

École polytechnique de Louvain

Contributions of Generative Design tools to Mechanical Design

Author: **Sébastien SCHRURS**
Supervisor: **Bruno DEHEZ**
Readers: **François HEREMANS, Benoît RAUCENT, Aude SIMAR**
Academic year 2020–2021
Master [120] in Mechanical Engineering

Acknowledgements

I would like to thank the following people, without which this master thesis would not have been possible :

First of all, my supervisor Mr. Bruno Dehez, first of all for having accepted to supervise my personal thesis topic, but also for having offered me his time throughout the year with enthusiasm and consideration.

Mr. François Heremans for giving me his time and energy to discuss the technical aspects of his exciting PhD thesis topic.

Mrs. Aude Simar and Mrs. Camille van der Rest for their availability and their expert advice concerning metal additive manufacturing.

Mr. Thomas Servais for having taken his time to share with me his professional experience as a mechanical engineer, as well as his vision of technologies on mechanical design.

Mr. Vincent Musette, technician at iMMC, for having judiciously shared his expertise on machining techniques with me.

My parents and my two brothers for their presence and unconditional support throughout this year.

My uncle for the inspiration and advice, without which many things would have been less easy.

And finally, but not least, thanks to all my friends who helped me in the realization of this work.

Abstract

Mechanical design and manufacturing methods are adapting to the tools available. In recent years, technological progress has allowed engineers and designers to arm themselves with both new manufacturing techniques and new shape optimization methods.

First of all, this work describes what generative design is: a new type of mechanical optimization method that has appeared in the last few years, which uses the computational power of computers to reproduce evolution as observed in living beings.

These new methods call for modifications to the classic mechanical design process as we know it today and require profound changes in the organization of the companies that embrace them. However, this new way of designing shapes promises very interesting gains in time and performance.

After clarifying the general idea of the concept and giving some concrete examples, this thesis describes a practical case study in which an optimization study using generative design was conducted. The subject of the case study is the optimization of the mass of a part of the ELSA prosthesis, an active ankle prosthesis developed at the UCLouvain for lower limb amputees.

Finally, a critique of the different results is made, with a perspective of the contributions observed during the studies.

CONTENTS

1	Introduction.....	2
1.1	Contexte.....	2
1.2	Plan du mémoire	3
2	Etat de l'art.....	4
2.1	Explications du concept général.....	4
2.2	Objectif principal : imiter la nature.	5
2.3	Méthodologie classique de conception ingénieure.	8
2.4	Solution apportée par le design génératif.....	11
2.5	Exemples d'applications pratiques.....	13
3	Cas d'application de design génératif	15
3.1	Contexte du cas d'étude : prothèse ELSA.....	15
3.2	Choix du software de design génératif.....	18
3.3	Description de Fusion 360	20
3.4	Paramètres de base de notre étude.....	22
3.4.1	Simplification de la structure et modélisation dans Fusion 360.....	22
3.4.2	Modélisation des charges pour le cas de base.....	23
3.4.3	Modélisation des contraintes pour le cas de base.....	24
3.5	Résultats obtenus par design génératif pour le cas de base.....	25
3.5.1	Détermination des derniers paramètres.....	25
3.5.2	Résultats	26
3.5.3	Discussions	27
3.5.4	Validation numérique.....	28
3.5.5	Discussion des résultats	28
3.6	Démonstration de l'influence de différents paramètres sur le design obtenu	28
3.7	Discussions.....	28
3.7.1	Limitations.....	28
3.7.2	Avantages	29
3.7.3	Prix.....	29
3.8	Conclusions.....	29

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Sujet/mot/dénomination très à la mode en ce moment dans le monde du design ingénieur, le design génératif apparaît dans de plus en plus de discussions de conception mécanique.

Il est vrai que les méthodologies de conception ingénieure n'ont pas vraiment changé depuis la révolution industrielle. Nous utilisons certes l'ordinateur et les systèmes informatiques afin de visualiser plus facilement certaines formes, mieux échanger les informations et fichiers, ainsi que pour les simulations. Mais tout l'aspect créatif est resté dans les mains –ou plutôt dans la tête- des concepteurs.

Afin de continuer notre progression exponentielle, nous devrions probablement nous résoudre à revoir nos méthodes de fonctionner, et à déléguer ces étapes-là aux systèmes informatiques.

Le but premier de ce travail est de définir ce en quoi le design génératif consiste, en tout cas tel qu'il existe aujourd'hui. Les bibliothèques de l'EPL n'ayant pas encore beaucoup d'information concernant le design génératif, ce mémoire aura donc comme ambition principale d'en donner une explication, du moins tel qu'il existe aujourd'hui.

Secondement, l'idée globale sera d'évaluer l'intérêt de ces méthodes et de tenter de percevoir les différentes possibilités que cela pourrait nous offrir dans le futur. Pour ce faire, une mise en application nous permettra d'avoir un exemple pratique de mise en œuvre d'un de ces programmes, et d'ensuite discuter ces résultats avec ceux obtenus initialement via des méthodes plus classiques.

Quand bien même la technologie n'en est qu'à ses débuts, il semble pertinent de critiquer les promesses que l'on nous fait avec elle.

--- Idées intro :

Les méthodes de conception et de fabrication mécaniques s'adaptent aux outils disponibles. Ces dernières années, la progression technologique a permis aux ingénieurs et concepteurs de s'armer à la fois de nouvelles techniques de fabrication, mais aussi de nouvelles méthodes d'optimisation de formes. Ainsi, grâce à la fabrication additive, le champ des formes que l'on peut produire s'élargit et se démocratise considérablement. Il est dès lors envisageable d'utiliser des méthodes d'optimisation de la matière de façon plus libre, car nous sommes beaucoup moins limités par des contraintes liées aux techniques de fabrication.

Le design génératif est un nouveau type de méthode de conception mécanique, qui se base sur les puissances de calculs des ordinateurs pour reproduire l'évolution telle que l'on peut

l'observer chez les êtres vivants. Bien que théorisé depuis plus longtemps, le design génératif commence finalement à être mis en application depuis environ le milieu des années 2010.

Ces nouvelles méthodes génératives chamboulent toute l'organisation classique de la conception mécanique en introduisant l'apport des ordinateurs beaucoup plus tôt dans le processus de conception.

1.2 PLAN DU MÉMOIRE

Ce travail se composera de plusieurs parties. A la suite de cette introduction, le premier chapitre traitera de donner une définition la plus complète possible de l'idée derrière le design génératif lui-même.

Le deuxième chapitre parlera du

...

Et finalement, la conclusion clôturera le mémoire en donnant

2 ETAT DE L'ART

2.1 EXPLICATIONS DU CONCEPT GENERAL

Avant toute chose, nous allons tenter de clarifier ce que l'on veut dire par "design génératif", et d'expliquer en quoi cela consiste.

Le design génératif est un ensemble de nouveaux moyens technologiques ayant pour but d'augmenter l'automatisation des processus de design ingénieurs, en incorporant davantage l'ordinateur dans des étapes qui étaient encore jusqu'à présent quasi exclusivement gérées par le cerveau humain.

Le principe principal est le suivant : S'aider des moyens technologiques actuellement à notre disposition pour tenter d'approcher les méthodes d'optimisation de la nature, autrement dit reproduire l'évolution du vivant.

Jusqu'à présent, les ingénieurs ont été limités à envisager des formes très simples à cause des outils disponibles. Même s'il était avéré que certaines formes moins régulières étaient plus judicieuses, la facilité de fabrication a toujours primé avant tout, car fabriquer une forme plus complexe allait demander un investissement en temps et en énergie considérablement plus important. Cela est particulièrement vrai dans le monde de l'industrie, où il s'agit de fabriquer de grandes quantités de pièces.

Cependant, ces dernières années, de grandes avancées ont été menées dans les méthodes de fabrication mécanique, permettant maintenant d'envisager la production de formes beaucoup plus complexes à des prix de plus en plus compétitifs. Notamment l'impression 3D qui ne cesse de progresser et qui permet de produire des formes très complexes beaucoup rapidement qu'avant, de façon automatisée, et avec des niveaux de précision de plus en plus élevés.

Des possibilités de fabrication quasi illimités dans les formes étant à présent disponibles, nous pouvons alors regarder du côté des moyens de générer ces formes optimales.

Grossièrement, la façon actuelle de concevoir une pièce optimisée est la suivante : Une première ébauche de la pièce est dessinée par le concepteur, selon son inspiration et son expérience personnelle. Il la modélise ensuite dans un software de CAD (computer-aided design) et lance un programme d'optimisation qui va simuler les efforts présents dans la pièce selon un certain cas de charge par exemple. En très bref, cette simulation renseignera l'utilisateur sur les zones qui ne subissent pas ou très peu d'effort mécanique, signifiant que nous pouvons alors librement enlever de la matière à ces endroits-là sans modifier le fonctionnement général de la pièce dans cette situation donnée. Ces méthodes mathématiques d'optimisation s'appellent "optimisation topologique", et sont déjà présentes dans la plupart des softwares de CAD. Pour information, nous n'explorerons pas ces méthodes dans le cadre de ce mémoire, car elles sont déjà bien définies et développées dans de nombreux autres travaux. (REF?) Dès lors, nous les considérerons comme connues pour la suite.

En opposition à cette “optimisation par soustraction”, le design génératif propose une optimisation par addition. Conceptuellement, l’idée est de ne plus optimiser à partir d’une pièce préalable, mais plutôt de la concevoir directement de manière optimisée sans avoir à encore en retirer de la matière par la suite. Autrement dit, de ne rajouter de la matière que là où nous en avons besoin, un peu comme les organismes vivants le font dans la nature.

En pratique, le design génératif consiste en un système dans lequel l’utilisateur vient définir le volume limite d’une pièce, ainsi que les contraintes et les charges qui s’appliquent à lui. Le système va alors “générer” (d’où son nom) selon des algorithmes bien précis des dizaines, centaines, voire des milliers de résultats différents satisfaisant à ces paramètres d’entrée. Cette multitude de résultats sera ensuite disponible à l’utilisateur, qui pourra les trier ou les classer selon divers critères permis par le système (par exemple masse, déformation, coût de fabrication), pour finalement choisir la solution qui lui semble la plus adaptée à ses besoins.

La génération d’un aussi grand nombre de solutions différentes demande des forces de calculs considérables, surtout si nous voulons avoir ces résultats en quelques heures. C’est pourquoi ces méthodes utilisent généralement ce qu’on appelle le “cloud computing”, qui consiste en l’organisation via un cloud d’un grand nombre de systèmes de calculs connectés en ligne de sorte à obtenir des capacités de calcul beaucoup plus grandes qu’avec un ordinateur seul.

En bref, nous pourrions donc définir le design génératif comme étant un système informatique doté d’une grande capacité de calculs, prenant en entrée toute une série de paramètres d’entrée définissables par l’utilisateur, et renvoyant en sortie une multitude de solutions répondant à ces mêmes critères.

Pour finir, notons que les méthodes de design génératif sont des méthodes qui peuvent être utilisées dans toute une série de disciplines, telles que l’art (ref : <https://www.dezeen.com/2014/05/22/joris-laarman-lab-3d-printed-furniture/>), l’architecture (ref : https://www.academia.edu/8208113/Generative_Design_Form_Finding_Techniques_in_Architecture), ou encore l’urbanisme (ref : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17549170801903678?scroll=top&needAccess=true>). Cependant, dans le cadre de ce travail, nous nous limiterons à leur application dans le monde de l’ingénierie mécanique.

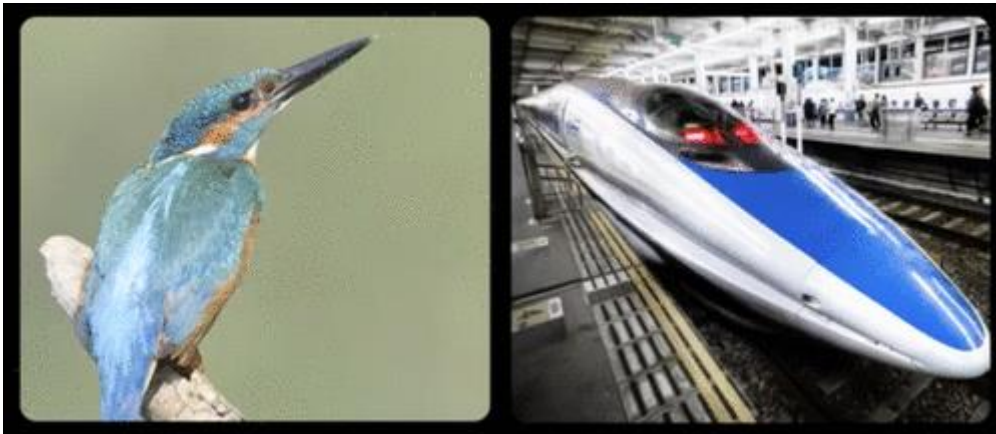
2.2 OBJECTIF PRINCIPAL : IMITER LA NATURE.

L’idée de ces méthodes est donc d’élargir le champ des possibles, et de nous libérer des limitations imposées par notre esprit humain. Même si celui-ci possède une capacité d’imagination incroyable, nous restons limités dans les formes que nous pouvons envisager. Typiquement, si nous devons relier 2 points entre eux, nous commencerions sans aucun doute avec une ligne droite, pour ensuite envisager un arc de cercle, ou d’autres formes régulières ou périodiques. Si nous précisons ensuite que le problème puisse s’étendre dans les trois dimensions, nous continuerions d’envisager des solutions simples et régulières, et aurions du mal à concevoir des formes plus complexes. Cependant, si nous regardons dans la nature, rares sont les exemples de structures qui comportent des formes régulières et

rectilignes. L'exemple le plus parlant étant les branches d'arbres qui ne sont jamais tout à fait rectilignes. Or, après avoir étudié la forme de la structure, il s'avère souvent que ces solutions trouvées par la nature sont en générale les solutions les plus optimales pour cette situation donnée.

Ainsi, pour chacun de nos problèmes d'ingénierie mécanique, nous pourrions tenter de nous inspirer des formes que nous rencontrons dans la nature. C'est d'ailleurs sur cette approche que se base la discipline de biomimétisme, qui étudie les solutions trouvées par la nature afin d'inspirer de nouvelles solutions à des problèmes humains (REF : Benyus, https://www.academia.edu/38300413/Janine_M_Benyus_Biomimicry_Innovation_Inspired_by_Nature_2002_Harper_Perennial_1_). Un des exemples les plus connus étant le fuselage aérodynamique de l'avant des Shinkansen (trains à grande vitesse japonais) dont la forme a été directement inspirée par la morphologie du bec du martin pêcheur. Cet oiseau ayant besoin de rentrer dans l'eau avec le moins de résistance possible, l'évolution a fini par le doter d'un bec ayant la forme optimale pour pénétrer dans l'eau de la façon la plus efficace.

EXEMPLE DE FUSELAGE DE SHINKANSEN AVEC MARTIN PECHEUR



https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0162243916689599?casa_token=gdgZRHAX0doAAAAA%3AV74Fg5nb2IF5HRVIOahBIG_4vE5Jc1nA190bbi5VHoQSlikNvp7BPgjhTPdWEjyh8u-G3gGvkwJJRw

Cependant, même si la nature reste le meilleur ingénieur sur Terre, l'approche adoptée par le biomimétisme n'est pas toujours la plus efficace en termes de temps. En effet, si pour chaque problème à résoudre nous devons trouver une situation similaire dans la nature pour voir quelle solution a été trouvée, cela nous prendrait sans aucun doute à chaque fois un temps considérable. D'autant plus que certaines situations mécaniques ne se trouvent probablement même pas directement dans la nature. C'est pourquoi il peut être intéressant de tenter d'imiter le processus selon lequel la nature trouve ses solutions, ou au moins s'inspirer de ces processus naturels afin d'en trouver un que nous pouvons appliquer à nos situations.

L'idée à suivre ne serait donc pas d'imiter les résultats de la nature, mais plutôt de tenter de générer des résultats comme la nature le ferait. Mais comment s'y prend-elle au juste?

Depuis Darwin, énormément d'études paléontologiques ont amené la communauté scientifique mondiale à un consensus concernant le modèle évolutif du Vivant. Selon ce modèle, l'évolution fonctionne par essai erreur, chaque modification s'opérant au fur et à mesure des nouvelles générations d'individus par le biais de la mutation génétique aléatoire. Lors de la naissance d'un nouvel individu, celui-ci va être doté de caractéristiques majoritairement identiques à celles du parent, mises à part certaines qui vont différer de façon plus ou moins significative. Ces changements vont alors influencer sur toute une série de paramètres physiques, chimiques ou autres de l'individu enfant, qui survivra différemment des autres individus de sa famille. Si ses différences l'avantagent par rapport aux autres individus de sa génération, il survivra mieux et aura plus de chance de multiplier son propre patrimoine génétique à travers une nouvelle génération.

Globalement, la nature procède par essais-erreurs, sur des échelles de temps gigantesques. L'évolution étant un phénomène continu prenant place sur des périodes de millions d'années, toute modification prend une quantité considérable d'itérations avant qu'elle ne s'impose dans cet environnement par rapport aux autres possibilités.

Si ces processus s'étendent parfois sur des millions d'années, c'est que chaque nouvelle génération met un certain temps à apparaître. Pour l'être humain par exemple, chaque génération a en moyenne mis entre 15 et 25 ans à s'opérer. Si l'on multiplie cela par le nombre d'itérations nécessaires avant de pouvoir remarquer des changements évolutifs, nous arrivons très vite à des périodes correspondant aux résultats observés par les scientifiques.

Cependant, si nous réduisons le temps de ces générations à l'aide de simulations informatiques, et que nous utilisons des forces de calculs suffisantes pour en simuler des dizaines, voire des centaines par seconde, nous pouvons arriver à obtenir des solutions assez rapidement selon des modèles inspirés de l'évolution. C'est l'ambition qu'a le design génératif : tenter d'imiter l'évolution par un processus d'essais-erreurs en considérant un maximum de possibilités, et d'évaluer les performances de chacune pour choisir la direction à suivre.

Un exemple intéressant a d'ailleurs été obtenu par une équipe de concepteurs menée par Maurice Conti, alors au poste de Director of Applied Research and Innovation at Autodesk.

Leur but était de concevoir une structure pour un quadcopter (drone volant doté de 4 rotors) en utilisant les méthodes de design génératif. Après avoir identifié les différentes contraintes et charges mécaniques auxquelles serait confrontée la structure, ils ont lancé la simulation et sont finalement arrivés à une certaine forme optimisée pour cette utilisation. Seulement, après observation, il s'est avéré que la structure ressemblait étrangement à une autre forme présente dans la nature : l'os de pelvis de l'écureuil volant.



EXEMPLE DE LA STRUCTURE DE QUADCOPTERE EN FORME DE PELVIS D'ECUREUIL VOLANT, Maurice Conti, https://www.ted.com/talks/maurice_conti_the_incredible_inventions_of_intuitive_ai/transcript#t-245506

Et en effet, il semblerait que le pelvis de cet animal rencontre des conditions mécaniques fort similaires à celles du quadcopter tel que développé par l'équipe. Ce résultat aurait dès lors pu être obtenu directement par le biais du biomimétisme si l'on avait remarqué ces similitudes. Cela dit, le fait que la nature soit arrivée à une solution très similaire peut dans une certaine mesure rassurer l'équipe sur le caractère plus ou moins optimal de leur design.

Il s'agit ici bien d'un seul exemple qui a par la suite trouvé confirmation dans la nature, mais il semble logique que nous nous approchions de résultats similaires si nous suivons les mêmes règles et principes fondamentaux.

2.3 METHODOLOGIE CLASSIQUE DE CONCEPTION INGENIEURE.

Actuellement, la quasi-totalité des pièces engineered et produites proviennent d'une même source : l'imagination du concepteur. Nous utilisons notre créativité d'humain afin d'amener toutes les idées de départ desquelles découlera toute la suite du processus de conception.

Lors de notre formation d'ingénieur à l'université, nous apprenons les méthodologies ingénieures à suivre dans le cadre de la conception mécanique. Notamment, à l'UCLouvain, le cours LMECA2801 Machine Design (donné par les Pr. B. Raucant et T. Servais) obligatoire dans les tronc communs des masters d'ingénieur civil mécanicien et électromécanicien (spécialisation mécatronique) enseigne aux futures ingénieurs les différentes étapes à suivre dans la conception d'une pièce ou d'une machine à une situation donnée.

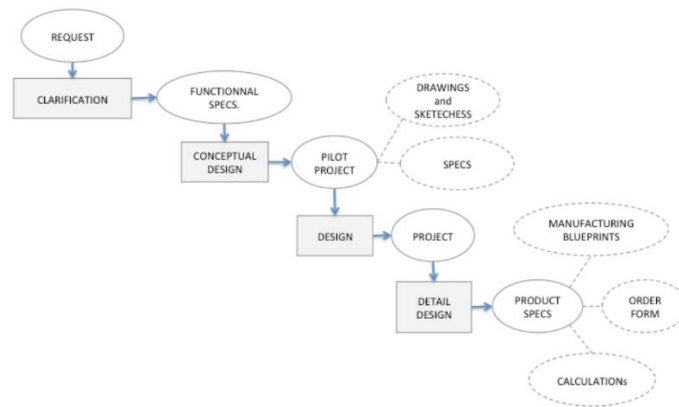


Image “The stages of a design”, p.7 du chapitre 1 du cours LMECA2801 (M. Raucent)

Le processus de conception se présente dès lors comme suit :

1. Phase de Project Definition :

1. Un besoin émerge de la part du demandeur (aka client) souhaitant qu’une solution soit trouvée à un problème donné.
2. Le concepteur (aka ingénieur) clarifie la demande afin bien cerner la situation et le manque à combler.
3. De cette étape émerge un premier document important : le cahier des charges. Celui-ci consiste en une description la plus exhaustive et objective possible des besoins, limites et fonctionnalités auxquels la future solution devra satisfaire.
4. Une fois les deux parties (le client et l’ingénieur) étant d’accord sur la description du cahier des charges, l’étape de conception à proprement parler peut commencer.

2. Phase d’implémentation :

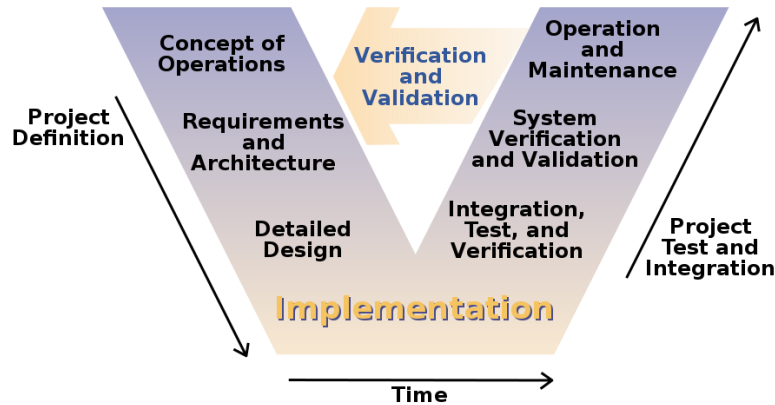
1. Typiquement, cela débute par une première phase de brainstorming pendant laquelle des recherches sur les solutions déjà existantes pour des problèmes similaires sont recensées. C’est aussi à ce moment-là que l’imagination et la créativité humaine prennent place : si des nouvelles idées et solutions non existantes émergent parmi les participants, celles-ci sont ajoutées au panel de matière brute qui servira à la création de la solution.
2. Toutes les solutions sont alors combinées et évaluées entre elles selon les différents critères précédemment spécifiés dans le cahier des charges.
3. L’ingénieur arrive avec une ou plusieurs solutions finales prêtes à être testées dans la phase suivante

3. Phase de validation :

1. Des tests sont menés sur la ou les différentes solutions de design choisies, de sorte à valider de façon objective et formelle que ces solutions satisfont bel et bien le cahier des charges préalablement défini lors de la première phase.
2. Les résultats de ces tests sont alors discutés entre l’ingénieur et le client, qui décident ensuite de si la solution finale convient à la situation ou non.

3. Si la solution n'est pas jugée suffisante, une nouvelle itération de design est menée en repartant de la définition des spécifications de départ.

De manière plus générale, cette méthode de travail est plus souvent connue sous le nom de "V-model", et peut évidemment s'appliquer à tous types de projets.



[Clarus Concept of Operations Archived](https://web.archive.org/web/20090705102900/http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/jpodocs/reports/14158.htm) 2009-07-05 at the [Wayback Machine](https://web.archive.org/), Publication No. FHWA-JPO-05-072, Federal Highway Administration (FHWA), 2005. <https://web.archive.org/web/20090705102900/http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/jpodocs/reports/14158.htm>

Lors de tout ce processus, l'expérience de l'ingénieur et la créativité humaine sont les principaux moteurs de progression du projet. Bien entendu, les ordinateurs et systèmes informatiques sont utiles dans la première phase (Project Definition) afin de pouvoir gérer les innombrables critères et références auxquels le projet doit souvent faire face. De même, l'ordinateur est bien évidemment utilisé lors de la troisième phase (Validation), en calculant de simulations numériques d'effort ou de fatigue par exemple.

Cependant, la seconde phase (Implémentation) n'utilise l'ordinateur que de manière très limitée. Les premières idées sortent en général directement de la main du concepteur, sur base d'inspirations externes, ou bien de son imagination propre. L'ordinateur n'est alors utilisé qu'une fois que les solutions aient été imaginées, et ce la plupart du temps à des fins de visualisation 3D et de partageabilité.

Même si l'ordinateur est par la suite utilisé pour optimiser le design via diverses simulations, la forme de départ restera une forme pensée par un être humain. Elle comprend alors tous les biais subjectifs liés au jugement propre de cet humain, ce qui signifie qu'il y a de fortes chances que le design final comporte des différences non négligeables en fonction de la personne qui s'en occupe. Etant donné que nous obtenons des solutions finales différentes en fonction du concepteur, nous sommes en droit de nous demander si la solution à laquelle un concepteur arrive est réellement la meilleure. Ensuite, peu importe la façon dont est menée la phase de validation, le point de départ restera une solution non absolument optimale.

2.4 SOLUTION APPORTEE PAR LE DESIGN GENERATIF

C'est à ce manquement de la créativité humaine que le design génératif tente d'apporter une solution. Son ambition est d'amener l'ordinateur beaucoup plus tôt dans le processus, et de l'utiliser pour ce en quoi les ordinateurs sont très performants : faire beaucoup de calculs très rapidement et sans erreur de distraction. Le rôle du concepteur s'en voit dès lors changé car il ne manipule plus directement la pièce à concevoir, mais il doit maintenant créer et modifier les règles du système qui va générer le design final. (REF McCormack Generative Design: A Paradigm for Design Research.) (McCormack, J., Dorin, A., and Innocent, T. (2004) Generative Design: A Paradigm for Design Research., in Redmond, J., Durling, D. and de Bono, A (eds.), *Futureground- DRS International Conference 2004*, 17-21 November, Melbourne, Australia.) Il conserve bien entendu sa capacité de jugement et sa créativité lors de la détermination des règles de départ, ainsi qu'à la fin pour l'interprétation et la vérification des résultats.

Le processus de conception se présente dès lors comme suit :

1. Phase de Project Definition

Prèsque exactement la même que lors du processus de design classique tel que mentionné précédemment au point 3 REF. La seule différence étant qu'à cette étape déjà, l'ingénieur doit avoir une très bonne maîtrise de la situation mécanique que rencontre la pièce à concevoir afin de pouvoir traduire la situation réelle en paramètres compréhensibles par le système.

2. Phase d'implémentation

1. L'utilisateur entre les objectifs et contraintes (matériau utilisé, méthode de fabrication utilisée, volume disponible, zones de contact, zones d'exclusion, charges appliquées, etc) dans le système de design génératif. Le but est que le système ait tous les éléments pertinents à sa disposition de sorte à ce que la solution proposée réponde à tous les critères du cahier des charges.

2. Le système génératif est lancé. Celui-ci va alors –moyennant un algorithme propre au système- envisager toute une série de formes répondant aux critères précisés en entrée.

3. Une fois le système ayant convergé vers des solutions satisfaisant aux critères définis initialement par l'utilisateur, il s'arrête et présente les différentes solutions auxquelles il est arrivé. Selon l'interface du système, l'utilisateur peut alors les trier et les comparer en fonction de certains critères, tels que par exemple la masse totale, la contrainte de Von Mises maximale, la déformation, etc. Certains systèmes permettent même d'avoir une estimation du coût de fabrication de la pièce, selon des partenariats avec des entreprises de prototypage de pièces.

3. Phase de validation

1. Parmi toutes ces solutions, l'utilisateur en choisit une ou plusieurs parmi celles qui lui conviennent le mieux. Il peut alors directement leur apporter l'une ou l'autre modification s'il le souhaite, concernant l'aspect esthétique par exemple, qui n'est en général pas facile à traduire dans un système informatique.

2. La suite correspond aux étapes de la phase de validation de la méthode de conception classique mentionnée précédemment au point 3 REF.

Ce type de système promet toute une série d'avantages par rapport aux méthodes classiques de design. Notamment par rapport aux performances auxquelles nous pouvons arriver. En effet, les designs obtenus par voie classique (autrement dit, sortis directement de l'imagination du concepteur) ne sont le plus souvent pas les plus optimaux en termes de résistance mécanique, optimisation de la masse, etc. Cela est essentiellement dû au fait que comme mentionné plus tôt, l'humain se base sur sa propre expérience ainsi que sur ce qu'il peut observer autour de lui pour imaginer de nouvelles solutions. Le risque étant alors de prendre exemple sur des idées imparfaites, ce qui compromettra l'optimisation de la solution finale. De plus, et peut-être de façon plus évidente, il est plus simple pour un cerveau humain de penser à des formes simples et régulières, et non pas à des formes plus "organiques" et irrégulières comme on les rencontre dans la nature. L'ordinateur n'a bien évidemment aucune capacité d'imagination, mais l'avantage est sa rapidité à envisager et tester beaucoup de solutions très rapidement. Pour en revenir aux gains de performances, comme nous le verrons plus tard, nombreux sont les cas où pour des mêmes propriétés mécaniques, une pièce optimisée par design génératif aura une masse 30 à 40% plus petite, voire parfois davantage. Le dernier gros avantage avancé par les partisans du design génératif se situe au niveau de l'expertise requise de l'utilisateur. En effet, la conception classique dans l'industrie nécessite en général des années de formation et d'expérience de la part de l'ingénieur pour que la solution soit faite en accord avec les standards de l'industrie. Le concepteur doit avoir suffisamment d'expérience pour "sentir" quelles options de design seront les plus judicieuses, en fonction notamment des erreurs qu'il aura déjà commises dans le passé. Par exemple, pour déterminer quel matériau utiliser dans tel ou tel cas. Ici, bien qu'une expérience soit bien entendu fortement recommandée, l'utilisation de programmes de design génératif essaient de réduire les exigences de compétences de l'utilisateur à la stricte définition des éléments d'entrée du programme. Autrement dit, il n'est maintenant plus nécessaire de faire une recherche approfondie de ce qui existe déjà dans le domaine, la "seule" chose dont le système a besoin est que lui soient fournis les objectifs, contraintes et limites mécaniques de l'objet à concevoir. Théoriquement, l'utilisation de ce type de programme ne nécessiterait donc qu'un "traducteur" qui traduirait la situation réelle en éléments quantifiés compréhensibles par le système. Ensuite, et peut-être que cette étape demande un peu plus d'expertise, l'utilisateur doit interpréter les différents résultats en sortie du système, les comparer, en choisir un et voire même lui apporter quelques dernières modifications.

Etant donnée l'automatisation de certaines étapes du processus, ce genre de méthode de conception promet aussi des temps de développement bien réduits : toutes les étapes de recherches de l'état de l'art ne sont plus nécessaires, de même que les dessins et schémas faits à la main ou sur ordinateur, ou encore les évaluations des solutions entre elles. Tout cela permet un gain de temps non négligeable dans le processus global de conception d'une solution. Certains programmes promettent de réduire le temps total de design de plus de 20 pourcents. (source : [Generative Design: The Future of Product Design... in 2020!](#))

Tout cela reste bien entendu très théorique mais semble néanmoins s'ancrer dans une certaine logique de l'évolution de l'industrie, où le temps et l'expertise coûtent de l'argent et où un des objectifs principaux est de diminuer les dépenses et augmenter les profits. Cela serait d'ailleurs tout bénéfique si en plus de tout cela, les propriétés mécaniques de la solution finale étaient aussi améliorées.

2.5 EXEMPLES D'APPLICATIONS PRATIQUES

Afin d'illustrer le type de résultats obtenus par design génératif, rien de tel que de montrer quelques exemples obtenus par le biais de ces méthodes. La liste s'allonge évidemment un peu plus chaque jour, et la plupart des détails de conception de ces pièces restent en général assez flous, mais cela permet néanmoins d'avoir une première idée des résultats auxquels nous pouvons nous attendre.

1. Aeroplane Seat (Autodesk and Airbus)

En 2017, alors 3D Printing Research Scientist chez Autodesk, Andreas Bastian a entrepris d'étudier les possibilités qu'offrait le design génératif à un cas pratique particulier : la structure des sièges d'avion de ligne. Il rentre alors vite en contact avec le département Innovation de chez Airbus, qui lui fournit les différentes informations dont il a besoin. Après quelques mois de recherche, il aboutit à ce résultat :



The aeroplane seat optimized by generative design <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/autodesk-research-scientist-lightweight-aeroplane-seat/>
Ce modèle imprimé en 3D en plastique lui sert à fabriquer un moule en céramique, pour ensuite pouvoir produire de nouveaux sièges en métal par moulage. Les gains de ce nouveau design sont multiples : Rien que grâce à son nouveau design optimisé, le siège observe un gain en masse de 30 %. En plus de cela, l'étude a montré qu'il était envisageable d'utiliser un certain alliage de magnésium. Ainsi, en utilisant cet alliage plutôt que l'aluminium classique, il était possible de faire perdre 24% de masse supplémentaires par rapport au design d'origine. Entre le début et la fin de ce processus, la masse d'un siège est donc passée de 1672g à 766g, ce qui correspond en effet à une diminution totale de masse de 54%, tout en gardant les mêmes propriétés mécaniques que la pièce de départ.

<https://www.autodesk.com/campaigns/additive/airplane-seat>

Dans le cadre de cet exemple, la méthode de fabrication finale utilisée reste le moulage et non l'impression 3D. En effet, l'impression 3D est bien utilisée dans la production d'un moule, et non dans celle de la pièce finale. Cela est essentiellement dû au fait que les techniques de fabrication additive ne sont pas encore assez avancées pour proposer suffisamment de matériaux différents. Au contraire, le moulage est une technique bien connue dans l'industrie, et il était dès lors possible d'utiliser le matériau souhaité pour la fabrication de cette pièce. Cependant, cela n'est qu'une question d'années avant que la fabrication additive soit une option complètement envisageable pour un panel suffisant de matériaux.

2. Steering Knuckle (ParaMatters, XponentialWorks and Arcimoto Inc.)

Un second exemple d'objet obtenu par design génératif est un steering knuckle pour les voitures de performance de l'entreprise américaine Arcimoto. Cette entreprise développe et produit des Fun Utility Vehicle (FUV), des voitures électriques à trois roues. Actuellement, tout le défi des fabricants de voitures électriques se situe au niveau de l'autonomie. Un moyen d'améliorer cela est d'augmenter la capacité du système de batterie, mais un autre moyen peut être de diminuer la masse totale de la voiture.

C'est ainsi qu'en 2020, l'entreprise collabore avec ParaMatters (une entreprise de conception mécanique) et XponentialWorks (une entreprise de prototypage) en vue d'optimiser le design de certaines pièces. Une des pièces qui est alors optimisée est le steering knuckle, en rose dans l'image suivante :



<https://xponentialworks.com/paramatters-generative-design-software-deployed-to-lightweight-arcimoto-electric-vehicle-parts/>

Sur l'image suivante, nous pouvons voir la pièce d'origine à droite, et la pièce optimisée à gauche en rose.



<https://www.metal-am.com/significant-weight-savings-in-arcimoto-electric-vehicle-through-metal-additive-manufacturing/>

La pièce de départ consistait en un assemblage de neuf pièces soudées en mild steel, pour une masse totale de 2.7kg. Comparativement, la pièce optimisée par design génératif consiste en une seule pièce de MS1 steel produite par fabrication additive, pour une masse totale de 1.7kg, ce qui représente un gain en masse de 37%. All this for a part that is three times stronger than the original structure.

The Role of the Designer in Generative Design

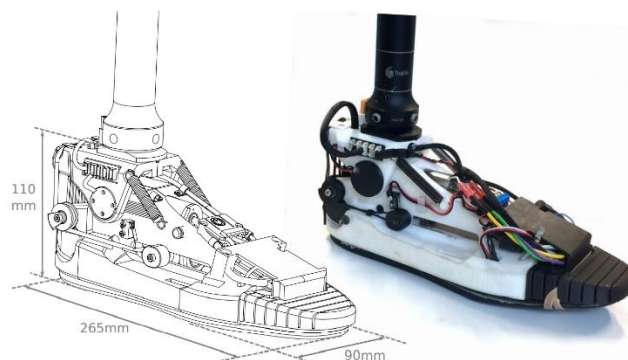
“Design using generative methods involves the creation and modification of rules or systems that interact to generate the finished design. Hence, the designer does not directly manipulate the produced artefact, rather the rules and systems involved in the artefact’s production.” McCormack, J., Dorin, A., and Innocent, T. (2004) Generative Design: A Paradigm for Design Research., in Redmond, J., Durling, D. and de Bono, A (eds.), *Futureground - DRS International Conference 2004*, 17-21 November, Melbourne, Australia.

3 CAS D’APPLICATION DE DESIGN GENERATIF

3.1 CONTEXTE DU CAS D’ETUDE : PROTHESE ELSA

Le meilleur moyen d’à la fois illustrer et évaluer la pertinence de ces méthodes de conception est de les mettre en pratique avec un cas d’étude concret et d’observer les bénéfices que l’on en tire.

Dans notre cas, nous avons eu la chance de pouvoir nous ancrer à un projet qui se développe en partie à l’UCLouvain : il s’agit du sujet de thèse de doctorat menée à l’UCLouvain par François Heremans (et dont Pr. Dehez est l’un des promoteurs) qui consiste en le développement d’une “ankle prosthesis, mimicking the complex biomechanics of the missing limb” (REF Francois Heremans thesis). Le projet se nomme ELSA, pour Efficient Lockable Spring Ankle, et consiste en une prothèse active incorporant un ressort parallèle embrayable ainsi qu’un actionneur série élastique, dimensionnés pour la dynamique de marche d’une cheville saine. La prothèse a pour ambition d’être suffisamment compacte de sorte à pouvoir rentrer dans le volume d’une chaussure classique. L’idée est de miniaturiser la plupart des éléments et mécanismes composant la prothèse de sorte à diminuer sa masse tout en s’approchant le plus possible des caractéristiques et fonctionnalités naturelles du pied humain.



(Image prothèse totale p92)

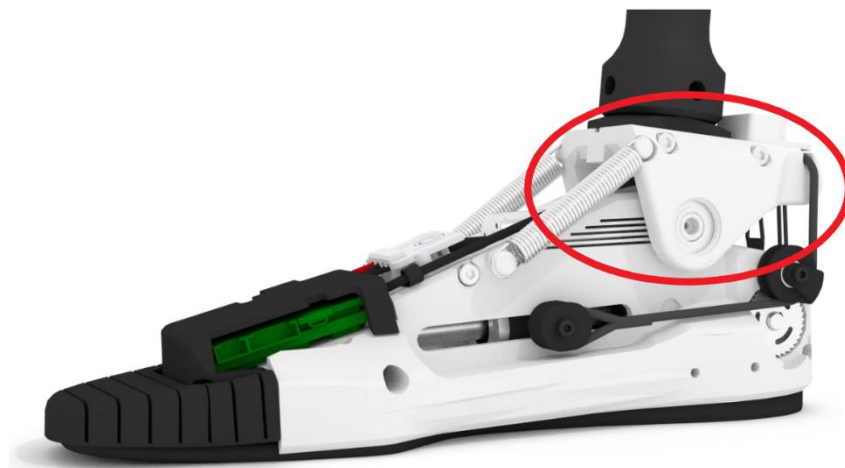
Comme structure mécanique, la prothèse comporte plusieurs pièces imprimées en 3D en polyamide (PA12), ce qui permet un prototypage rapide grâce à la fabrication additive, évitant ainsi les méthodes d'usinage fort coûteuses tout en gardant des caractéristiques mécaniques suffisantes. La logique globale de la prothèse s'inscrit dans une volonté de garder le prix de production le plus bas possible. C'est ainsi que le prix de fabrication d'une prothèse s'élève aujourd'hui à environ 1000 euros, ce qui est très bon marché comparé à d'autres prothèses équivalentes existant sur le marché.

La prothèse en est aujourd'hui à un stade d'avancement plus avancé. Bien qu'étant par conséquent obsolète, la version sur laquelle nous avons travaillé représente alors un exemple d'application bien connu par le doctorant. L'avantage est que nous avons ainsi eu accès à quelqu'un qui connaissait bien la prothèse, et qu'il a alors pu donner des feedbacks en fonction de l'expérience qu'il a déjà eue lors du développement de cette pièce.

En utilisant ce projet comme sujet d'étude, l'idée est qu'en plus d'être un très bon exemple d'application pratique des méthodes de design génératif, cela permette éventuellement d'amener des éléments de réflexion sur le design actuel de certaines pièces composant la prothèse, voire même de donner des pistes d'amélioration sur le design global en abordant la question du design mécanique par un autre point de vue.

L'utilisation du design génératif ayant pour but principal de diminuer la masse tout en gardant au moins d'aussi bonnes performances mécaniques, son recours semble ici tout à fait pertinent. D'autant plus que les pièces actuelles n'ayant pas fait l'objet d'études mécaniques approfondies, il est alors tout à fait envisageable de trouver des solutions encore plus optimisées en masse que celles utilisées à l'heure actuelle.

La partie à laquelle nous nous sommes plus particulièrement intéressés a été la structure de cheville entourée en rouge sur la figure suivante : (p92)



Cette structure est constituée de deux parties et s'assemble en utilisant deux tourillons ainsi que deux vis passant latéralement dans l'une des deux pièces pour venir se visser dans l'autre. En réalité, pour des raisons de montage des roulements, la conception actuelle de la pièce exige que les parties gauche et droite soient deux pièces distinctes et puissent être assemblées indépendamment l'une de l'autre avant de venir prendre en sandwich le restant de la prothèse.

Dans notre cas à nous, nous avons fait l'hypothèse que cette structure pouvait n'être formée que d'une seule pièce et non de deux. Comme nous le verrons plus tard, la raison principale de cette hypothèse étant liée à des limitations du logiciel ne nous permettant pas de concevoir plus d'une seule pièce à la fois. D'autre part, cela nous permet aussi de remettre en question (challenge) l'assemblage actuel et d'éventuellement envisager un assemblage différent si le design obtenu montrait de meilleures caractéristiques que l'ancien.

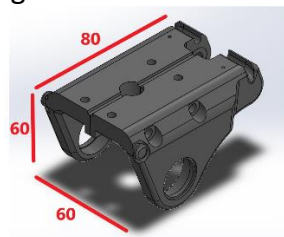
Notons aussi que les quatre trous situés sur la face horizontale supérieure sont destinés à fixer un connecteur pyramidal par en dessous à l'aide de quatre vis. Ce connecteur pyramidal servira ensuite à venir emboîter la prothèse dans la prothèse de tibia du patient. Il s'agit d'un type d'adaptateur tout à fait générique et très utilisé dans le secteur de la prothèse du membre inférieur. En voici un exemple



<https://shop.ottobock.us/Prosthetics/Lower-Limb-Prosthetics/Adapters-Structural-Components/Socket-adapter-w-pyramid-adapter%2C-Alum-/p/4R74~5AL>

Cet adaptateur n'est pas l'exemplaire exact que la prothèse ELSA utilise, l'idée est simplement d'indiquer la raison des quatre trous du dessus.

Afin de se représenter la taille de l'objet, notons que la structure rentre dans un volume de 80*60*60mm comme indiqué à la figure suivante :



Dimension de la structure à laquelle nous nous intéressons.

Par ailleurs, les deux pièces sont actuellement imprimées en 3D (by Selective Laser Sintering, or SLS) en Nylon PA12 (avec une MultiJet Fusion) et pèsent 35 grammes chacune. A titre d'information, la production de ces deux pièces revient aujourd'hui à environ 50 euros au total. L'idée des études menées dans ce travail sera donc d'essayer de voir si nous pouvons obtenir une pièce plus légère que 70 grammes.

3.2 CHOIX DU SOFTWARE DE DESIGN GENERATIF

Même si la méthodologie est connue et appliquée depuis plus longtemps, les logiciels de CAD proposant des versions commerciales de design génératif ne commencent à apparaître que depuis quelques années.

Voici une liste non exhaustive de quelques logiciels proposant des fonctions de méthodes génératives, avec leur date de sortie :

Software	Company	Release year
NX	Siemens PLM Software	2018
Fusion 360	Autodesk	2018
ParetoWorks (add-in to Solidworks)	SciArt Software, Inc.	2018
Truform SW (add-in to Solidworks)	GRM Consulting	2018
CogniCAD 2.0	ParaMatters	2018
Catia Functional Generative Design	Dassault Systèmes	2019
NTop Platform	nTopology	2019
MSC	MSC Software Corporation	2019
Creo Generative Design	PTC	2020

L'année 2018 semble avoir été l'année de lancement de beaucoup de fonctionnalités de design génératif pour beaucoup d'entreprises. Cependant, cela faisait déjà quelques années que l'on pouvait entendre parler d'exemples de design génératif. En effet, étant donné que le design génératif est une méthodologie assez générale, elle peut s'appliquer à d'autres domaines que la conception de pièces mécaniques. C'est ainsi que ces méthodes ont déjà été utilisées dans le domaine de l'art, notamment par le designer néerlandais Joris Laarman qui conçut la "Bone Chair" en 2006.



<https://www.moma.org/collection/works/110207>

Il s'agit d'une chaise en aluminium obtenue par moulage, dont les formes ont été générées par un programme tentant d'imiter le processus génératif des os humains. Ce software a résulté d'une collaboration entre l'artiste et les ingénieurs de chez Adam Opel GmbH. Ces derniers travaillaient déjà en interne sur un programme d'optimisation pour la conception des structures de châssis automobiles, et ont alors adapté le programme pour l'artiste. Cette chaise revient souvent comme l'un des premiers exemples de design génératif appliqué à une structure mécanique.

Un autre domaine dans lequel le design génératif est appliqué depuis quelques temps est l'architecture et l'urbanisme. En effet, en 2010 l'entreprise Rhinoceros 3D lance un projet de VPL (Visual Programming Language) open source nommé Grasshopper qui permet de faire de la modélisation paramétrique afin d'obtenir des résultats intéressants dans le cadre de projets architecturaux à la recherche de formes futuristes.



Exemple de design architectural obtenu via Grasshopper : (https://3dmaxfarsi.com/grasshopper-generative-design-architecture/?feed_id=1310&unique_id=5e902bab45d92)

Etant donné que nous voulions en choisir un afin de pouvoir mener nos différentes études, il a fallu en choisir un dans la liste. Ainsi, parmi tous ces logiciels offrant des possibilités de design génératif, le choix s'est finalement porté sur Fusion 360 développé par Autodesk. Et cela, pour plusieurs raisons.

Premièrement, il s'agit du seul logiciel dont la totalité des fonctionnalités de design génératif sont comprises gratuitement dans la version académique. En réalité, the Generative Design Extension coûte 1600 \$ par an, en plus de la souscription de base à Fusion 360. Et à cela s'ajoute encore des coûts variables à chaque génération de modèle. Or pour les étudiants, tout cela est gratuit, pour autant que cela reste dans le cadre de recherches académiques bien entendu.

Tous les autres logiciels génératifs sont disponibles via l'achat de licences très chères, ou via des périodes d'essai de quelques semaines seulement. Or pour nos études, nous en avons besoin pendant une période s'étalant sur au moins 6 mois. Malgré les mails envoyés aux différentes entreprises, aucun contact n'a pu être établi pour espérer avoir une version disponible pour la période de recherche.

Autre point déterminant dans le choix de Fusion 360 comme logiciel : sa facilité d'utilisation (its userfriendliness). Etant donné le temps relativement réduit que nous pouvons passer à mener les tests sur le logiciel, il était nécessaire que celui-ci soit assez facile et rapide à prendre en main. C'est aussi la raison qui nous a poussé à nous concentrer sur les résultats d'un seul logiciel et non de plusieurs.

Un dernier avantage à utiliser Fusion 360 est la grande quantité de contenu que Autodesk publie sur le design génératif. En effet, l'entreprise a adopté comme stratégie de beaucoup communiquer sur les applications de design génératif et a ainsi fait énormément de collaborations avec différentes grandes entreprises (Airbus, NASA Jet Propulsion Lab,

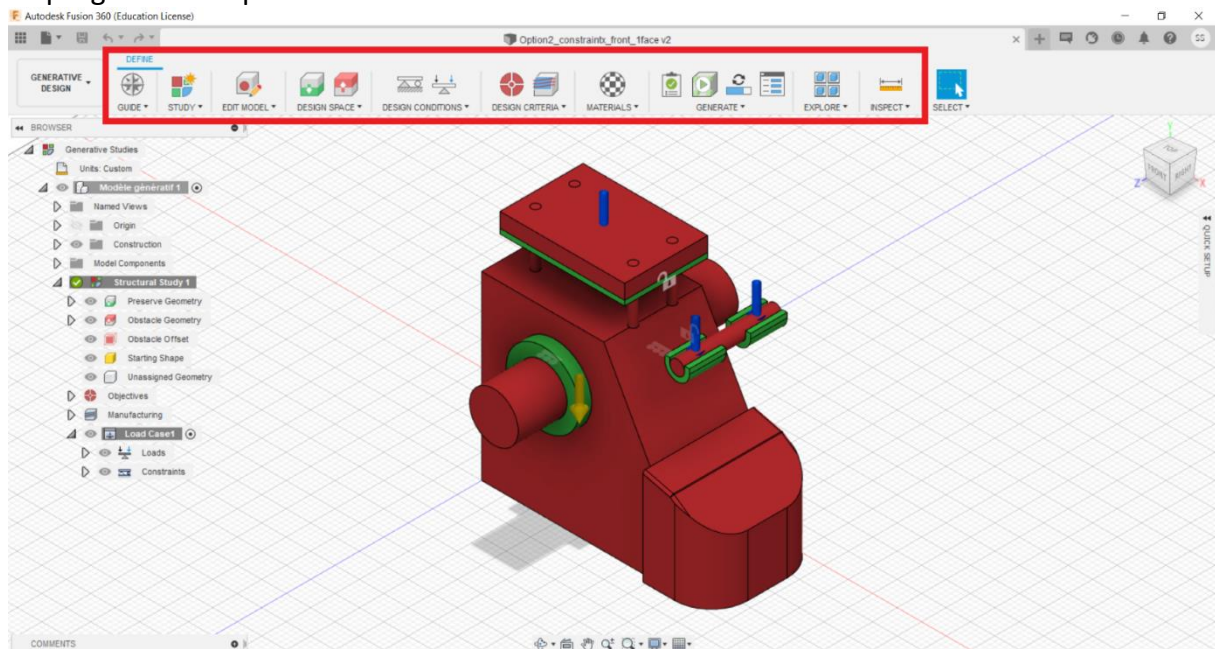
General Motors, ...). De toutes ces collaborations découlaient des articles et vidéos vantant les avantages incroyables qu'amenait le design génératif à la conception mécanique, il était donc intéressant de confronter notre propre expérience à ces promesses.

Malheureusement, malgré toutes les recherches faites sur le sujet, les algorithmes de résolution de Fusion 360 restent inconnus. Nous avons tenté de contacter à maintes reprises Autodesk en espérant avoir des pistes d'explication sur la façon dont ils procèdent en pratique à l'optimisation par méthodes génératives, sans succès. Nous avons donc dû mener toute une série de simulations en espérant comprendre quelques logiques derrière les résultats que nous obtenons.

3.3 DESCRIPTION DE FUSION 360

Maintenant nous allons voir comment fonctionne la fonction d'étude générative dans Fusion 360, telle que nous l'avons utilisée.

Le programme se présente comme suit :



Chacune des étapes à suivre se situe dans la barre du dessus encadrée en rouge. Il suffit donc juste de les suivre de gauche à droite afin de définir de façon complète tous les paramètres nécessaires à l'étude générative.

Etape 1 : Guide : Un guide d'assistance interactif, dans lequel nous pouvons trouver des informations supplémentaires sur différents éléments de l'étude.

Etape 2 : Study : Il est ici possible de créer une nouvelle configuration d'étude. Cela permet d'avoir la possibilité de simuler plusieurs cas de charges et de contraintes différents pour une même configuration de pièce. Attention, il n'est possible de mener une simulation générative que sur une seule étude à la fois. Sous cet onglet il est aussi possible to control the resolution and accuracy of outcomes.

Etape 3 : Edit model : Il est ici possible de modifier la pièce qui a été préalablement conçue pour l'étude. Ce modèle doit comprendre à la fois les volumes qui seront gardés lors de la génération de la nouvelle pièce, ainsi que les volumes interdits dans lesquels la pièce ne pourra pas s'étendre.

Etape 4 : Design Space : C'est ici que nous définissons les volumes à garder ainsi que les volumes interdits. Les volumes interdits (ou "Obstacle geometry", en rouge dans l'espace de conception) sont les volumes dans lesquels la pièce ne pourra pas s'étendre. Les volumes à garder (ou "Preserve geometry", en vert dans l'espace de conception) sont les volumes de départ que la future pièce générée comportera. De plus, ces preserve geometries sont aussi les géométries sur lesquelles vont s'appliquer les différentes charges et contraintes, comme nous allons le voir tout de suite.

Etape 5 : Design Conditions : Ici le premier onglet permet de définir des contraintes, et le second de définir des charges.

The constraint to be applied can be either :

- A fixed constraint applied to a face, an edge or a vertex. This will prevent the targeted item to move or deform in the specified direction (Ux, Uy or Uz).
- A pin constraint applied to a cylindrical face. This will prevent that cylindrical face from moving or deforming in the radial, axial and/or tangential direction depending on which of the three types of pin constraint we choose.
- A frictionless constraint applied to a face. This will prevent the targeted face from moving or deforming in the normal direction to the face. However, it can rotate, move or deform in the tangential direction.

The load to be applied can be either :

- A force applied to a face, an edge or a vertex ;
- A pressure applied to a face ;
- A moment applied to a face ;
- Or a bearing load applied to a cylindrical face.

Etape 6 : Design Criteria : Sous le premier onglet, nous pouvons à la fois définir le facteur de sécurité, mais aussi quel est l'objectif de l'optimisation, à savoir soit minimiser la masse ou maximiser la rigidité (maximize stiffness). Sous le second onglet, nous devons préciser la ou les méthodes de fabrication que nous voulons considérer pour la simulation. Ainsi, il est possible de choisir les méthodes de fabrication suivantes :

- Unrestricted : without taking into account the limitations of the manufacturing methods. This is a good method to choose at the beginning in order to explore the different possible shapes while having a minimum of manufacturing constraints
- Additive : we can define the orientation of the layers, as well as the overhang angle and the minimum thickness.
- Milling : we can choose between a 3-axis or a 5-axis machine. It is then possible to determine the direction(s) of the tool, as well as the minimum tool diameter, the shoulder length and the head diameter.
- Die casting : we can choose the ejection direction, as well as the minimum draft angle, the minimum thickness and the maximum thickness.

En plus de la méthode de fabrication, il est aussi possible d'indiquer un volume total de production souhaité, et d'ainsi avoir une estimation du coût unitaire de fabrication de la pièce. Cette estimation est basée sur des données fournies par une entreprise américaine nommée aPriori (<https://www.apriori.com/product/function/>) qui est spécialisée dans le

prototypage et la production de pièces. Cette fonctionnalité n'est cependant disponible que pour l'utilisation d'une liste très restreinte de matériaux.

Etape 7 : Materials : Il est possible ici de choisir les différents matériaux que l'étude prendra en compte, parmi une grande liste de matériaux de toutes sortes (métaux, plastiques, céramiques, ...).

Etape 8 : Generate : Le premier onglet fait un premier pre-check et indique si tout lui semble cohérent. Le deuxième permet une prévisualisation grossière de ce à quoi ressembleront les pièces générées. Cela peut être éventuellement utile pour avoir une première idée de l'allure des pièces. Le troisième onglet permet de lancer la génération. Chaque génération coûte 33 Cloud Credits, ce qui correspond à 33 \$. Le quatrième onglet permet quant à lui de montrer l'état d'avancement des designs en cours de génération. Une génération dure en général entre 1 et 4 heures.

Etape 9 : Explore : Une fois la génération terminée, il est ici possible de visualiser les résultats, et de les classer selon la méthode de fabrication, le matériau, le volume, la masse, le coût de fabrication, le Maximum von Mises stress, et le Maximum displacement global.

Finalement, les deux derniers onglets Inspect et Select ne servent qu'à la mesure de distances sur la pièce, et à des options de sélections.

3.4 PARAMÈTRES DE BASE DE NOTRE ÉTUDE

Après avoir décrit le fonctionnement du programme de design génératif, voici la mise en application pour la pièce que nous avons choisi d'étudier. Tous ces choix de dimensions, charges, contraintes, etc sont le résultat de maintes discussions et réflexions. Nous vous présenterons donc ici que les versions finales sur lesquelles nous sommes finalement arrivés.

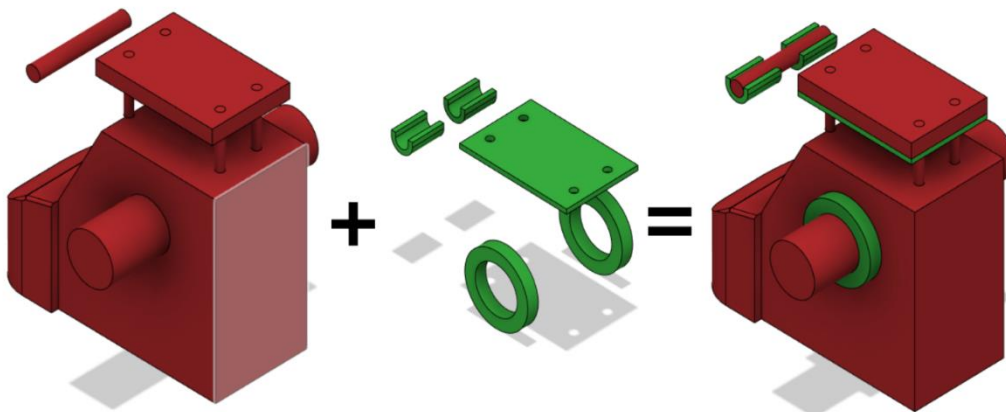
3.4.1 Simplification de la structure et modélisation dans Fusion 360

Comme mentionné dans section 3.a (REF) la structure réelle doit normalement être composée de deux pièces venant s'emboîter et se visser l'une dans l'autre. Cependant, Fusion 360 ne permet pas de concevoir plus d'une seule pièce à la fois. Ainsi, nous ne prendrons ici pas en compte les contraintes liées au montage des roulements à l'intérieur de la pièce, de sorte à pouvoir concevoir la structure totale en une seule pièce.

Une pièce possédant les mêmes dimensions a alors été modélisée dans Fusion 360. La pièce a été simplifiée pour faciliter la situation mécanique globale, et les différents points de contact ont été définis :

- Deux bagues cylindriques (en vert) sont situées de part et d'autre de la pièce pour accueillir les deux roulements de la cheville.
- Une surface plane sur le haut de la pièce (en vert) pour venir accueillir le connecteur pyramidal. Notons que le filetage étant présent dans le connecteur, il est nécessaire de prévoir des passages de vis dans la plaque du dessus, ainsi que l'espace nécessaire pour venir visser ces vis par en-dessous (cylindres verticaux en rouge).

- Le volume interdit central (en rouge) a été agrandi de sorte à ce que la pièce finale puisse tourner de +/- 20° autour des axes des roulements sans qu'elle ne soit bloquée par une structure interne.
- Une fente cylindrique pouvant accueillir le système de traction contenu dans la prothèse a été gardée à l'extrémité de la pièce.
- Un volume interdit en forme de gros cylindre traversant toute la conception sur sa largeur a été ajouté de sorte à garantir que le passage circulaire dans les bagues.

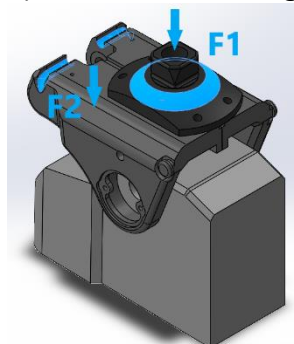


3.4.2 Modélisation des charges pour le cas de base

Avant de nous lancer dans les simulations, il a été nécessaire de bien définir la situation mécanique que rencontrait la pièce que nous voulions étudier. Nous avons donc discuté avec François Heremans afin qu'il nous explique les différentes fonctions que devaient remplir la pièce à concevoir. Il nous a alors donné le modèle SolidWorks de la pièce d'origine, et nous a aussi communiqué les différents ordres de grandeur des charges auxquels la pièce devait résister.

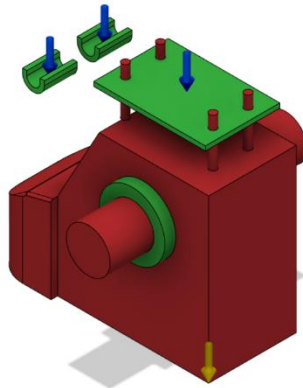
Après discussion avec le doctorant, il s'est avéré que beaucoup de forces pouvaient être négligées ou rassemblées ensemble. Ainsi, après simplification de la solution, deux charges principales ont pu être identifiées :

- La masse du patient, évaluée à 1000N en direction du sol, qui s'applique sur la surface supérieure du connecteur pyramidal (F1 en bleu sur l'image suivante).
- La force de traction générée par le système actif compris dans la prothèse, évaluée à 3000N en direction du sol, qui s'applique tout le long de la fente située à l'arrière de la prothèse (F2 en bleu sur l'image suivante).



Nous avons dès lors transposé ces charges sur la pièce modélisée sur Fusion 360 comme cela :

- 1000N de uniformément sur toute la surface horizontale du dessus avec les quatre passages de vis, dans la direction du sol.
- 3000N sur les demi-cylindres de la fente à l'arrière de la prothèse (donc 1500N sur chacune des deux parties), dans la direction du sol.
- En plus de ces deux charges, nous considérons aussi l'effet de la gravité sur toute la structure, à savoir une accélération de 9.807m/s^2 dans la direction du sol.



3.4.3 Modélisation des contraintes pour le cas de base

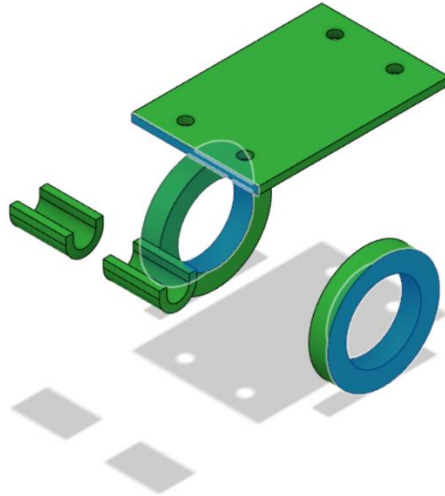
Concernant les contraintes qui s'appliquent à la pièce, il a été nécessaire de consacrer un certain temps à s'assurer que la façon dont on contraint la pièce soit fidèle à la réalité. En effet, comme nous le verrons dans la section suivante, le design final des solutions obtenues par design génératif diffère beaucoup selon la configuration de contraintes qu'on leur applique.

Les solutions ayant toutes en commun les géométries préservées (en vert), les contraintes que nous pouvons imposer à la pièce se feront sur ces surfaces-là. Avant de pouvoir lancer une simulation, le programme vérifie si le système n'est pas sous contraint. Si c'est le cas, il n'est pas possible de lancer une simulation tant que cela n'a pas été corrigé.

Dans notre cas, nous avons appliqué les contraintes suivantes :

- De part et d'autre de la pièce, nous avons tout d'abord appliqué sur les faces intérieures des deux bagues (en bleu) des contraintes sans frottement (frictionless constraints), afin de symboliser la contribution des roulements à billes présents des deux côtés. This means that both faces can rotate, move or deform in the tangential direction.
- Dans la réalité, les deux côtés de la structure sont fixés via deux vis. Ainsi, afin de représenter le fait que les deux bagues sont contraintes dans la direction axiale, nous contraignons les faces verticales externes des deux bagues dans la direction normale à ces faces. En vérité, ne contraindre qu'une seule des deux faces était suffisant pour enlever ce degré de liberté. Cependant nous souhaitions avoir une certaine symétrie des contraintes dans le cas de base car c'est le cas dans la situation réelle.
- Dès lors il ne nous reste à présent qu'un seul degré de liberté à contraindre. En effet, actuellement, la pièce est encore libre de tourner autour de l'axe des deux bagues. Ainsi nous avons décidé d'ajouter une contrainte fixe selon la direction normale sur la face verticale avant de la plaque du dessus (en bleu). Cette contrainte empêche donc

finalement la pièce finale de basculer en avant ou en arrière, et bloque donc bien le dernier degré de liberté de la future pièce.



3.5 RÉSULTATS OBTENUS PAR DESIGN GÉNÉRATIF POUR LE CAS DE BASE

Pour rappel, le but ici est de voir quelles solutions nous obtenons pour le cas d'étude décrit dans cette section, à savoir la structure faisant le contact entre l'adaptateur pyramidal et les roulements de la cheville de la prothèse. Les résultats obtenus ici découlent déjà d'un processus itératif de nombreux essais-erreurs au cours desquels les paramètres ont à chaque fois été modifiés en fonction des observations menées. Cette version est donc la dernière version à laquelle nous sommes arrivés, autrement dit la plus aboutie jusqu'à présent.

3.5.1 Détermination des derniers paramètres

Tous les paramètres nécessaires pour la simulation de solutions par design génératif ont été définis précédemment dans la section 4.4 (REF), à l'exception de quatre : la méthode de fabrication, le matériau à utiliser, l'objectif d'optimisation et le coefficient de sécurité.

Concernant la méthode de fabrication, étant donné que nous souhaitons dans un premier temps produire un prototype de cette pièce, dans des quantités limitées, et de manière rapide et relativement bon marché, la fabrication additive s'impose assez rapidement comme choix le plus intéressant. D'ailleurs, les pièces constituant les structures de la version originale de la prothèse sont imprimées en 3D par une entreprise tierce.

Concernant le matériau à utiliser, nous avons un peu plus de libertés. L'avantage que nous avons ici est que la structure n'est pas en contact direct avec le patient : il ne doit donc pas être biocompatible. Nous pouvons donc nous concentrer exclusivement sur ses propriétés mécaniques, ainsi que sur son coût. Bien entendu, il s'agit de choisir un matériau qu'il est possible d'imprimer compte tenu des technologies actuelles. En effet, bien que la liste des matériaux pouvant être utilisés dans la fabrication par addition de matière s'agrandisse un peu plus chaque année, tous les matériaux utilisés dans d'autres techniques de fabrication n'y figurent pas encore. (REF <https://www.researchgate.net/publication/347673485> A review on advances in 3D metal printing) La version originale des structures de la prothèse sont actuellement imprimées en Nylon PA 12. Il s'agit d'un matériau déjà bien connu dans le domaine de l'impression 3D, et

nous aurions dès lors bien aimé utiliser ce même matériau. Malheureusement, comme nous le verrons plus tard dans la section (REF), les simulations utilisant le nylon comme matériau d'impression ne donnaient pas de résultats convaincants.

C'est pourquoi nous avons alors opté pour un alliage d'aluminium AlSi10Mg, un matériau qui est déjà bien connu et souvent utilisé à l'EPL pour de l'impression 3D par frittage laser (SLS).

Concernant l'objectif d'optimisation de la pièce, nous avons le choix entre minimiser la masse ou augmenter la rigidité. Nous choisissons la première option étant donné que nous souhaitons avant tout avoir la pièce la plus légère possible.

Et finalement, concernant le facteur de sécurité, nous garderons un coefficient de 2.0 afin de respecter les bonnes pratiques ingénieures. En vérité, après discussion avec le doctorant, il s'avère qu'un facteur de sécurité plus faible pourrait être acceptable pour cette application. Cependant nous gardons néanmoins ce coefficient de 2.0 pour cette itération-ci.

3.5.2 Résultats

Nous avons donc déterminé tous les paramètres nécessaires à la génération de solutions. Voyons maintenant les résultats que nous obtenons.

La direction d'impression est la suivante : L'impression commence par la plaque horizontale à plat, et remonte jusqu'à terminer par les deux bagues circulaires.

Vues isométriques :



Vues de devant, de côté et de dessous :



Tout cela pour une masse totale de 39 grammes, ce qui correspond à une diminution de masse de 44% par rapport au design d'origine.

3.5.3 Discussions

Nous pouvons cependant observer que la pièce est globalement symétrique. Cela correspond bien à ce que nous nous attendions, étant données les contraintes et charges appliquées de façon symétrique sur toute la pièce. Cependant, des structures partant de la plaque et rejoignant verticalement les deux bagues ne sont pas développées de façon symétrique. Nous pouvons le voir sur la vue de dessous. Malgré les différents tests menés par la suite, nous ne pouvons donner d'explications claires sur la cause de cette asymétrie. Comme nous le verrons dans la suite, cette asymétrie n'est pas causée par la méthode de fabrication, car même lorsque nous choisissons de générer une pièce de façon unrestricted (c'est-à-dire sans tenir compte des limitations liées à la méthode de fabrication), des asymétries de ce type apparaissent toujours.

Concernant le prix, plusieurs solutions sont possibles. La première solution est de la fabriquer à l'université, avec les imprimantes que l'on a à disposition. Après avoir pris contact avec Camille van der Rest de l'IMMC à l'EPL, dont le domaine d'expertise s'étend sur la fabrication additive avec cet alliage d'aluminium, il s'avère que le coût de fabrication d'une seule pièce s'élèverait à environ 420 euros au total. Cela se justifie avant tout par l'utilisation de la machine qui est fort coûteuse. En effet, celle-ci s'élève à 80 euros par heure d'utilisation, coût d'utilisation et de l'argon compris. Toujours selon la spécialiste, étant données les dimensions de notre pièce, nous pouvons nous attendre à ce qu'elle mette 5 heures à s'imprimer. A cela s'ajoute finalement le prix de la poudre d'aluminium, qui est de 50 euros par kilogramme. Etant données les pertes importantes de poudre liées à la machine, nous pouvons estimer que l'impression de la pièce demandera l'utilisation de 400 grammes, soit 20 euros.

Une autre possibilité est de faire appel à une société tierce spécialisée dans l'impression 3D pour prototypes. Afin d'avoir une idée, nous avons fait appel à la société chinoise SuNPe (<https://sunpe.com/>) pour avoir une idée du coût de production d'une seule pièce. Ainsi, le coût de production d'une seule pièce dans cette entreprise reviendrait à 121 euros, pour 81 euros de production et 40 euros de frais d'envoi, ce qui serait une nette amélioration du prix pour un résultat théoriquement identique.

Rappelons-nous que ces prix doivent être mis en parallèle avec le prix de production des pièces du design actuel, qui est d'environ 50 euros.

3.5.4 Validation numérique

Afin de vérifier la tenue mécanique de ce design, nous allons faire une simulation statique de la pièce sur SolidWorks, et comparer les résultats avec ceux du design de base.

Détermination

3.5.5 Discussion des résultats

3.6 DEMONSTRATION DE L'INFLUENCE DE DIFFERENTS PARAMETRES SUR LE DESIGN OBTENU

Dans cette section, nous allons observer les solutions obtenues en sortie de simulation générative, et noter comparer les résultats des variations de certains paramètres.

L'idée ici est donc bien de faire varier certains paramètres pour observer leur influence sur les designs de sortie, et ainsi tenter de mieux comprendre l'utilisation de cette fonctionnalité de design génératif.

En fonction de :

- Méthode de fabrication
- Direction d'impression : 6 directions de l'AM font varier la géométrie et la masse totale des solutions.
- Configurations des contraintes (symétrie)
- Paramètre de simulation (coarse/fine)
- Matériau
- Intensité : différence d'intensité de force (1x/10x)

3.7 DISCUSSIONS

3.7.1 Limitations

(note : comme nous n'avons utilisé que le programme Fusion 360, les remarques suivantes ne concerneront avant tout que ce programme-là. Cependant, d'après les infos recueillies sur les sites internet, les remarques que nous faisons à Fusion 360 semble s'appliquer à la plupart des programmes utilisant des méthodes de design génératif)

- Manque de transparence sur les algorithmes et certaines définitions ==> protectionnisme de la part des entreprises? Ce qui est normal
- Très grosse limitation : on ne peut considérer qu'une seule pièce à la fois, et pas un ensemble. Cela est très ennuyant car la conception d'une pièce se fait en général en considération des autres. Cela dit, nous pouvons nous attendre à ce que ce ne soit qu'une question de temps avant que ce manquement soit assez rapidement comblé.

- Cfr Vincent Musette : Au vu de certains résultats obtenus pour certaines méthodes d'usinage, il semble indispensable de repasser après pour retoucher la pièce en vue de fraisage ou de moulage : rendre les formes plus régulières.
- Cfr Camille Van der Rest : Contrairement aux promesses disant que la pièce obtenue en sortie du programme peut être directement imprimée en utilisant la fabrication additive, il semblerait que les résultats nécessitent quand même une intervention finale de l'humain avant de pouvoir être imprimée.
- Beaucoup de temps perdu dans la définition des contraintes, pas évident de savoir comment réellement les définir dans le logiciel.
- Autres : <https://www.danieldavis.com/generative-design-doomed-to-fail/>

3.7.2 Avantages

- Gain en masse = gain en matière. Pour certaines applications où le coût du matériau est élevé, en utiliser le moins possible peut être un gros avantage dans le développement global de la pièce.
- Automated meshing and no prior knowledge of finite element analysis required
- Multiple design candidates generated based on optimization settings
- The results are always smooth and, theoretically speaking, ready to print using Additive Manufacturing.
-

3.7.3 Prix

comparaison avec les méthodes d'usinage classiques (cfr mémoire Vatlet)
 Sunpe
 i-Materialise
 UCLouvain (Vincent Musette)

3.8 CONCLUSIONS

L'implication de l'AI dans tous ces procédés est une excellente chose. En effet, nous pouvons imaginer que cela nous permette de directement s'inspirer de millions de modèles déjà existants pour définir les paramètres initiaux de la meilleure façon possible. Comme si la conception de chaque pièce était conçue avec comme bagage initial l'expérience de conception de millions d'autres pièces.

Cependant, attention aux dérives. Comme c'est d'office l'humain qui choisit le design final, l'AI pourrait commencer à adopter un comportement "manipulateur" envers l'espèce humaine. Il pourrait commencer à repérer le comportement humain de sorte à ce qu'on fasse exactement le choix que l'ordinateur aura décidé. Par exemple, si nous préférons systématiquement le second meilleur choix plutôt que le premier, l'ordinateur observera cela et mettra le réel premier choix en seconde place afin que nous le choissions. Cela semble peut-être fort simpliste comme situation et probablement un peu pessimiste, car au final la solution choisie sera bien la meilleure, ce qui était notre objectif

principal. We don't want to lose sight of why our tools are achieving this or that result, otherwise we won't be able to interpret the results correctly. The only thing is that as designers we have to keep track of what we are doing so that we make sure we keep control over the processes we use.

Le design génératif semble s'inscrire dans le prolongement logique de l'évolution ingénierie. Nous obtenons de meilleurs résultats, dans des délais plus rapides. Reste à ce que ces méthodes intègrent de façon beaucoup plus directe les différents tests à mener en vue des tests de validation. Peut-être que si les tests étaient automatiquement choisis en fonction de la nature de l'objet à concevoir ainsi que selon la définition des différents objectifs et contraintes, cela pourrait permettre d'amener une plus-value énorme sur tout le processus de production d'une pièce.

Après discussion avec plusieurs personnes travaillant dans l'industrie, il en est ressorti que les méthodes de design génératif ont encore besoin de quelques améliorations avant de convaincre.

Le coût de production étant très souvent un élément très important dans les processus de prises de décision, d'autres critères restent néanmoins prioritaires dans l'adoption de ce type de technologie par l'industrie. Notamment, la fiabilité de la pièce. Lorsque j'ai parlé de ces technologies à des ingénieurs travaillant dans l'industrie, ceux-ci ne semblaient a priori pas encore prêts à risquer de perdre ces garanties de contrôle de design au profit d'un gain en matière, aussi significatif soit-il. Autrement dit, les avantages que toutes ces méthodes proposent actuellement ne sont pas encore suffisant pour décider d'un basculement dans un nouveau modèle de fonctionnement. Changer tout le modèle d'organisation d'une entreprise demande beaucoup de temps, d'argent et d'énergie pour se mettre en place, c'est pourquoi il est nécessaire que les méthodes de design génératif proposent significativement plus d'avantages que les méthodes actuellement employées. Il est donc nécessaire que les méthodes évoluent et s'affinent davantage de sorte à commencer à intéresser le monde industriel.

De plus, l'industrie d'aujourd'hui est aussi à la recherche de méthodes de fabrication plus respectueuses de l'environnement, que ce soit par le choix de matériaux recyclables, ou en utilisant des méthodes moins coûteuses en énergie. Si le design génératif permettait de donner le coût environnemental de fabrication de la pièce en fonction de la méthode de fabrication, du matériau utilisé, ..., cela serait un point positif supplémentaire non négligeable pour ces méthodes.

Il semble assez naturel que nous nous dirigeons vers une automatisation de ce genre de procédés, surtout s'ils nous permettent d'obtenir de meilleurs résultats plus rapidement. Cela rejoint en quelque sorte un peu

Cela rentre en quelque sorte dans la logique de l'industrie 4.0 telle qu'on l'entend aujourd'hui, selon laquelle tous les moyens de production seront connectés de manière optimale, et où les machines travailleront en collaboration avec les êtres humains.

(Attention aussi à ce que les méthodes d'optimisation soient utilisés de façon judicieuse : nous voulons ici que le bilan global soit positif, et non pas assister à un "effet rebond" façon design mécanique.)

Cependant, toutes ces remarques et commentaires reflètent ma vision des choses à travers ma perception de jeune ingénieur finissant tout juste mes études. La seule expérience que j'ai de la conception mécanique dans l'industrie est celle qui m'a été rapportée dans mes cours et dans différentes discussions. Ma vision passe alors sûrement à côté d'éléments pourtant essentiels dans le monde industriel, mais auxquels je n'ai pas encore été sensibilisé. Cependant, ce travail m'aura permis d'amorcer une réflexion sur la manière d'organiser la conception mécanique en général, et cela m'amènera une plus grande ouverture d'esprit sur ce domaine dans ma vie professionnelle future.

En guise de conclusion, nous pouvons toujours espérer qu'en nous approchant du fonctionnement de la nature, nous serons amenés à mieux comprendre son génie, et à alors mieux la respecter en général. Car même si nous tentons de reproduire ce que la nature et la vie font chaque jour depuis des millions d'année sur Terre, nous ne pourrons jamais que tenter de nous approcher le mieux possible de ce miracle qu'est l'évolution.

Il a été assez frustrant de n'avoir accès à la théorie derrière le fonctionnement exact des algorithmes d'optimisation du logiciel. Il est évident que même si nous avons accès à toutes ces informations, décortiquer et analyser toutes ces implémentations aurait sans aucun doute été très compliqué et chronophage. Néanmoins, nous nous sommes retrouvés ici dans la situation inverse, où nous n'avons pour ainsi dire pas d'information sur la façon dont fonctionnait l'intelligence du logiciel, et où nous devons dès lors essayer de comprendre cette « boîte noire » en fonction des résultats qu'elle nous donnait en sortie.

Cependant, malgré tout cela, nous avons pu faire quelques observations qui pourraient mériter d'autres travaux de recherche. De plus, ce travail constitue aussi une bonne entrée en matière dans le sujet du design génératif, et quiconque voulant à l'avenir étudier ce sujet pourra partir avec une certaine avance, ainsi qu'une idée de ce à quoi il pourra s'attendre en utilisant de tels logiciels.

Cela peut aussi servir de témoin temporel à propos de la façon dont on perçoit le sujet aujourd'hui en 2021, et de comparer cela avec la vision qu'on en aura dans le futur.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl