



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Optimización topológica con TOSCA

Autor:

Merino Tejedor, Carlos

Blanca Giménez Olavarría

Arts et Métiers ParisTech (ENSAM)

Valladolid, Julio 2019.

TFG REALIZADO EN PROGRAMA DE INTERCAMBIO

TÍTULO: Optimisation topologique via TOSCA

ALUMNO: Carlos Merino Tejedor

FECHA: 25/06/2018

CENTRO: Arts et Métiers ParisTech (ENSAM)

TUTOR: **Eric MONTEIRO**

RESUMEN

La fabricación aditiva permite la creación de geometrías con un diseño no convencional. Este diseño puede ser obtenido por optimización topológica. La ENSAM ha adquirido la licencia del programa de optimización topológica llamado TOSCA de la empresa Dassault Systèmes. El objetivo de este trabajo es realizar una introducción de los métodos de optimización más utilizados actualmente y mostrar como el programa TOSCA trabaja basándose en el método Solid Isotropic Material with Penalisation (SIMP).

Palabras clave

Optimización, topológica, estructural, TOSCA, SIMP.



PJE09 (PA-M18175)

ENSEIGNANT ENCADRANT

Eric MONTEIRO

ETUDIANT

Carlos MERINO

Résumé et mots clés

Dans le cadre de mon troisième année aux Arts et Métiers ParisTech, J'ai pris part à un projet en autonomie tout au long du deuxième semestre. Ce projet m'a été proposé par le professeur encadrant, monsieur Eric MONTEIRO. L'objectif de ce projet est de se familiariser avec l'outil Tosca et de faire remonter les premières remarques sur son utilisation.

Mots clés : Optimisation topologique, Tosca, Abaqus, SIMP, Arts et Métiers ParisTech, ENSAM.

Table des matières

Résumé et mots clés	2
Table des illustrations	4
Rapport	5
Introduction à l'optimisation topologique.....	5
Différentes méthodes	5
Evolutionary Approaches (EA) methods	5
Evolutionary Structural Optimization (ESO)	5
Soft-Kill Option (SKO).....	6
Level-set based methods.....	7
SIMP	7
Logiciel TOSCA Structure	9
Définition du type d'optimisation 	9
Définition des variables 	15
Définition de la variable à optimiser (fonction objectif) 	16
Définition des contraintes 	16
Définition des contraintes géométriques 	17
Job (optimization process) 	17
Mise en œuvre TOSCA.....	18
Conclusion	21
Bibliographie.....	22
References	22

Table des illustrations

FIGURE 1: OPTIMISATION AVEC UNE LONGUEUR CHROMOSOME VARIABLE.	5
FIGURE 2: OPTIMISATION AVEC LE PROCEDE SKO. A) LE VOLUME A OPTIMISER; B) LE MODELE OPTIMISE; C) LE MODELE CAO FINAL	7
FIGURE 3: COMPARAISON DE $H(P) = P^P$. IL MONTRE L'IMPORTANCE DU FACTOR DE PENALISATION. [DEATON ET GRANDHI].....	9
FIGURE 4: LISTE D'ICONS DANS LE MODULE D'OPTIMISATION.	9
FIGURE 5: CHOIX DU TYPE D'OPTIMISATION.....	10
FIGURE 6: PARAMETRES BASIQUES DE L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE.	10
FIGURE 7: PARAMETRES DENSITY DE L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE.....	11
FIGURE 8: PARAMETRES PERTURBATION DE L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE.....	12
FIGURE 9: PARAMETRES CONVERGENCE DE L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE.	13
FIGURE 10: PARAMETRES ADVANCED (GENERAL OPTIMIZATION) DE L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE.	14
FIGURE 11: PARAMETRES ADVANCED (CONDITION-BASE OPTIMIZATION) DE L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE.....	15
FIGURE 12: CHOIX DE VARIABLES POUR L'OPTIMISATION.	15
FIGURE 13: DEFINITION DE LA FONCTION OBJECTIF.	16
FIGURE 14: DEFINITION DES CONTRAINTES D'OPTIMISATION.	16
FIGURE 15: CONTRAINTES GEOMETRIQUES.	17
FIGURE 16: JOB (OPTIMIZATION PROCESS).	17
FIGURE 17: AFFICHER LE PLOT DE L'OPTIMISATION.	18
FIGURE 18: GEOMETRIE A OPTIMISER.	18
FIGURE 19: CHARGES ET CONDITIONS LIMITES DU PROBLEME.....	19
FIGURE 20: VARIABLES D'OPTIMISATION.	19
FIGURE 21: FONCTION OBJECTIF.....	20
FIGURE 22: CONTRAINTE DE LA FONCTION OBJECTIF.....	20
FIGURE 23: OPTIMISATION TOPOLOGIQUE TOSCA.	21

Rapport

Introduction à l'optimisation topologique

De nos jours, il est demandé aux ingénieurs d'obtenir la structure optimale selon une condition imposée, par exemple, minimiser la masse totale ou le volume, maximiser la raideur, minimiser la tension, minimiser le coût de production, etc. L'optimisation en calcul des structures est le procédé qui nous permet de déterminer une distribution du matériau pour atteindre ces conditions. Trois différentes méthodes d'optimisation sont possibles: structurale, de forme ou topologique. C'est dans la dernière forme d'optimisation qui nous intéressera dans ce rapport.

Différentes méthodes

L'optimisation topologique est un outil très puissant qui devient progressivement un élément clé dans la conception beaucoup produits et structures. Il consiste à calculer la distribution optimale du matériau, avec un objectif donné, un volume initial et des contraintes données. Il devient de plus en plus un outil attractif et important dans la partie pratique de l'ingénierie. Dans les dernières décennies, les méthodes d'optimisation topologique les plus utilisées ont été l'Evolutionary Approaches(EA) methods, level-set based methods, Soft-Kill Option (SKO), Evolutionary Structural Optimization (ESO) et Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP).

Evolutionary Approaches (EA) methods

Une condition pour pouvoir utiliser cette méthode est, quand nous avons un problème 2D, d'utiliser un élément carré pour notre maillage, et pour un problème 3D nous devons utiliser un élément hexaédrique. Chaque élément peut avoir une valeur de 0 (s'il est vide) ou de 1 (s'il y a de la matière). Cette condition est donnée car EA est un algorithme génétique et ils ont besoin d'être du même ordre de grandeur pour avoir une solution qui converge. Cette technique est très coûteuse parce qu'il est nécessaire de réaliser beaucoup d'analyses d'éléments finis.

Pour réduire l'ordre de complexité du calcul, l'analyse commence avec un maillage grossier et s'affine à chaque itération comme nous pouvons s'apercevoir dans l'image ci-dessous :

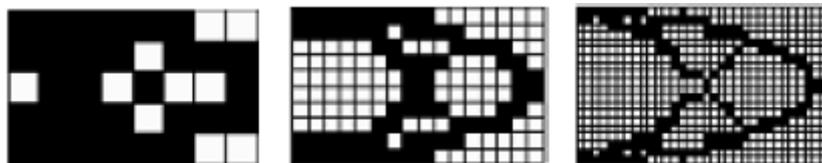


Figure 1: Optimisation avec une longueur chromosome variable.

(Source de l'image: RAZVAN, CAZACU, 2014, OVERVIEW OF STRUCTURAL TOPOLOGY OPTIMIZATION METHODS FOR PLANE AND SOLID STRUCTURES. ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY.)

Evolutionary Structural Optimization (ESO)

Il est une méthode « hard-kill », ça veut dire que les éléments prendront une valeur de 0 (ils seront vides) ou 1 (il y aura de matière).

Le première ESO proposée commence par un volume plein et élimine à chaque itération les éléments inadapés. Plus tard, AESO (Additive Evolutionary Structural Optimization) va être proposée. La démarche d'AESO consiste à commencer avec une structure qui joint le chargement et les conditions limites avec le moins d'éléments possible. Ensuite, plus éléments vont être ajoutés dans les zones qui sont plus sensibles (la variation de l'énergie de déformation a une importance plus élevée dans cet élément). Les deux méthodes ont des limites, c'est pour cela qu'une combinaison entre ces deux a été développée, elle a été appelée BESO (Bidirectional Evolutionary Structural Optimization). La procédure suivie par cette méthode est d'éliminer les éléments inefficients (ESO) et d'affiner les éléments les plus sensibles (AESO).

L'optimisation BESO constitue à minimiser une fonction objectif $C(X)$, avec la contrainte de V^* .

$$C(\mathbf{X}) = \frac{1}{2} [\mathbf{F}]^T [\mathbf{u}]$$

$$V^* - \sum_{e=1}^N V_e x_e = 0, \quad x_e = \{0, 1\}$$

\mathbf{F} : représente le vecteur de forces extérieures.

\mathbf{u} : le vecteur déplacement des noeuds.

V_e : le volume de l'élément e .

x_e : la valeur de l'élément qui est 0 (vide) ou 1 (avec de la matière).

\mathbf{X} : le vecteur conception de notre optimisation

Soft-Kill Option (SKO)

Ce procédé implique une méthode soft-killer, ce qui veut dire que les éléments vont prendre une valeur entre 0 et 1 (avec des décimales). Néanmoins, ce procédé ressemble beaucoup à la technique BESO (qui est une hard-killer), SKO ajoute ou élimine des éléments du modèle en lien avec la sensibilité de chaque élément. De plus, les propriétés mécaniques du matériau, supposé élastique linéaire, sont pondérées en fonction de la valeur de l'élément considéré. Cela veut dire que chaque élément prendra une module d'Young compris entre $[E_{\min}, E_{\max}]$, en fonction de la valeur (ou « température ») de l'élément prise dans l'intervalle $[0, 1]$. La fonction objectif de cette méthode est la suivante :

$$\mathbf{T}_k^{(i)} = \mathbf{T}_k^{(i-1)} + s(\sigma_k - \sigma_{\text{ref}})$$

$\mathbf{T}_k^{(i)}$: est la température désignée dans l'itération i .

$\mathbf{T}_k^{(i-1)}$: est la température dans l'itération d'avant.

σ_{ref} : est la contrainte que nous sommes entrain de cibler.

σ_k : est la contrainte actuel dans cet élément.

s : est un facteur d'échelle appliqué à la différence des contraintes.

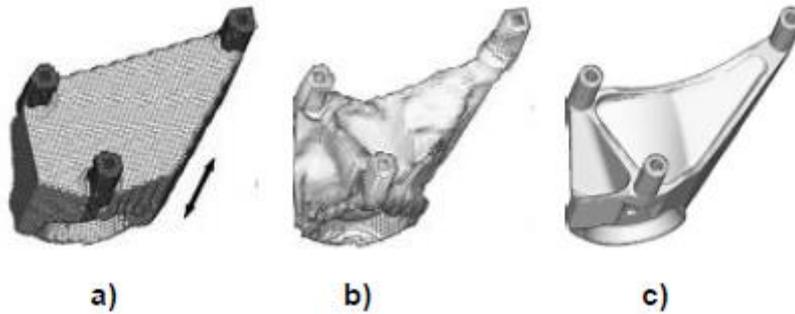


Figure 2: Optimisation avec le procédé SKO. a) Le volume à optimiser; b) le modèle optimisé; c) le modèle CAO final

(Source de l'image: RAZVAN, CAZACU, 2014, OVERVIEW OF STRUCTURAL TOPOLOGY OPTIMIZATION METHODS FOR PLANE AND SOLID STRUCTURES. ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY.)

Level-set based methods

L'idée principale dans cette méthode d'optimisation approchée est la représentation d'une structure volumique avec une fonction continue auxiliaire (F), l'objectif de cette méthode étant d'optimiser cette fonction F. Le nombre de variables que nous allons trouver est égal à la somme des dimensions d'espace considérées (x, y et z dans le cas 3D). L'optimisation est réalisée par la variation des paramètres de la fonction auxiliaire et par l'interprétation géométrique. Nous allons trouver une fonction objectif de la forme :

$$\Gamma = \{(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \mid F(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = 0\}$$

Où :

Γ : est la surface du volume. Cette fonction aura un nombre de variables égal au nombre de dimensions spatiales du problème moins un (n-1).

Et notre structure va être définie dans les domaines où notre fonction F est positive

$\rho=0$ quand $F < 0$

$\rho=1$ quand $F \geq 0$

SIMP

La méthode SIMP, connue aussi comme « density method », est la plus utilisée dans les logiciels professionnels et c'est la méthode utilisée dans le logiciel TOSCA. SIMP est un soft killer, les valeurs des éléments prennent une valeur entre 0 et 1, où 0 signifie qu'il n'y a pas de matière, 1 représente un élément plein (hard élément) et une valeur décimale veut dire qu'il y a une fraction de la matière (soft élément).

Nous avons notre structure divisée par N éléments, chaque élément e a une masse volumique matérielle fractionnaire. La fonction objectif est l'énergie de déformation avec une contrainte qui est un pourcentage de notre volume principal V^* . La fonction objectif à optimiser est la suivante :

$$SE(\mathbf{P}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p [\mathbf{u}_e]^T [\mathbf{k}_e] \mathbf{u}_e$$

Avec les contraintes suivantes :

$$V^* - \sum_{e=1}^N V_e \rho_e = 0$$

$$0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1$$

Dans les équations nous avons les suivantes variables:

u_e : est le vecteur du déplacement de l'élément e .

k_e : est la matrice de raideur de l'élément e .

ρ_e : est la masse volumique de l'élément e .

ρ_{\min} : est un palier de masse volumique en dessous duquel on considère que celle-ci est nulle.

p : est le facteur de pénalisation.

Le facteur de pénalisation occupe un rôle assez important dans l'optimisation SIMP. L'ordre de grandeur du p va nous donner l'impact de la masse volumique fractionnaire ($0 < \rho_i < 1$) sur la simulation. Avec une valeur grande de p , nous allons trouver moins d'éléments avec une masse volumique fractionnaire. La valeur de p varie dans la littérature scientifique, certains auteurs (Zhou, Pagaldipti, Thomas et Shyy) préconisent de le choisir dans l'intervalle [2-4], d'autres (Sigmund) conseillent un $p=3$ ou encore (Rozvany) qu'il faut partir d'un $p=1$ et l'incrémenter progressivement.

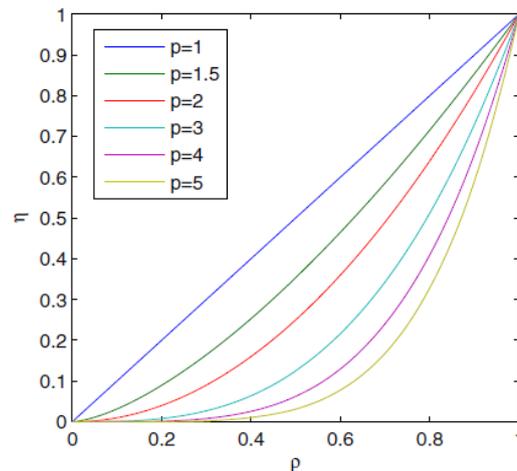


Figure 3: Comparaison de $\eta(\rho) = \rho^p$. Il montre l'importance du factor de pénalisation. [deaton et grandhi]

(Source de l'image: RAZVAN, CAZACU, 2014, OVERVIEW OF STRUCTURAL TOPOLOGY OPTIMIZATION METHODS FOR PLANE AND SOLID STRUCTURES. ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY.)

Stolpe et Svanberg ont proposé autre méthode appelée Rational Approximation of Material Properties (RAMP). Avec cette méthode nous pouvons éviter les problèmes trouvés avec la méthode SIMP quand il y a une densité base.

Logiciel TOSCA Structure

Nous pouvons utiliser Tosca sur le logiciel Abaqus, dans le module d'optimisation. Dans ce module nous allons trouver les suivants icônes dans la barre d'outils pour atteindre notre optimisation :



Figure 4: Liste d'icônes dans le module d'optimisation.

Définition du type d'optimisation

Cet outil nous permet définir le type d'optimisation que nous allons réaliser et la méthode d'optimisation à suivre. La définition du type d'optimisation est la première chose que nous devrons choisir.

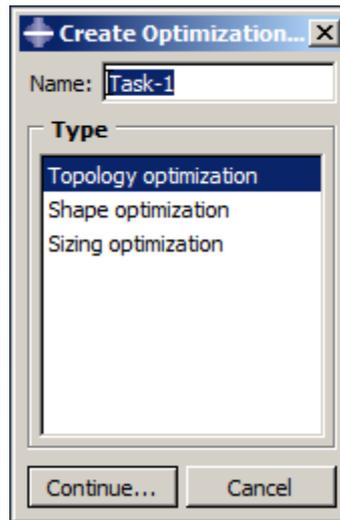


Figure 5: Choix du type d'optimisation

Dans ce rapport il nous intéresse l'optimisation topologique. Ensuite, nous pouvons observer une fenêtre avec 5 onglets (Basic, Density, Perturbation, Convergence et Advanced).

L'onglet basic va nous permettre de congeler les surface avec charges ou conditions limites. Il est recommandé de les congeler, parce que normalement nous ne voulons pas avoir ces zones optimisées. De plus, il nous permettra atteindre un nombre plus petit d'itérations.

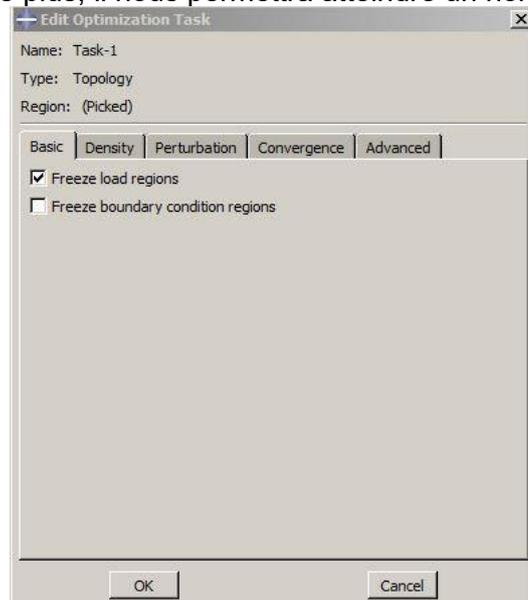


Figure 6: Paramètres basiques de l'optimisation topologique.

L'onglet Density nous permet de changer la fréquence laquelle l'optimisation met à jour la masse volumique relative.

- Density update strategie : La stratégie par défaut est la normale mais si nous trouvons des problèmes pour satisfaire les contraintes nous devons changer à une fréquence plus conservative.
- Initial density : Nous pouvons laisser l'optimisation de déterminer la masse volumique initial par défaut, de cette façon, si le volume est une contrainte le

logiciel calculera la masse volumique initiale, ou se le volume est une fonction objectif chaque élément aura une masse volumique relative au 50%.

Si nous choisissons Specify, nous devons l'utiliser que dans le cas que le volume est la fonction objectif et il doit être une valeur entre 0 et 1 ($0 < \text{Initial density} < 1$).

- Minimum density : il correspond au ρ_{\min} que nous avons déjà commenté dans le paragraphe SIMP.
- Maximum density : Il correspond au ρ_{\max} , il est la masse volumique maximale que peut avoir chaque élément. Il n'est pas recommandé de changer cette valeur
- Maximum change per design cycle : Il est le changement plus grand dans la masse volumique dans chaque itération. La valeur par défaut est bonne. Si l'optimisation est compliquée il sera nécessaire que nous réduisions à 0.1 par exemple. Néanmoins nous aurons plus d'itérations.

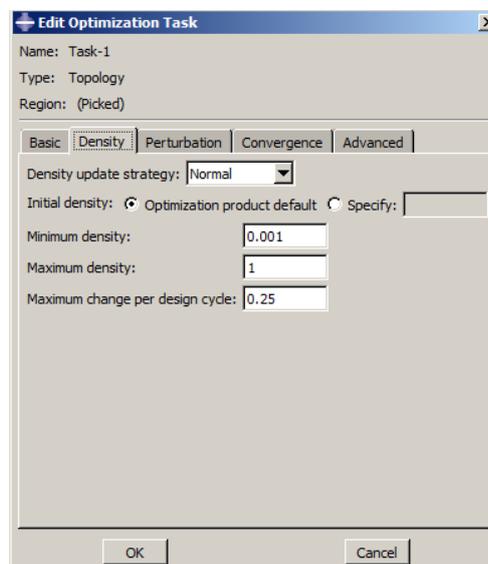


Figure 7: Paramètres Density de l'optimisation topologique.

L'onglet Perturbation nous permet de calculer les modes propres (cinq par défaut). Nous pouvons marquer la zone où nous voulons calculer les modes propres.

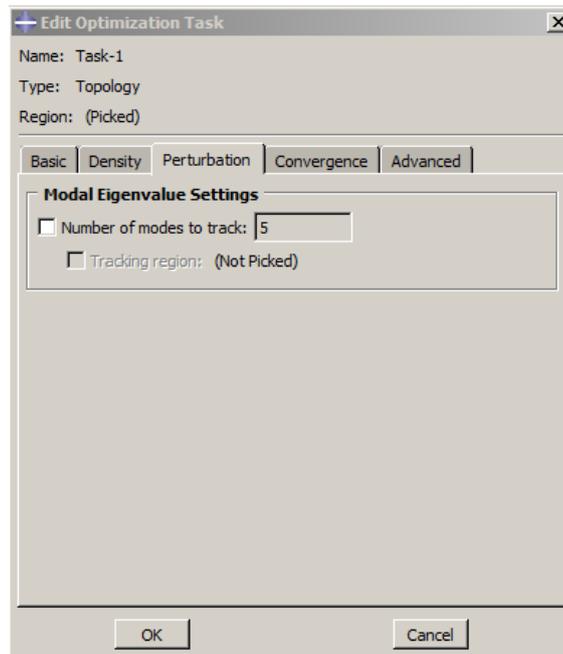


Figure 8: Paramètres Perturbation de l'optimisation topologique.

L'onglet convergence nous permet de définir les paramètres de convergence pour obtenir une solution.

- First design cycle used to evaluate criteria: Nous pouvons spécifier à partir de quelle itération Nous voulons commencer à vérifier les deux critères de convergence. La valeur par défaut est à partir du la quatrième itération.
- Criteria to be fulfilled : il nous permet de prendre l'option d'arrêter l'optimisation quand l'un ou les deux critères sont atteints. Le logiciel a both comme de la valeur par défaut.
- Objective function delta criterion : Nous pouvons spécifier le critère d'arrête de l'optimisation pour une augmentation dans la fonction objectif d'une itération à l'autre. Nous avons une valeur de 0.001 par défaut.
- Element density delta criteria : Nous pouvons spécifier le critère d'arrête de l'optimisation pour un changement dans la masse volumique de l'élément d'une itération à l'autre. Nous avons une valeur de 0.005 par défaut.

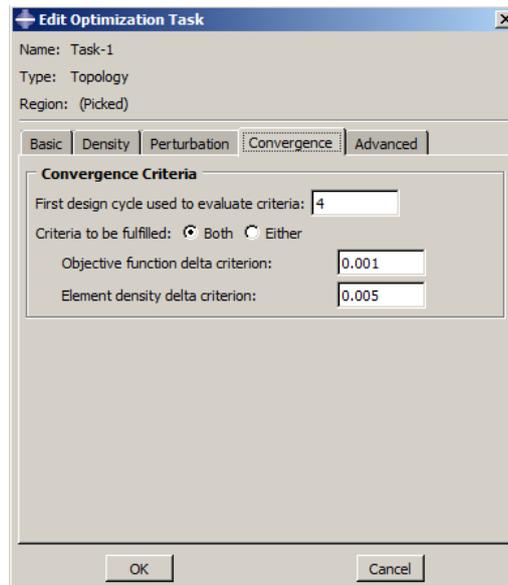


Figure 9: Paramètres Convergence de l'optimisation topologique.

L'onglet Advanced : dans l'algorithme « *General optimization* » (SIMP), nous pouvons cocher *Delete soft elements*, cette option nous permet de éliminer des *soft* éléments qui ont une masse volumique relative inférieure à un ($0 < \text{masse volumique relative} < 1$). Les éléments éliminés sont réactivés s'il est nécessaire.

Pour éviter d'éliminer *soft* éléments isolés nous pouvons sélectionner l'option *Delete only if neighbors are soft within a radius*. Nous pouvons choisir le rayon qui est la moyenne de la longueur du bord de l'élément (*Average edge length*) ou spécifier une valeur de notre rayon (*Specify*).

Si nous avons choisi *delete soft elements*. Il nous permettra choisir la méthode d'éliminer des éléments :

- *Favor continuity (Standard)* et le seuil de masse volumique relative du matériau (*Relative material density threshold*) : l'optimisation va vérifier la continuité des éléments avant d'éliminer les *soft* éléments. S'il y a un bloc de *hard* éléments (Masse volumique relative=1) isolé par *soft* éléments, l'optimisation ne supprimera pas les *soft* éléments
- *Favor continuity (Agressive)* le seuil de masse volumique relative du matériau (*Relative material density threshold*) : l'optimisation ne va pas vérifier la continuité des éléments avant d'éliminer les *soft* éléments.
- *Maximum shear strain* et *Maximum shear strain threshold*: l'optimisation va éliminer les éléments avec une déformation de cisaillement plus grand que le seuil.
- *Minimum principal strain* et *Minimum principal strain threshold*: l'optimisation va éliminer les éléments avec une déformation principale plus petite que le seuil.
- *Maximum elastoplastic strain* et *Maximum elastoplastic strain threshold*: l'optimisation va éliminer les éléments avec une déformation élastoplastique plus grand que le seuil.
- *Volume compression* et *Relative volume compression* : l'optimisation élimine les éléments qui sont compressés et qu'ils ont un volume relatif plus petit que le seuil.

Finalement, nous pouvons choisir la méthode d'interpolation :

- L'*optimisation product default* (SIMP) calcule une relation entre la masse volumique et la raideur pour les soft éléments.
- La méthode SIMP (solid isotropic material with penalization) calcule une relation exponentielle entre la masse volumique et la raideur.
- La méthode RAMP est plus utilisée pour problèmes dynamiques.

Nous pouvons changer la valeur du facteur de pénalisation dans notre optimisation.

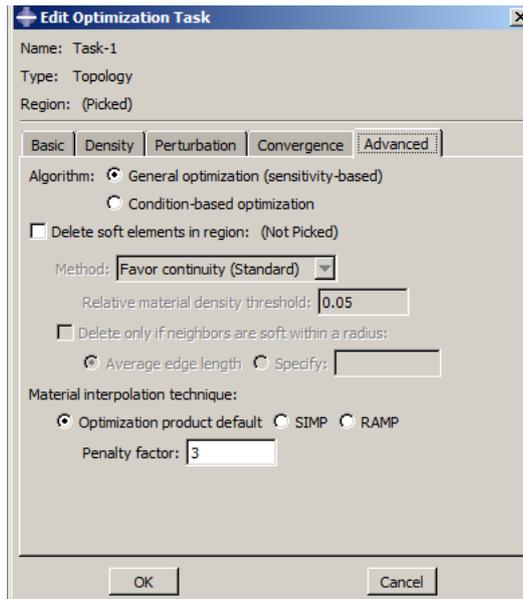


Figure 10: Paramètres Advanced (General optimization) de l'optimisation topologique.

Dans l'algorithme *Condition-based Optimization* le logiciel va prendre comme fonction objectif l'énergie de déformation et le volume comme contrainte. Nous pouvons définir un nombre maximum d'itérations pour faire notre optimisation.

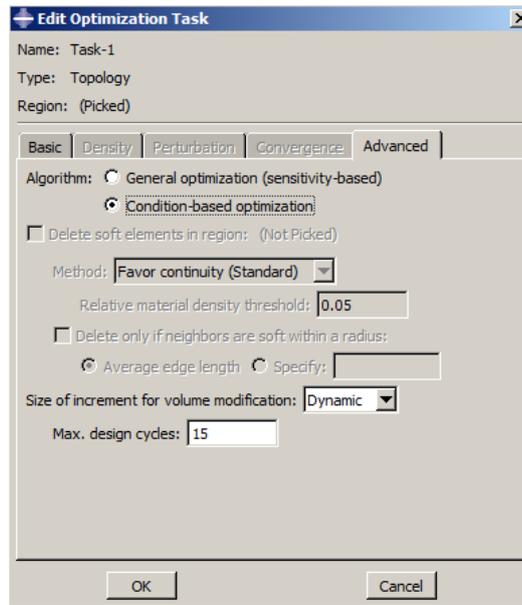


Figure 11: Paramètres Advanced (Condition-base optimization) de l'optimisation topologique.

Définition des variables

Avec cet outil nous allons définir nos variables à prendre en compte dans l'optimisation. Par exemple, le volume, la déformation plastique, etc.

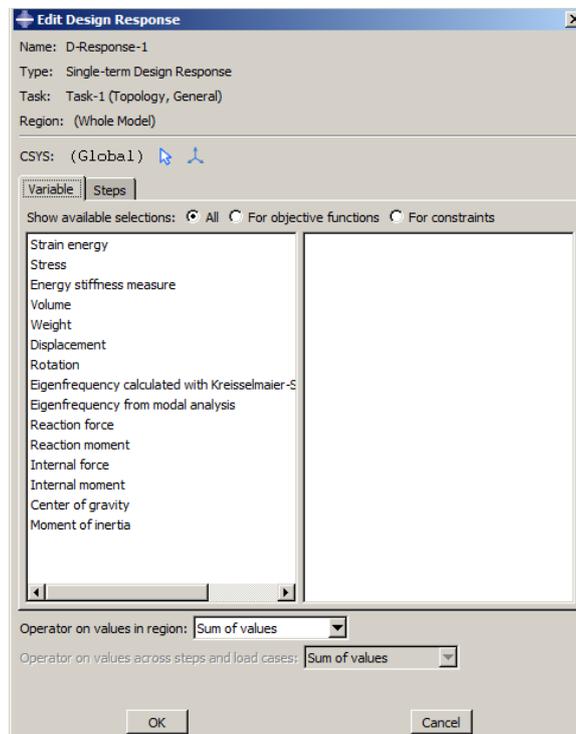


Figure 12: Choix de variables pour l'optimisation.

Définition de la variable à optimiser (fonction objectif)

Grâce à cet outil nous pouvons définir notre fonction objectif. Nous devons indiquer la variable à minimiser ou maximiser selon notre objectif.

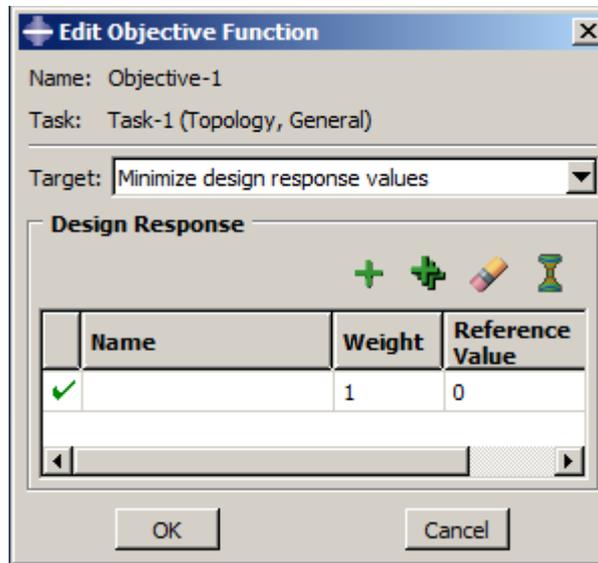


Figure 13: Définition de la fonction objectif.

Définition des contraintes

Nous pouvons préciser les contraintes de notre optimisation avec cet icône . Nous devons indiquer la variable contrainte et la condition.

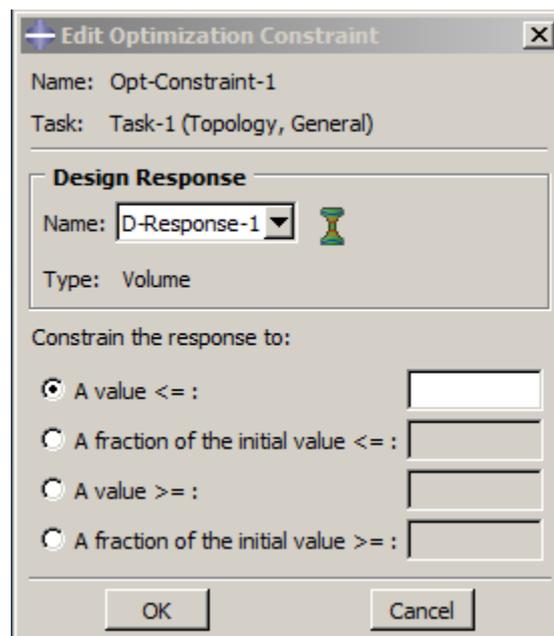


Figure 14: Définition des contraintes d'optimisation.

Définition des contraintes géométriques

Nous pouvons ajouter de différentes contraintes géométriques dans notre optimisation telles qu'une surface congelée (ne modifier pas une zone de notre structure).

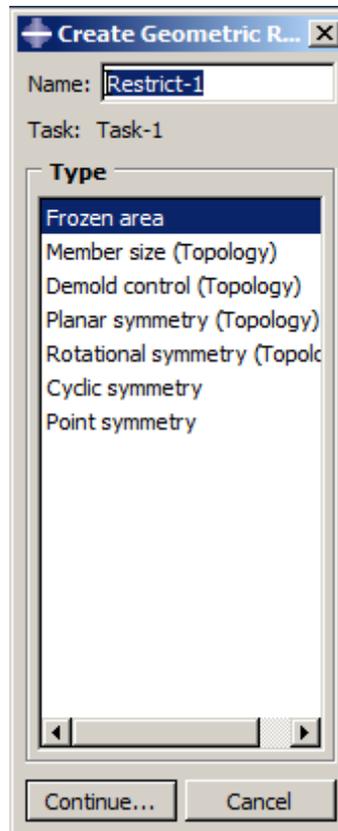


Figure 15: Contraintes géométriques.

Job (optimization process)

Finalement pour lancer la simulation nous devons la réaliser en appuyant cet icône  qui apparait dans le module « Job ». Nous pouvons choisir le nombre d'itérations maximums dans notre optimisation dans l'onglet *Optimization*.

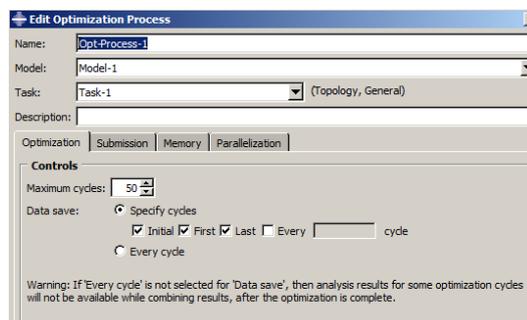


Figure 16: Job (optimization process).

Pendant la simulation nous pouvons observer la convergence de notre simulation quand nous sommes, si nous faisons click sur *Plot* dans l'option monitor de notre manager de jobs

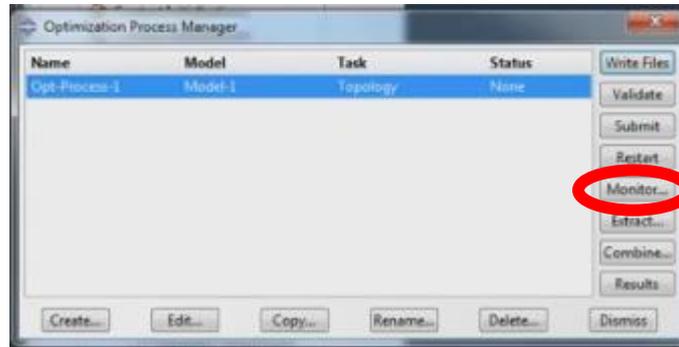


Figure 17: Afficher le plot de l'optimisation.

Mise en œuvre TOSCA

J'ai réalisé une optimisation d'un pont pour vérifier le fonctionnement de Tosca. J'ai commencé avec une géométrie donnée à optimiser :

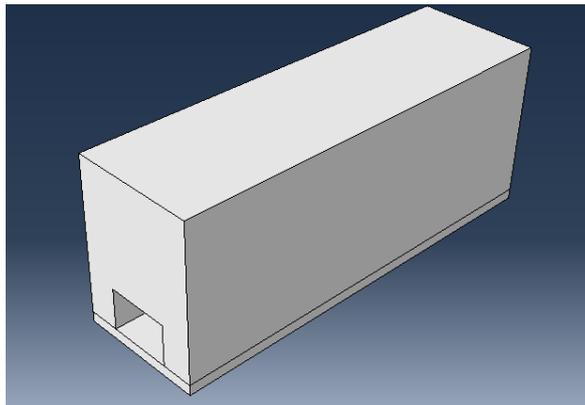


Figure 18: Géométrie à optimiser.

Ensuite, j'ai défini la parti d'Abaqus (unités : mm et tons) avec :

- Matériau : Aluminium ($\rho=2.9 \cdot 10^{12}$ [kg*m⁻³]; E=70 [GPa] ; $\nu=0.33$)
- Step: Static.
- Load: Pressure; 10 [MPa]

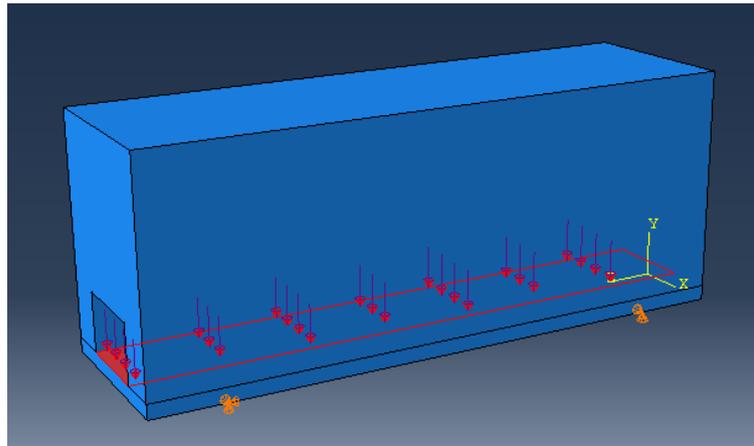


Figure 19: Charges et conditions limites du problème.

- Maillage avec des éléments hexaédriques (64800 éléments).

L'algorithme utilisé est « General optimization (sensitivity-based) » et un facteur de pénalisation de valeur 3.

Les variables définies sont l'énergie de déformation et le volume :

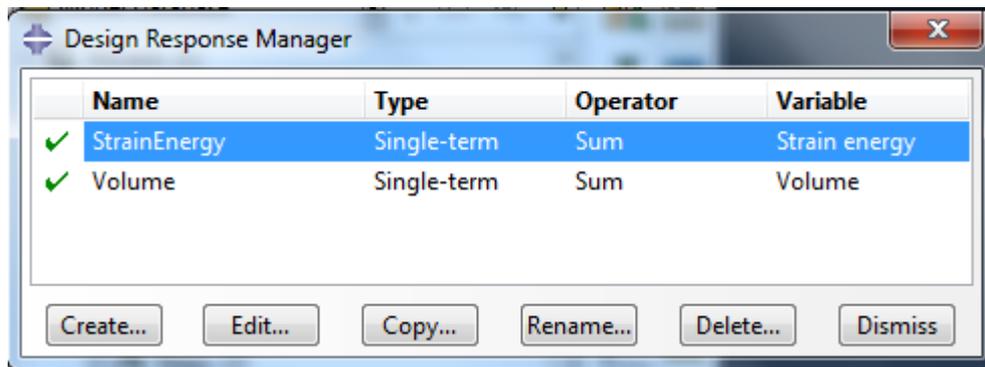


Figure 20: Variables d'optimisation.

Notre fonction objectif devra minimiser l'énergie de déformation :

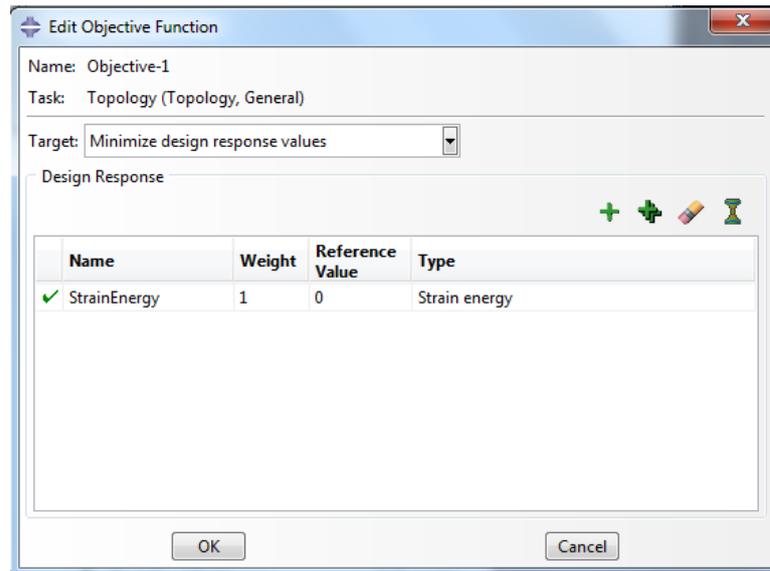


Figure 21: Fonction objectif.

Avec une contrainte d'une fraction de notre volume initial ($V^*=0.1 \times V_{ref}$) :

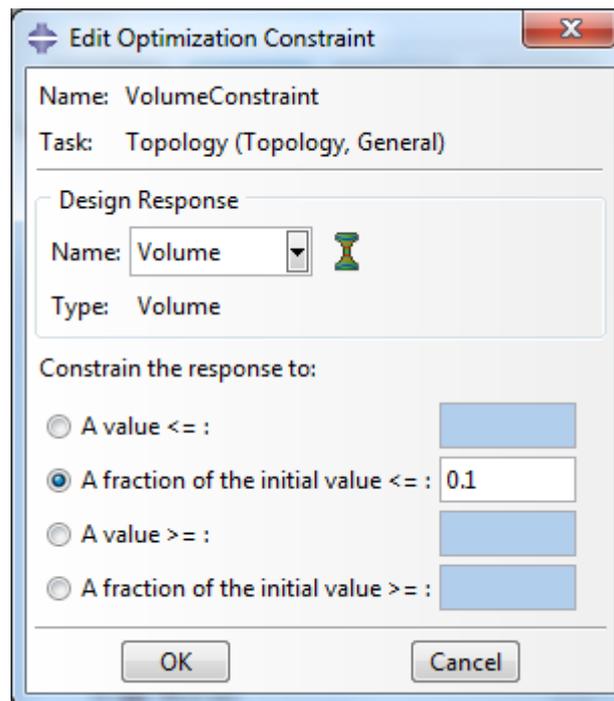


Figure 22: Contrainte de la fonction objectif.

Finalement après 34 itérations et une durée totale de 1h40 j'ai réussi à visualiser l'optimisation :

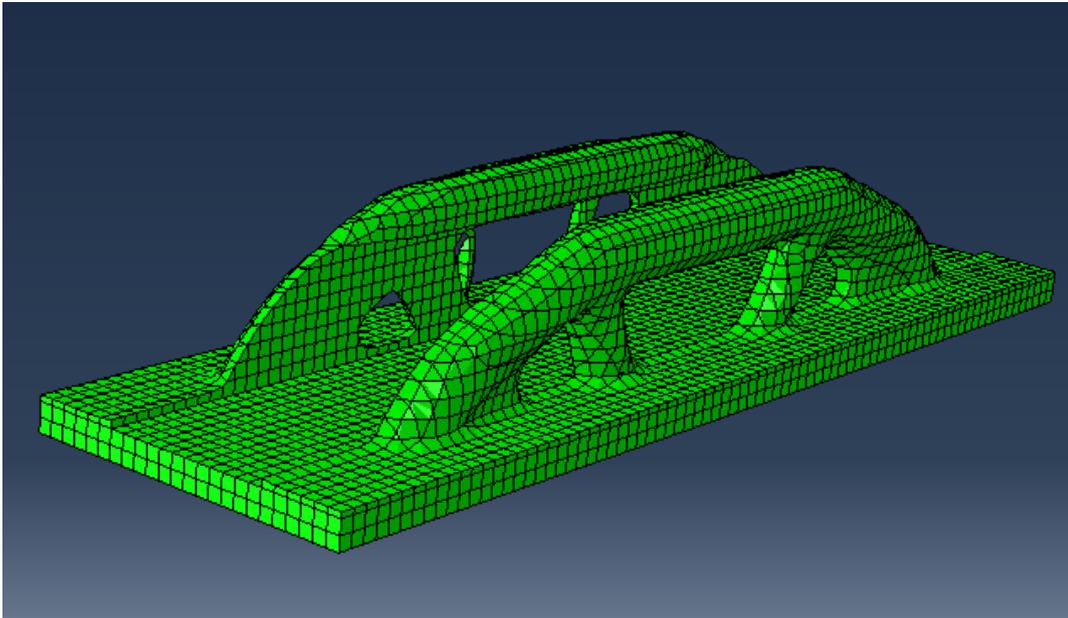


Figure 23: Optimisation topologique Tosca.

Conclusion

TOSCA est le premier logiciel d'optimisation topologique que j'aie été amené à utiliser, je dispose donc d'assez peu d'éléments de comparaison. Néanmoins, il est clair que ce logiciel possède une interface intuitive à travers laquelle il est possible d'observer cinq étapes clef de l'optimisation :

- Le choix du type d'optimisation (structurale/forme/topologique) dans lequel la partie optimisation dispose d'un large éventail de paramètres sur lequel il est possible de jouer.
- Les variables à prendre en compte pour l'optimisation.
- Les variables optimisées à travers la fonction objectif.
- Les variables concernées par des contraintes d'optimisation.
- Les contraintes géométriques imposées.

Le temps de calcul de l'optimisation est grandement influencé par la densité du maillage, le nombre d'itérations, le facteur de pénalisation et le choix de l'algorithme d'optimisation. La plupart de ces paramètres peuvent être définis dès les premières étapes de l'optimisation. L'onglet de paramètres avancés d'optimisation est un des leviers principaux sur lesquels il faut jouer pour permettre de réduire la complexité des calculs.

Bibliographie

References

- Abaqus/CAE User's Guide (6.14), 2018. *Abaqus.software.polimi.it* [online],
- DEATON, JOSHUA D. and GRANDHI, RAMANA V., 2013, A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2013. Vol. 49, no. 1, p. 1-38. DOI 10.1007/s00158-013-0956-z. Springer Nature
- NANA, ALEXANDRE, CUILLIÈRE, JEAN-CHRISTOPHE and FRANCOIS, VINCENT, 2016, Towards adaptive topology optimization. *Advances in Engineering Software*. 2016. Vol. 100, p. 290-307. DOI 10.1016/j.advengsoft.2016.08.005. Elsevier BV
- RAMSAIER, MANUEL, 2018, *Abaqus Topology Optimization of a Bridge* [online]. [video]. 2018. [Accessed 25 June 2018]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=GZmeymV-5SA>
- RAZVAN, CAZACU, 2014, OVERVIEW OF STRUCTURAL TOPOLOGY OPTIMIZATION METHODS FOR PLANE AND SOLID STRUCTURES. *ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering..* 2014. Vol. XXIII (XIII), 2014/3, no. 3. DOI 10.15660/auofmte.2014-3.3043. Asociatia Pentru Inginerie Integrata si Management Industrial
- SAADLAOUI, YASSINE, MILAN, JEAN-LOUIS, ROSSI, JEAN-MARIE and CHABRAND, PATRICK, 2017, Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes. *Journal of Manufacturing Systems*. 2017. Vol. 43, p. 178-186. DOI 10.1016/j.jmsy.2017.03.006. Elsevier BV
- SIGMUND, OLE and MAUTE, KURT, 2013, Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2013. Vol. 48, no. 6, p. 1031-1055. DOI 10.1007/s00158-013-0978-6. Springer Nature