

Retour d'expérience sur le lien recherche-formation en optimisation topologique des projets en cycle ingénieur

D. MARHABI, J.M. NIANGA

DEPARTEMENT CONSTRUCTION CIVILE ET MECANIQUE
HAUTES ETUDES D'INGENIEUR
13 Rue de TOUL
59046 LILLE-Cedex, FRANCE

Résumé :

La réduction de masse est une des solutions techniques qui s'impose à l'avenir dans l'usine du futur, permettant des économies de consommation et une réduction importante de l'empreinte environnementale des constructions (villes durables, Transports Aérien, Maritime et Terrestre, ...).

Le concept de développement de produits tire avantage d'une mise en œuvre des outils de la chaîne numérique : conception assistée par ordinateur et modélisation numérique, prototypage et fabrication additive. Parmi ceux-ci, l'optimisation topologique est un outil d'aide à la conception capable de proposer des concepts originaux de composants mécaniques sur base d'une distribution optimale de matière. C'est une méthode numérique qui vise à construire un modèle optimisé en ne connaissant que les charges, les conditions de liaisons, le volume de la structure et les exigences du fabricant.

Dans ce papier, nous proposons une démarche d'apprentissage de la fonction-objectif et des critères à déclarer dans le processus d'approximation optimal d'une structure pour aboutir à un problème bien posé sur des logiciels d'optimisation topologique implantés sur SolidWorks, Abaqus et Inspire.

Les études développées lors des projets de fin d'étude présentent une démarche d'initiation en recherche pour les étudiants du domaine conception mécanique des H.E.I. Elles ont été validées par des Benchmarks des constructions simples en élasticité linéaire tridimensionnelle.

Les élèves ingénieurs ont structuré l'étude de la manière suivante :

- Une recherche bibliographique sur les méthodes d'optimisation pour mieux cerner le sujet,
- Une étude de l'optimisation topologique par les tutoriels SolidWorks, Abaqus et Inspire,
- Le choix des prototypes pour la pratique des critères d'optimisation.

L'optimisation topologique retient la solution optimale, à condition de définir au préalable l'ensemble des contraintes et faire le bilan exhaustif des champs d'action possibles sur le Design. Il faut aussi s'appliquer à bien configurer les modules d'élément fini et d'optimisation topologique pour que les critères conduisent aux solutions optimales.

Mots clefs : Optimisation topologique; Fonction-objectif d'allègement; Modélisations SolidWorks, Inspire et Abaqus; Lissage de pièce optimisé

1 Introduction

Le travail réalisé est dédié à la formation par la recherche en optimisation topologique sur des projets en cycle ingénieur. L'intérêt que suscite l'optimisation topologique s'explique par sa capacité à offrir des solutions innovantes permettant un gain de performance nettement supérieur à ce que l'on peut obtenir par optimisation dimensionnelle ou par optimisation de forme.

L'optimisation topologique introduite par Bendsoe and Kikuchi [1], permet de contrôler non seulement la géométrie, mais aussi la topologie de la structure. L'optimisation se ramène dans ce cas à la recherche de la distribution optimale de matière dans la structure 3D, en éliminant du matériau dans les endroits du volume ne respectant pas les fonctions-objectifs. Duysinx [2] a montré dans ses travaux d'optimisation de structure que dans des problèmes de conception courants, les gains moyens de performances (masse ou rigidité) varient entre 40 et 90 % pour les méthodes d'optimisation topologique.

Les techniques d'optimisation topologique aident les chefs de projet de construction à concevoir au plus juste des pièces optimisées, aussi bien en masse qu'en résistance et durabilité.

2 Minimisation de la fonction-objectif en élasticité linéaire

Un problème d'optimisation se met sous la forme générique suivante : étant donné un jeu de paramètres d'optimisation, on cherche à minimiser un critère donné, en satisfaisant un certain nombre de contraintes de type égalité ou inégalité.

Dans ce contexte, l'intérêt primordial est le problème de la maximisation de la rigidité globale d'une structure élastique. Cet objectif peut se formuler par la minimisation de la fonction objectif défini sur la structure par la compliance C (ou travail des efforts extérieurs dans le champ de déplacements d'un problème élastique) que l'on détermine grâce au système algébrique du calcul par éléments finis :

$$C(\rho) = {}^tU \cdot K(\rho) \cdot U$$

Avec U le tenseur des déplacements des nœuds du maillage de la pièce et $K(\rho)$ la matrice de rigidité de la structure en fonction de la répartition de densité ρ . Finalement le problème d'optimisation s'expose globalement par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\rho} C(\rho) = {}^tU \cdot K(\rho) \cdot U \\ \text{avec : } \left\{ \begin{array}{ll} \frac{V(\rho)}{V_0} = f & \text{: fraction volumique du domaine} \\ \mathbf{K}(\mathbf{E}) \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F} & \text{: Relation de Rigidité} \\ \mathbf{E}_{ijkl}(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x})^p \mathbf{E}_{ijkl}^0 & \text{: Principe de pénalisation du module d'Young} \\ \rho(\mathbf{x}) \in [10^{-3}, 1] & \text{: Densité de matière} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Pour résoudre ce problème de recherche d'extremum globale on utilise la méthode itérative appelée Optimality Criteria Method. Elle consiste en la recherche de la condition d'optimalité noté $B(x)$ que l'on calcule en fonction de l'évolution de la compliance par rapport à l'évolution pondérée de son volume de matériau.

$$B_K(x) = \frac{1}{\lambda_K} p \rho(x)^{p-1} E_{ijkl}^0 \varepsilon_{ij}(u_K) \varepsilon_{kl}(u_K) \quad ; K \text{ est l'indice des calculs itératifs}$$

Pour avoir plus de détail sur le calcul des différentes entités présentes ici, en particulier les coefficients de Lagrange λ , se reporter à l'exposé sur l'optimisation topologique de Bendsoe & Sigmund [3].

La démarche de l'optimisation topologique s'applique à un domaine d'une structure muni des frontières sur lesquelles sont imposées des conditions aux limites. On recherche la forme optimale d'une structure donnée qui minimise la fonction-objectif et la régularité des conditions aux limites. Plusieurs travaux ont permis de montrer que la relaxation du problème par utilisation de matériaux homogénéisés constitués localement de vide et du matériau dans une proportion variable entre 0 et 1 et organisés suivant certains types de damiers permettait de rendre le problème bien posé. Dans les grandes lignes, les auteurs [2,4,5] présentent la méthode d'optimisation par homogénéisation par la relaxation du problème d'optimisation topologique en variables discrètes.

3 Etapes d'Optimisation Topologique des modèles

Les cours du domaine Conception mécanique des H.E.I, sur la mécanique des solides déformables, les éléments finis de l'élasticité linéaire et la pratique de conception et modélisation des structures par éléments finis, ... ont permis aux collaborateurs de ces études de mieux comprendre le fonctionnement des logiciels. Différentes influences liées aux caractéristiques géométriques et mécaniques ont été abordées dans ce projet pour valider chaque étude. Grâce aux modèles simples, ils ont pu développer leurs intuitions en termes de fonction-objectif, conditions aux limites et choix de maillage à déclarer au logiciel pour obtenir la rigidité optimale des pièces. Nous présentons dans ce papier des études appliquées au problème d'optimisation de la compliance par la relaxation des structures.

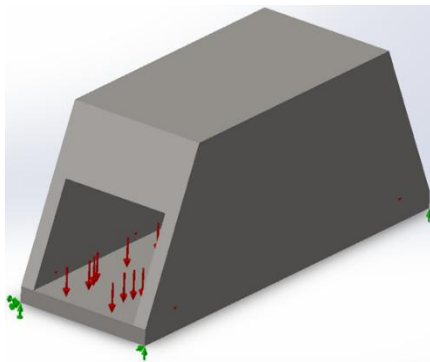


Fig. 1 Pont sous pression

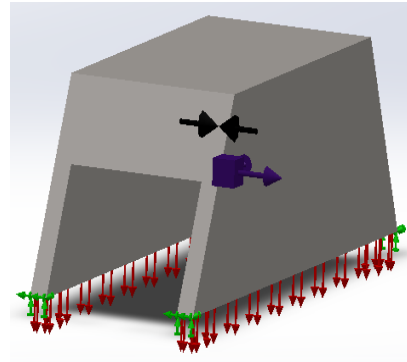


Fig. 2 Pièce à optimiser

Le pont massif est constitué de deux parties modélisées en pièces mécanosoudées :

- La partie haute 300 mm*100mm*100mm
- Le tablier 300mm*100mm*10mm

Zone à optimiser : la partie haute du pont (Fig. 2)

- **Matériau :** Acier inox (AISI 304)
- **Conditions aux limites :** Appuis articulés et simples.
- **Chargement :** Pression = 1 MPa sur la dalle (Fig. 1)
- **Optimisation :** Réduire la masse optimisée à 18% et 26%

Dans la suite, nous proposons une démarche d'apprentissage des critères à mettre en œuvre pour aboutir à un problème bien posé en optimisation.

Les étapes suivies en optimisation de topologie et de fabrication additive sont :

Définir une zone de conception.

Définir la fonction-objectif revient à choisir entre :

- Minimiser l'énergie de déformation et/ou une raideur optimale par rapport au ratio de poids
- Régulariser les surfaces du modèle optimal par lissage

Définir les contrôles de fabrication c'est :

- Spécifier la (es) composante(s) de l'assemblage à ne pas optimiser.
- Spécifier le ou les plans de symétrie

Un logiciel d'optimisation topologique se base sur un modèle C.A.O (Fig. 1), qu'il va soumettre à des simulations numériques itératives. En fonction des résultats en contraintes, le maillage de la pièce subit des allègements afin de mieux remplir les objectifs (de rigidité et de masse).

3.1 Optimisation topologique d'un pont massif

La performance d'une pièce que l'on cherche à améliorer est représentée par une **fonction-objectif**. Un des critères les plus recherchés est le meilleur rapport résistance-poids d'une structure.

Dans la pratique, on utilise la méthode de calcul par éléments finis pour aboutir à un modèle optimal par des analyses itératives de la pièce massive de la Fig. 2 sous SolidWorks. Le résultat optimisé est représenté par le pont en arc de la Fig. 3 (respectivement Fig. 4).

Ainsi, l'optimisation d'une structure est un outil d'aide à la conception amenant à développer un produit avec une raideur optimale. Dans ce contexte, on fait varier la masse initiale "réduire la masse successivement de 74% et 82%

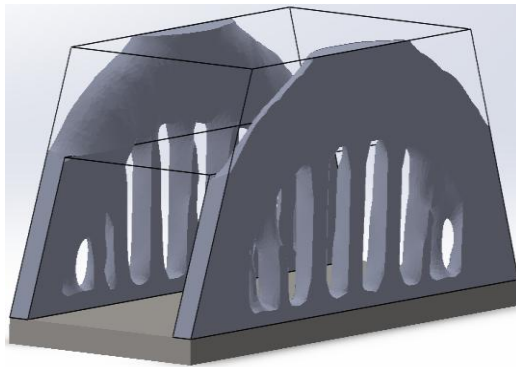


Fig. 3 Pont optimisé à 26%

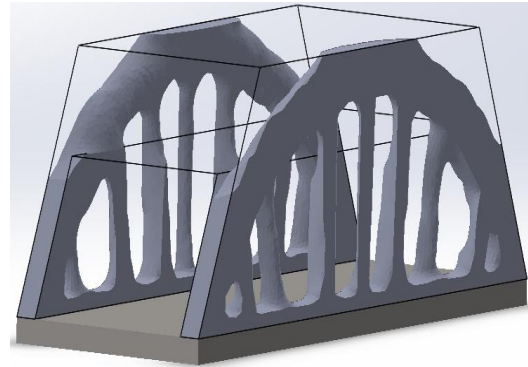


Fig. 4 Pont optimisé à 18%

Nous notons que le premier résultat de l'optimisation topologique fournit une silhouette de la pièce irrégulière dans sa géométrie (Fig. 4). Ainsi, le processus de conception optimale ne s'arrête pas au premier stade. La structure est encore loin d'être réalisable en pratique. Le concepteur doit lisser par une application la silhouette pour générer la répartition de la matière continue et en déduire un autre modèle. La suite est de reprendre l'analyse d'optimisation topologique avec un contrôle permanent de la rigidité.

3.1.1 Maillage Tétraédrique du pont en arc

Une des difficultés majeures de pièces optimisées est la régularisation du gradient de la forme pour empêcher toute incohérence de maillage et garantir un calcul correct.

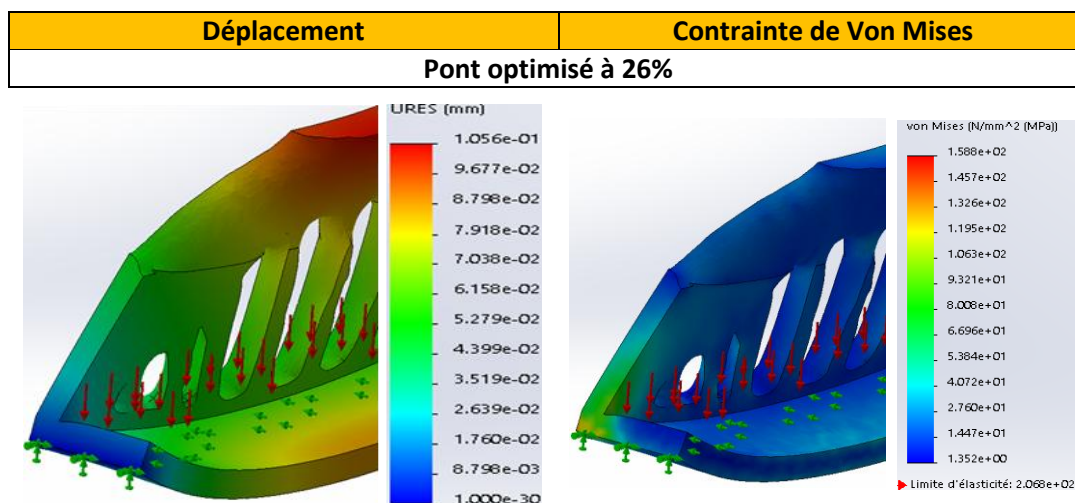


Fig. 5 Résultats d'analyse statique-pont optimisé-chargeement 1MPa

	Analyse pièce initiale	Masse optimisée à 18%	Masse optimisée à 26%
Poids (Kg)	9,632	1,784	2,583
Déplacements max (mm)	0,057	0,11	0,1
Contrainte Max (MPa)	199	167	159

Tableau 1 Résultats d'analyse statique-pont 3D optimisé-chargeement 1MPa

Nous remarquons une diminution de la valeur des contraintes après optimisation à 18% et 26%. La structure optimale est obtenue par une optimisation à 26% de la masse initiale.

3.1.2 Maillage coque associé au tablier et élément 3D aux arcs

La base de départ de ce projet est un choix de maillage en élément 3D, mais l'épaisseur du tablier nous autorise à nous rabattre sur une analyse par des éléments de type coque pour avoir plus de contrôle sur les degrés de liberté en rotation.

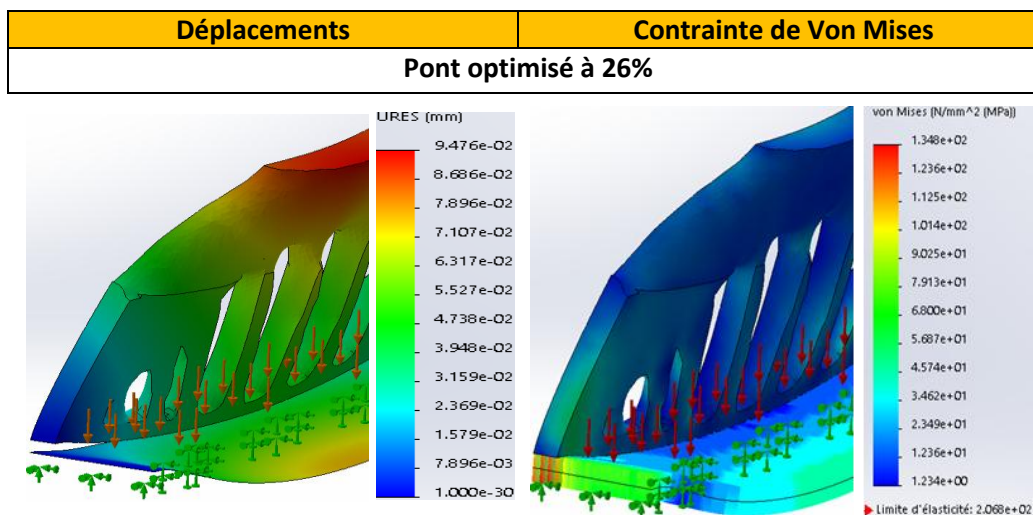


Fig.6 Résultats d'analyse statique-pont optimisé-chargeement 1MPa

	Analyse pièce non optimisée	Masse Optimisée à 18%	Masse optimisée à 26%
Poids (Kg)	9,632	1,768	2,523
Déplacements Maxi (mm)	0,044	0,1	0,095
Contrainte Max (MPa)	169	134	135

Tableau 2 Résultats d'analyse statique-pont optimisé-chargeement 1MPa

Les optimisations à 18% et 26% réalisées sous SolidWorks avec un couplage coque-3D conduisent à une diminution des contraintes maximales comparée au maillage 3D du pont massif. Le maillage coque et les conditions aux limites de la dalle permettent de réduire les contraintes.

3.1.3 Supports munis de liaisons surfaciques du pont en arc

L'objectif de ce paragraphe consiste à vérifier l'influence des tailles surfaciques de supports de la pièce massive ci-dessous. Cette étude permet de ressortir le potentiel du logiciel Abaqus pour obtenir des résultats plus précis conditionnés par la tenue mécanique en service sera donc pris en compte. L'analyse statique pour vérifier la résistance de la pièce optimisée munie de supports de surface carré et/ou rectangulaire permet de retenir celui qui remplit au mieux la fonction-objectif.

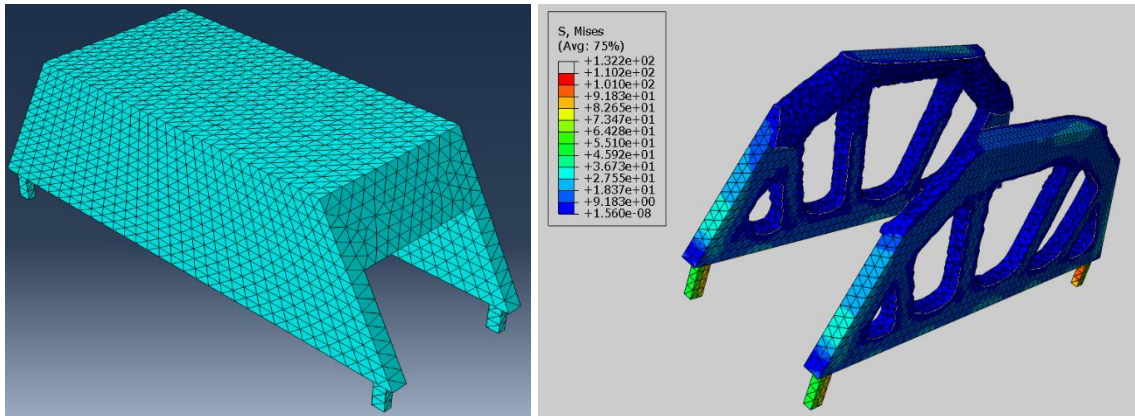
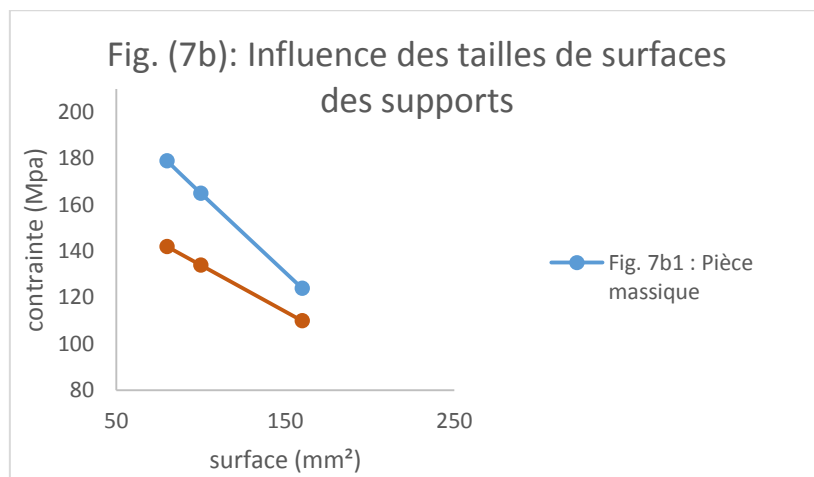


Fig. (7a) Pont sans tablier muni de support avec des liaisons de type surfacique

Les pièces optimisées, munies de support surfaciques vérifient une bonne résistance. En effet, les contraintes maximales restent inférieures à la limite de résistance élastique de l'acier 304 MPa. La courbe de la Fig. (7b) représente une diminution des contraintes maximales lorsque la surface des supports augmente.

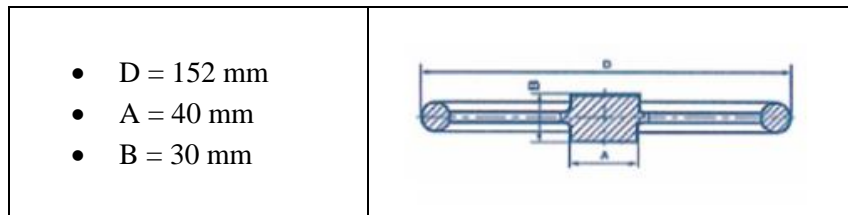


La synthèse des études de l'influence surfacique montre que les résultats numériques du processus d'optimisation ne sont pas liés principalement à la fonction-objectif, aux critères du choix de maillage pour avoir un problème bien posé. Demain le même type de procédé peut être imaginé pour améliorer nos pièces mécaniques en considérant plusieurs objectifs.

4 Optimisation d'un volant de manœuvre plat

Pour cette deuxième étude, nous avons décidé d'optimiser un volant de manœuvre plat. Il permet de déplacer des pièces mais aussi d'ouvrir ou de fermer des vannes.

Caractéristique géométrique du modèle industriel:



Pour réaliser notre étude sous INSPIRE, nous sommes partis du modèle industriel en fonte. Nous avons modifié la zone à optimiser en remplaçant les pièces de manœuvre par un disque d'épaisseur 18mm. De plus, nous avons percé la partie cylindrique centrale du volant pour appliquer un encastrement sur l'alésage et nous avons appliqué un couple de 60Nm sur la partie circulaire extérieure du volant.

La pièce de base présentant une forme optimisée (Fig. (8a)), nous avons rajouté de la matière sur la partie intérieure du volant (Fig. (8b)). Ceci simplifie la pièce afin de ne pas biaiser l'optimisation topologique. Pour les différentes analyses nous avons utilisé un maillage de **4mm**.

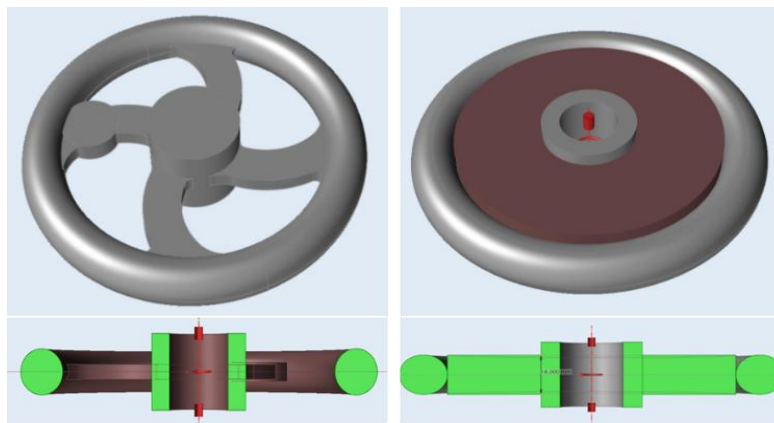


Figure (8a) : Modèle industriel

Figure (8b) : Modèle simplifié

Avec un critère limitant la masse à 5% de la **pièce simplifiée** et une fonction-objectif qui maximise la rigidité, nous avons obtenu le modèle optimisé (Fig.(9a)).

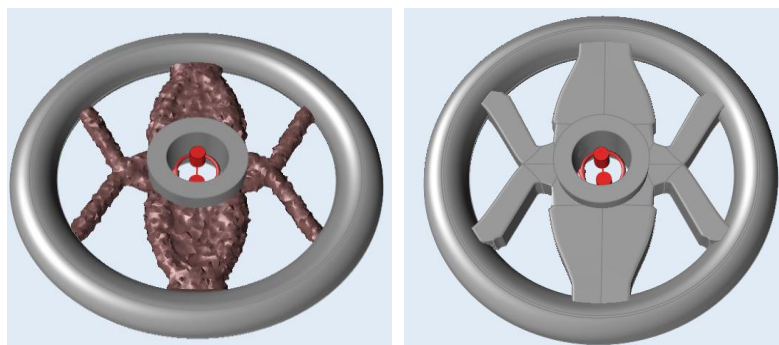


Fig. (9a) Modèle optimisé

Fig. (9b) Modèle du lissage

Nous obtenons une pièce présentant des caractéristiques mécaniques performantes en termes de poids et de rigidité. Par conséquent, nous avons décidé de poursuivre l'étude et de lisser la pièce en utilisant la fonction de lissage du module PolyNURBS (Fig. (9b))

	Modèle simplifié	Modèle optimisé à 5%	Modèle avec Lissage PolyNURBS
Poids (kg)	3,6	1,203	1,641
Déplacement maximum (mm)	0,017	0,006	0,004
Contrainte maximale (Mpa)	38,3	11,1	10,6

Tableau 3 Résultats d'analyse statique-Volant de manœuvre

Le modèle du lissage (Fig. 9b) donne une contrainte optimale et permet une meilleure définition des surfaces de la forme optimisée afin de faciliter la reconstruction automatique d'un modèle CAO à partir des résultats d'optimisations.

CONCLUSION

La synthèse des études montre que le logiciel Inspire est performant pour les lissages des pièces obtenues pendant le processus d'optimisation. Nous notons que les Industriels font une combinaison d'Inspire et des calculs numériques du logiciel Hyper-Mesh. Cependant, les résultats numériques avec des maillages fins, de type linéaire ou quadratique, sous SolidWorks et plus particulièrement Abaqus sont plus précis. Ceci peut être dédié aux choix de l'utilisateur des types de maillages (combinaison élément volumique-élément coque) et des conditions aux limites pour avoir un problème bien posé en éléments finis.

Cette contribution a pour objectif de mieux intégrer les méthodes d'optimisation topologique au sein de l'enseignement initiale des écoles pour rendre efficace le processus de développement de produits par la CAO. Grâce à ce projet, les élèves ont découvert les techniques d'optimisation topologique et la fabrication additive. Cela leur fait prendre conscience des nouvelles possibilités que ces technologies offrent. Ils ont pu s'initier à la fabrication additive avec des polymères. Ces processus sont désormais une alternative très intéressante aux moyens de fabrications traditionnelles.

Références

- [1] M.P. Bendsøe, N. Kikuchi, Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method; Computer methods in applied mechanics and engineering, (1988) 197-224.
- [2] P. Duisynx, 'Optimisation Topologique : du Milieu Continu à la Structure Elastique' Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées 7 Février 1996.
- [3] Bendsøe M. P., Sigmund O., *Topology Optimization*, Springer, Berlin, 2003
- [4] Th. Vincent, 'Optimisation topologique des structures, Implémentation d'aide à la conception basés sur les méthodes d'optimisation topologique d'homogénéisation. PhD thesis, ENSAM-Lille France & OPTIS University of Sherbrook Canada 2007
- [5] B. Desmorat, 'Optimisation de Structures Composites' PhD thesis, Laboratoire de Modélisation et Mécanique des Structures, Université Paris 6 / CNRS, 19 décembre 2002.