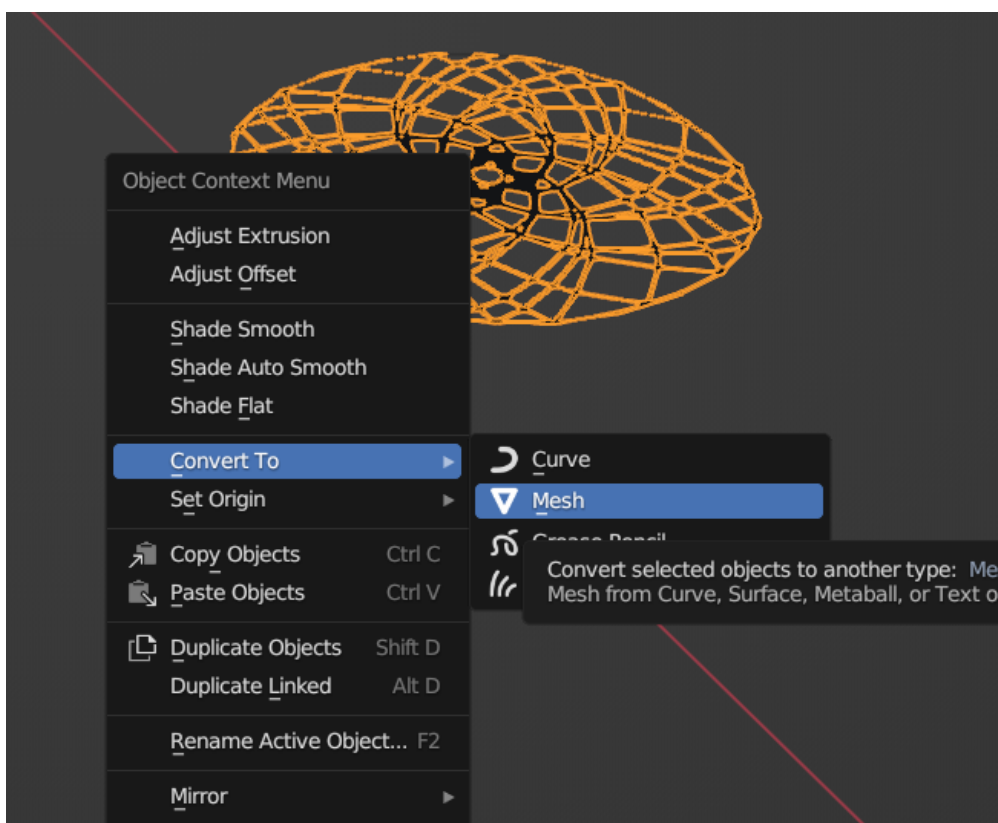
Il faudra faire un clic droit et choisir l'option Vectoriser un objet matriciel, une fenêtre apparaîtra sur la droite de l'écran, en choisissant les paramètres qu'il y a sur la photo suivante il ne devrait pas y avoir de problème lors de la vectorisation.

Il ne reste plus qu'à cliquer sur Appliquer et à enregistrer le résultat au format svg.



Pour la fin nous allons utiliser le logiciel Blender afin de transformer notre image en un modèle 3D, la première étape est d'ouvrir le logiciel, cliquez sur General dans New File et surtout de supprimer le cube qui apparaît à l'écran, normalement il est sélectionné il suffira d'appuyer sur la touche DEL du clavier ou sur la touche X pour l'effacer.

Nous pouvons, désormais, importer notre fichier svg, il est normal qu'une fois importé rien n'est changé à l'écran, il faut zoomer avec la molette jusqu'à voir notre forme. Après avoir fait un clique gauche pour la sélectionner il faut faire un clique droit et choisir Convert To -> Mesh.



Maintenant, nous pouvons appuyer sur la touche Tab du clavier pour avoir accès au menu de modification, appuyer sur la touche A pour sélectionner l'ensemble des éléments de la forme elle devrait apparaître totalement orange. Si c'est le cas, il faut ensuite choisir l'outil Extrude dans la barre à gauche comme sur la capture d'écran à gauche.

Un cercle devrait apparaître au dessus de notre forme comme le suivant :



Il suffit de faire un clique gauche sur le plus et de rester appuyer sur celui-ci, ensuite il faut bouger la souris, tout en maintenant le bouton de la souris, en poussant la souris vers l'avant la forme prendra de l'épaisseur, à vous de choisir l'épaisseur, relâchez le bouton et c'est bon.

Pour voir votre nouvel objet appuyez de nouveau sur TAB et il sera tout propre, il ne reste plus qu'à l'exporter au format obj, une manière de visualiser un fichier obj et d'utiliser **NetFabb** de AutoDesk disponible au lien suivant :

<https://www.autodesk.fr/products/netfabb/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Dans NetFabb il faut cliquer sur AddPart puis choisir le fichier obj afin de l'importer, si celui-ci est apparu puis a disparu il faudra cliquer sur Ctrl+Z afin qu'il apparaisse de nouveau. Maintenant il faut le déplacer, lui faire faire des rotations afin de pouvoir l'enregistrer de nouveau au format obj mais cette fois-ci sous une forme correcte pour par la suite l'imprimer en 3D.

C. TopOpt3D :

Installation et lancement de l'application

“TopOpt3D” est un logiciel qui comme “LayOpt” permet d’optimiser des objets en définissant des formes, des forces, des points d'accroche etc...





















La principale différence est qu’avec ce logiciel nous ne travaillons plus en deux dimensions mais bien en trois dimensions ce qui offre de nouvelles possibilités au niveau des objets que l’on optimise, des formes et des résultats obtenus.

L'impression 3D nous offre de plus la possibilité de créer ces objets et de pouvoir par exemple vérifier s'ils correspondent bien à nos attentes qui sont ici une légèreté et une résistance à des forces à certains endroits.

La première étape est l'installation du logiciel, pour cela il faut cliquer sur le lien ci-dessous amenant à la page d'accueil du logiciel sur le site du groupe “TopOpt”.

<https://www.topopt.mek.dtu.dk/apps-and-software/interactive-3d-topopt-app>

Une fois le logiciel installé nous pouvons le lancer, pour cela sous Windows il faut extraire le dossier téléchargé puis l'ouvrir ce qui donne :

 TopOpt3D_Data	13/04/2018 14:20	Dossier de fichiers	
 .DS_Store	13/04/2018 14:20	Fichier DS_STORE	7 Ko
 CAMD.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	23 Ko
 CCOLAMD.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	25 Ko
 CHOLMOD.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	546 Ko
 COLAMD.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	19 Ko
 libacml_dll.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	32 356 Ko
 libifcoremd.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	1 392 Ko
 libifportmd.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	295 Ko
 libmmd.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	3 327 Ko
 pgc.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	559 Ko
 pgf90.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	3 456 Ko
 pgf90_rpm1.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	9 Ko
 pgf90rtl.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	174 Ko
 pgf902.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	39 Ko
 pgftnrtl.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	197 Ko
 SparseMatrixLib.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	11 Ko
 svml_dispm.dll	27/02/2017 11:24	Extension de l'app...	5 969 Ko
 TopOpt3D	13/04/2018 14:20	Application	636 Ko
 UnityPlayer.dll	13/04/2018 14:20	Extension de l'app...	21 780 Ko

Finalement il reste à cliquer sur l'exécutable “TopOpt3D”, cela ouvre une application permettant de choisir les paramètres graphiques de l'application et il ne reste plus qu'à cliquer sur le bouton “Play !”.

Utilisation du logiciel

Ce logiciel est composé de trois menus, nous allons nous attarder sur chacun d'eux afin de comprendre les bases puis nous verrons comment faire un pont.

Le premier menu est "**File**", il permet de gérer les fichiers que nous utilisons dans l'application. Les diverses actions possibles sont les suivantes :

- **New** : Créer un nouveau modèle
- **Load** : Charger un modèle déjà existant, attention il faut un modèle au format ".TOPOPT3D"
- **Save** : Sauvegarder un modèle, enregistrer le modèle au format de l'application soit ".TOPOPT3D" et alors ce fichier nous permettra seulement de le charger de nouveau dans l'application
- **Export** : Sauvegarder le modèle 3D au format ".obj" ou ".stl" afin de l'utiliser dans d'autres applications, le format ".obj" est bien si l'on souhaite visualiser le modèle dans un autre logiciel ou même directement l'imprimer, il n'y aura pas de problème de format avec un fichier ".obj"
- **Config** : Configurer le domaine et le niveau de précision de l'optimisation et du modèle, pour modifier la taille du domaine du modèle il suffit de cliquer sur celui que nous voulons utiliser parmi les six disponibles.

Pour la précision il faut choisir au niveau de "Domain Size", attention si nous le modifions alors que nous avons un modèle alors le modèle sera perdu, lorsque l'on change ce paramètre le logiciel crée un nouveau modèle obligatoirement

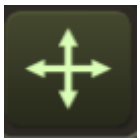


- **About, Info, Help** : Avoir des informations sur le logiciel

Le deuxième menu "**Primitives**" devient déjà plus intéressant si l'on veut modifier notre modèle, voici les actions qu'il propose :



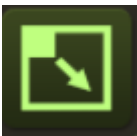
- **Ajouter** un objet au modèle, nous avons le choix entre un cube, une boule, un mur ou un modèle étant au format ".obj". Lorsque l'on ajoute un objet, celui-ci sera toujours placé au centre du domaine et nous aurons directement la possibilité de le déplacer



- **Déplacer** un élément du modèle, il faut cliquer une première fois sur l'icône puis cliquer sur l'élément que l'on souhaite déplacer. Alors trois flèches apparaîtront, une pour chaque direction du plan 3D, pour déplacer l'élément dans une direction il faut cliquer sur la flèche correspondante et déplacer le curseur



- **Orienter** un élément du modèle, comme pour le déplacement il faut d'abord cliquer sur l'icône puis sur l'élément, cette fois-ci nous aurons trois cercles qui vont apparaître correspondant aux orientations selon chaque axe, il faut cliquer sur le cercle puis déplacer le curseur pour effectuer la rotation



- **Modifier** la taille d'un élément, il faut cliquer sur l'icône puis choisir l'élément, alors trois cubes vont apparaître correspondant chacun, encore une fois, à chaque axe du plan, en cliquant sur l'un d'eux et en déplaçant le curseur la taille de l'élément selon l'axe choisi va augmenter ou diminuer

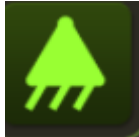


- **Supprimer** un élément, pour cela il faudra cliquer sur l'icône puis cliquer sur l'élément et celui-ci sera supprimé.

Le dernier menu "**Augment**" permet de gérer les éléments subissant une force, ceux servant de support, les éléments correspondant aux endroits avec forçément du vide etc...



- Ajouter une **force** sur un élément, il faut cliquer sur l'icône puis choisir l'élément et la force appliquée, il est possible de modifier la force, initialement celle-ci est à 1



- Définir un élément comme **support**, il faut cliquer sur l'icône puis choisir l'élément, cet élément servira de base "solide" lors de l'optimisation, on peut si l'on souhaite fixer ou non les directions du plan



- Définir un élément comme **vide**, il faut cliquer sur l'icône puis choisir l'élément, pour par exemple empêcher la solution d'avoir de la masse passant dans une zone



- Définir un élément comme **plein**, il faut cliquer sur l'icône puis choisir l'élément pour obliger la solution d'avoir de la masse dans une zone précise



- **Nettoyer** un élément, il faut cliquer sur l'icône puis choisir l'élément pour lui supprimer ses propriétés : force, support etc...



- Changer la **rotation d'une force** déjà présente, il faut cliquer sur l'icône puis choisir l'élément alors cela sera comme pour modifier la rotation d'un élément mais avec cette fois-ci une force

Pour se déplacer dans le plan il faut cliquer sur le cube en haut à droite et déplacer le curseur, il est aussi possible de cliquer sur une face du cube ou l'un des bords pour déplacer un tout petit.



Il est aussi possible de changer la quantité de matière utilisée pour l'optimisation en faisant varier le curseur en bas de l'écran en voyant directement le pourcentage de matière autorisée.

On peut afficher ou non le domaine en cliquant sur l'icône suivante :



Et il est aussi possible de modifier le type d'affichage pour le modèle en l'affichant de manière vide ou sous forme de voxels via l'icône suivante :



Finalement la dernière option possible est de modifier les symétries du modèle via l'icône à gauche cela permet par exemple de créer des ponts ou d'autres modèles, nous verrons cela dans la suite.

Afin de faire cette documentation nous nous sommes basés sur le guide utilisateur de l'application, ce guide regroupe l'ensemble des informations citées ci-dessus et d'autres encore, le lien de celui-ci se trouve ci-dessous :

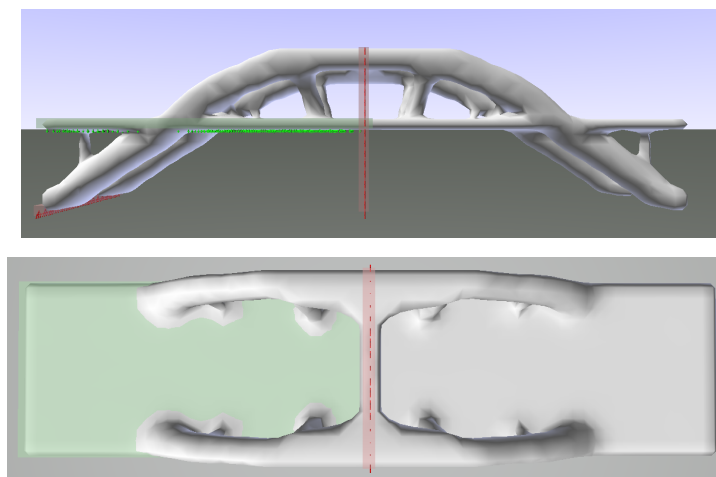
https://www.topopt.mek.dtu.dk/-/media/subsites/topopt/dokumenter/topopt3d_userguide.pdf?la=da&hash=0FDED71A9A1FBEA36BA040E3BB99350439A2373E

Création d'un pont

Une fois la plupart des outils, fournis par cette application, maîtrisés nous allons pouvoir voir comment créer un pont, pour cela nous allons tout simplement reprendre le tutoriel que l'on trouve dans le guide utilisateur de l'application. Cet exemple sert surtout de base pour pouvoir créer ce que l'on souhaite par la suite, il faut tester de nombreuses choses si l'on souhaite "maîtriser" l'application et surtout obtenir des résultats correspondant à nos attentes.

On peut voir cela comme de la recherche, nous savons que nous voulons par exemple un pont avec une forme se basant sur des ponts déjà existants, nous allons alors reprendre la base permettant de faire un pont puis modifier les supports et les forces afin d'essayer d'obtenir une forme plus ou moins correspondante au pont déjà existant.

Ci-dessous nous pouvons trouver un exemple de pont que nous pouvons obtenir en utilisant le guide :



Visualisation du modèle 3D

Pour la visualisation du modèle nous avons utilisé le logiciel **NetFabb** de Autodesk :

<https://www.autodesk.fr/products/netfabb/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Il est possible d'obtenir une version gratuite en cliquant sur le lien ci-dessus puis télécharger une version d'évaluation gratuite et de choisir enseignement. Une fois le formulaire rempli nous pouvons télécharger et installer le logiciel, pour visualiser notre modèle 3D il suffit de cliquer sur l'icône pour ajouter un élément et de choisir le fichier correspondant au modèle.

Impression 3D

Pour l'impression 3D il est nécessaire d'avoir des fichiers au format ".obj", ceci est facilement faisable en exportant le modèle à partir de TopOpt3D. Maintenant il faut faire attention à un point avant d'envoyer le fichier pour impression.

Lorsque nous allons imprimer le modèle, il faut que celui-ci est une base permettant à l'imprimante lors de l'impression d'avoir aussi une surface sur laquelle commençait et étant un minimum plate. En effet, l'imprimante peut rencontrer des problèmes d'impression si le modèle possède des formes trop complexes avec notamment des zones dans le "vide".

C'est pourquoi il faut une surface droite permettant à l'imprimante de commencer à partir de celle-ci puis de pouvoir partir sur le reste du modèle.

Découlant directement de ce problème, il faut aussi faire attention à l'orientation dans laquelle le modèle se trouve dans le fichier. Lorsque l'on exporte le modèle à partir de TopOpt3D il se peut que l'on ait un modèle qui ne soit pas dans la même orientation que l'application. Par exemple, pour le pont que l'on a construit, dans l'application il est bien dans le bon sens mais lors de l'export au format ".obj" puis de l'ouverture du fichier dans un logiciel de 3D le pont était couché sur le côté. Ce qui est alors problématique pour l'impression car la base du modèle n'est alors pas une surface droite.

IV. Bibliographie :

<https://formlabs.com/fr/blog/optimisation-topologique/>

<https://metalblog.ctif.com/2021/07/19/loptimisation-topologique-pour-accelerer-la-conception-des-pieces/>

https://www.topopt.mek.dtu.dk/-/media/subsites/topopt/dokumenter/topopt3d_userguide.pdf?la=da&hash=0FDED71A9A1FBEA36BA040E3BB99350439A2373E

<https://www.layopt.com/>

<https://www.cao.fr/rubrique-toutes/actu/7377/Une-prothese-cranienne-en-titane-concue-avec-VISI-CFAO.html>

<https://hal.science/tel-03707088/>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029613005014>

https://www.researchgate.net/figure/Prototype-A-topology-optimization-of-a-slab-with-three-supports_fig1_327793571

<https://sixfoot-four.com/topology-optimization-generative-design/>

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/10977/10977-203-p18.pdf>

http://www.cmap.polytechnique.fr/~allaire/cray_plaq.html

<https://www.ceremade.dauphine.fr/~cohen/GDR05/28jun05/PresGAllaire.pdf>

http://www.cmap.polytechnique.fr/~allaire/cray_plaq.html

<https://formlabs.com/fr/blog/optimisation-topologique/>

<https://hal.science/tel-02063761v2/document>