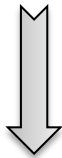


Guide de bonnes pratiques et manuel de conception

La méthodologie développée dans le projet ALMIA (Additive Layer Manufacturing for Industrial Application) a permis d'établir trois documents suivant différentes règles d'accessibilité et de diffusion :

- Niveau 1 : un guide de bonnes pratiques diffusable sans restriction,
- Niveau 2 : un manuel de conception diffusable au consortium ALMIA,
- Niveau 3 : un manuel de conception confidentiel SOGECCLAIR aerospace pour la partie conception et FUSIA Groupe pour la partie fabrication.

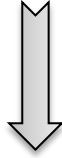
Niveau 1



Fiches pratiques -
Diffusable



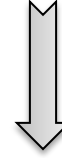
Niveau 2



Diffusable uniquement aux
membres du consortium



Niveau 3

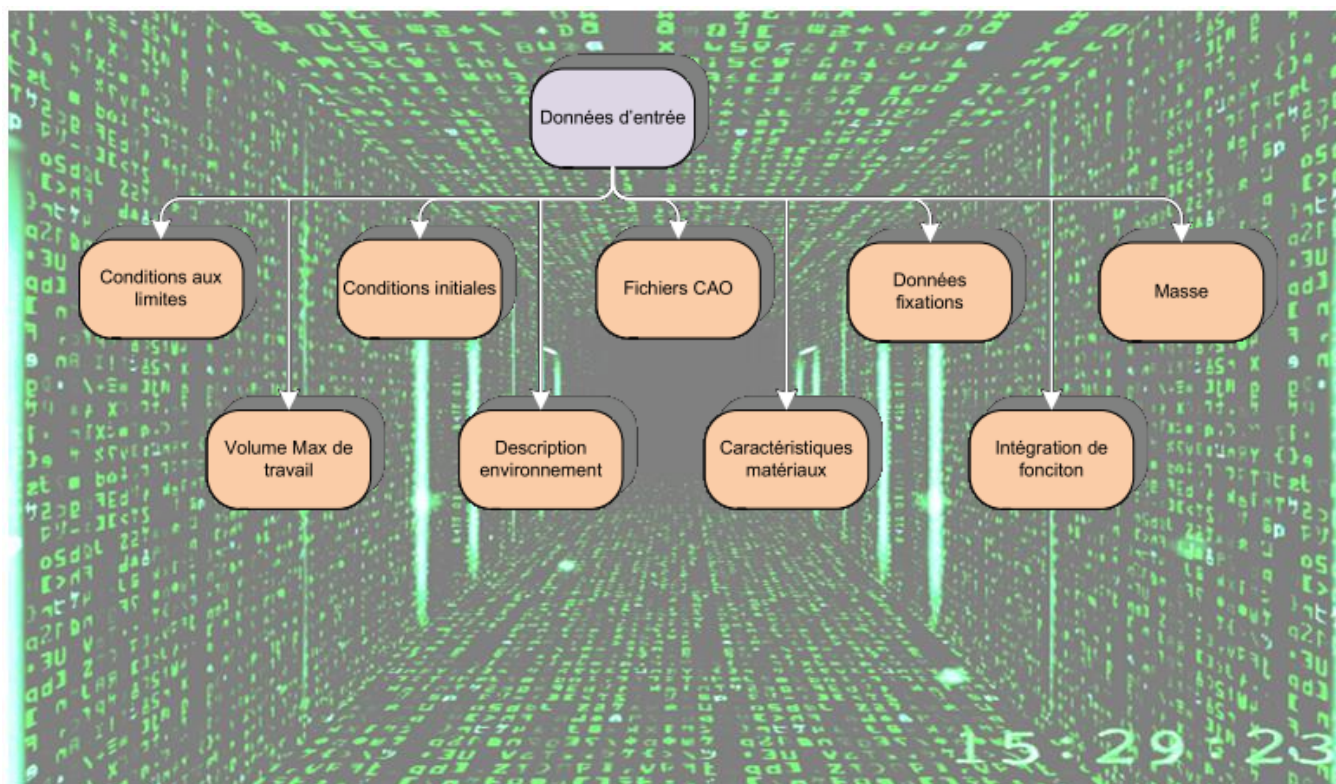


Accès restreint à
SOGECCLAIR aerospace
(conception) et FUSIA
Groupe (fabrication)



Fiche 1

Données d'entrée nécessaires à une optimisation topologique ALM



POURQUOI ?

L'optimisation topologique en vue de fabriquer en impression 3D métal est un processus qui demande de connaître l'ensemble des contraintes liées à l'environnement de la pièce.

Si une de ces contraintes est omise ou mal définit l'optimisation ne donnera pas la solution la plus adaptée.

INTEGRATION DE FONCTION ?

L'intégration de fonction consiste à simplifier des assemblages de plusieurs pièces.

Lors de la conception d'une pièce en ALM (Additive Layer Manufacturing) il faut penser à des pièces secondaires qui peuvent être directement imprimées avec la pièce structurale qui est optimisée.

A titre d'exemple, on peut intégrer des supports de câbles etc.

FIXATIONS ?

Il est important de répertorier les données d'entrée sur les fixations existantes de manière à les modéliser dans les logiciels en amont du calcul.

Cette méthodologie permettra de répartir les efforts de manière homogène entre les différentes fixations.

CONDITIONS AUX LIMITES

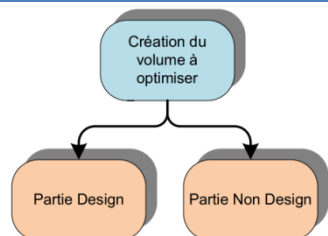
Les conditions aux limites sont très importantes au bon déroulement d'une optimisation.

Il faut prendre les mêmes conditions que celles utilisées pour la pièce non optimisée.

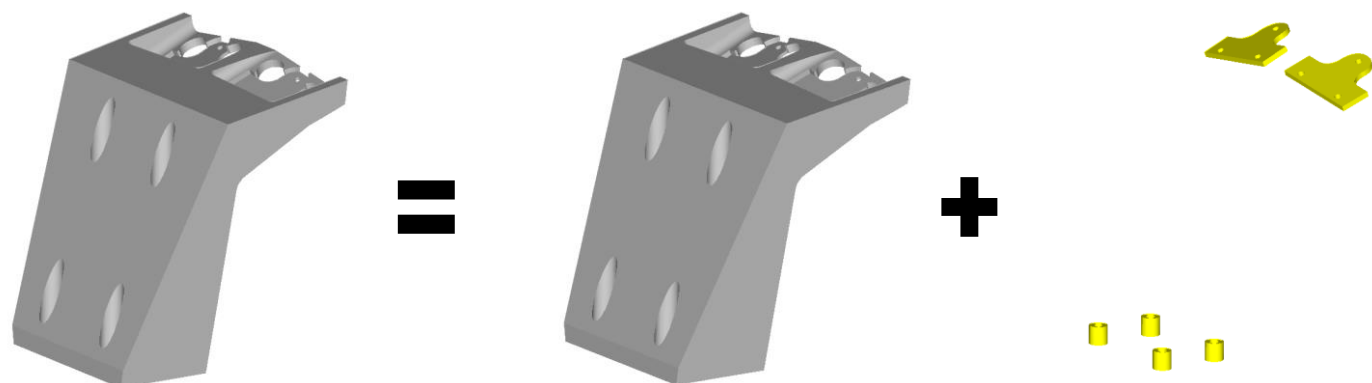
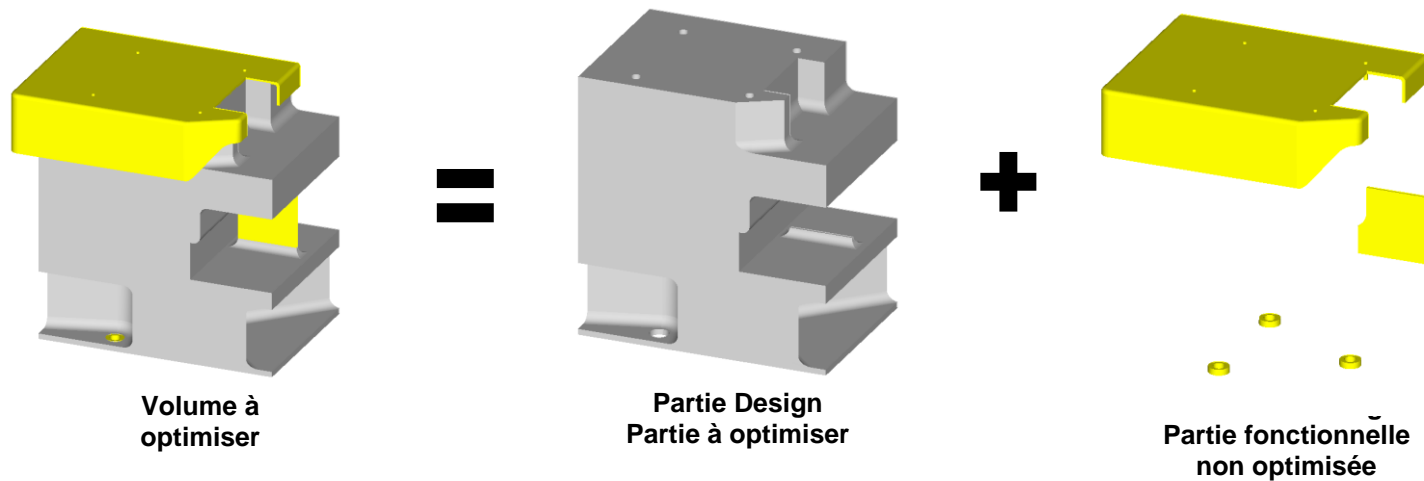
CARACTERISTIQUES MATERIAUX

Il faut faire attention au module d'Young qui présente en fabrication additive une valeur différente suivant le sens de fabrication.

On prendra par défaut la direction la plus pénalisante qui est souvent la direction z c'est-à-dire la verticale.



Fiche 2 Création du volume à optimiser



ENCOMBREMENT MAXIMAL

Le volume à optimiser représente l'encombrement maximal autorisé pour l'optimisation.

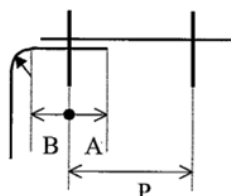
Il tient compte de l'environnement extérieur c'est-à-dire des pièces et des assemblages autour de la zone d'étude.

REGLES DE CONCEPTION

Lors de la création du volume à optimiser il faut tenir compte de règles de conception concernant les zones Non Design.

Dans le cas d'un perçage, il existe d'une part le pas (P) qui est une distance minimale à respecter entre deux fixations.

D'autre part, il existe la pince (A et B). Cette notion est importante et définit les distances minimales à respecter du centre d'un perçage à un bord libre ou à un congé.



OUTILLAGE

L'encombrement de l'outillage est nécessaire pour réaliser les enlèvements de matières adaptées dans la partie Design.

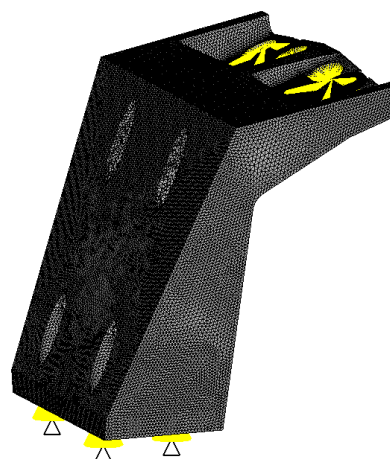
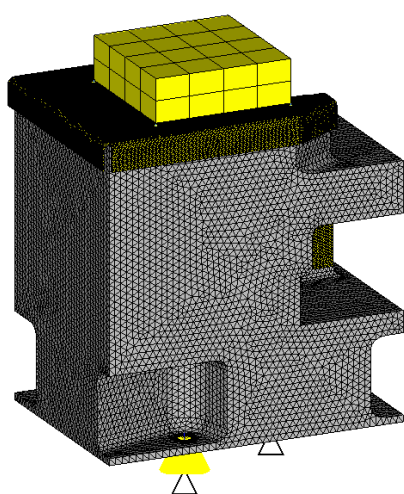
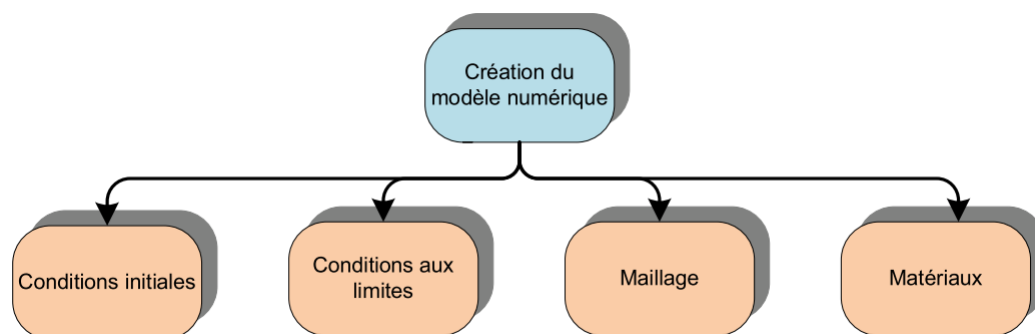


CONGES

Systématiquement quand on crée des enlèvements de matière dans le volume à optimiser au niveau des fixations, il faut réaliser des congés d'au moins 3 mm.

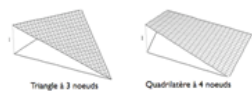
La zone proche des fixations est une zone critique en calcul et fortement soumise aux concentrations de contraintes. Dès la conception du volume à optimiser, il faut anticiper les congés.

Fiche 3 Création du modèle numérique

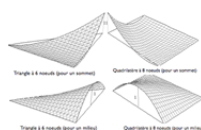


QUEL MAILLAGE ?

Un maillage d'ordre 1 pour limiter le nombre de degré de liberté.



Ordre 1



Ordre 2

Un maillage volumique homogène en taille.

Un minimum de trois éléments dans les congés.

LES CARACTERISTIQUES MATERIAUX ALM

Les caractéristiques matériaux issues de la fabrication additive pour des matériaux isotropes donnent des caractéristiques anisotropes.

Il faut prendre les valeurs les plus pénalisantes qui sont suivant la direction la plus pénalisante : souvent la direction Z.

FIXATIONS ?

Les fixations peuvent être modélisées de plusieurs manières. Citons par exemple une modélisation avec des éléments Cbeams ou des éléments Cbush.

Dans tous les cas, il est nécessaire d'avoir à minima la longueur, la section et les caractéristiques matériaux des fixations.

La modélisation des fixations est nécessaire pour équilibrer les efforts sur celles-ci grâce au pilotage des efforts de cisaillement lors de l'optimisation topologique.

CONDITIONS INITIALES

Les conditions initiales facilement intégrables sont des efforts ou des déplacements dans un cas de charge statique.

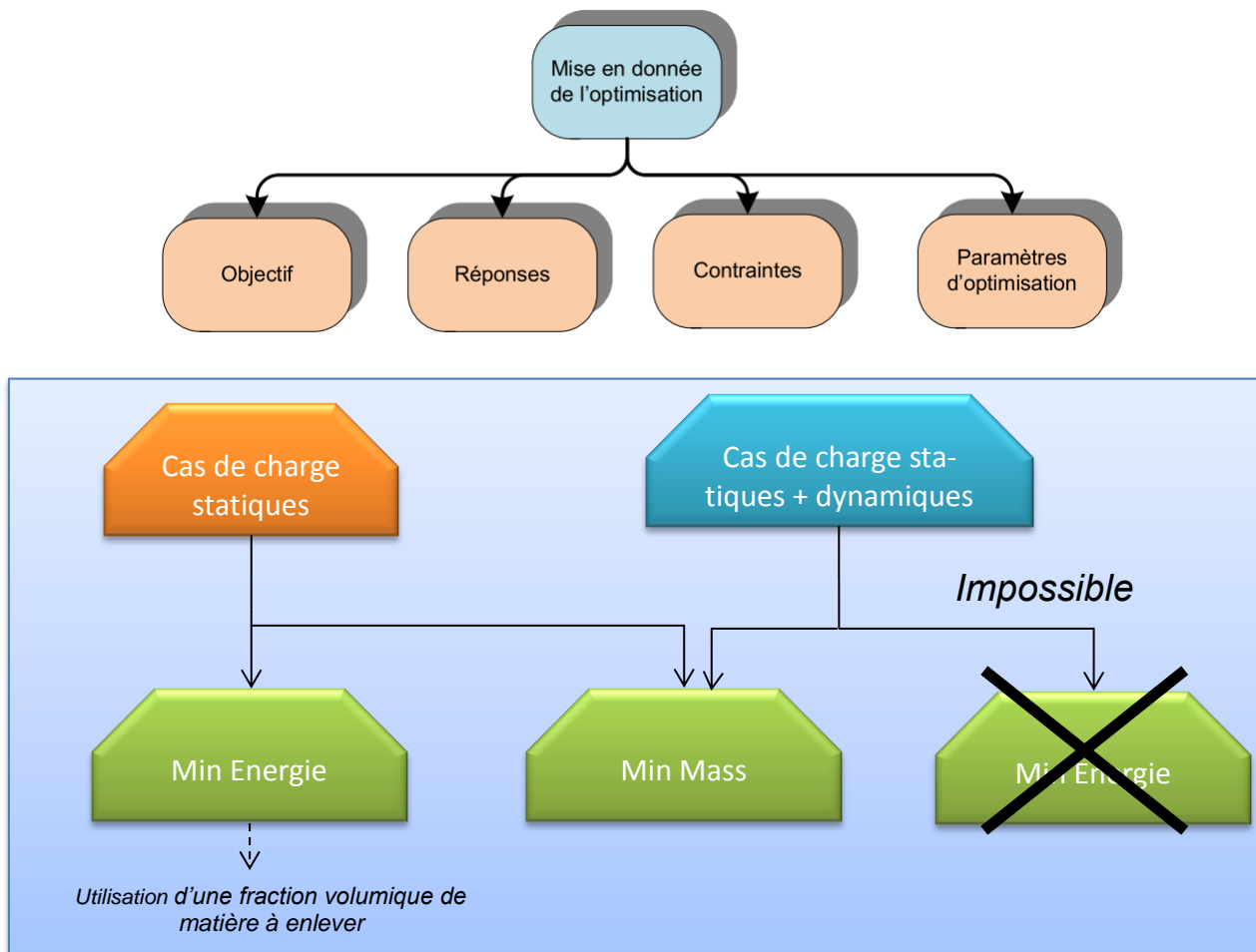
On peut intégrer aussi un cas de charge dynamique qui peut servir pour piloter la fréquence dans l'optimisation.

CONDITIONS AUX LIMITES

La modélisation est classique : blocages suivant les translations et les rotations des nœuds concernés.

Fiche 4

Mise en données de l'optimisation



OBJECTIF

Dans un calcul d'optimisation topologique on peut renseigner qu'un seul objectif.

En fabrication additive on possède des libertés de conception, la masse peut donc être réduite.

Pour cela, deux objectifs sont habituellement utilisés :

- Soit minimiser la masse,
- Soit minimiser l'énergie de déformation.

Dans le cas de l'énergie on peut ensuite piloter une contrainte sur la fraction volumique et atteindre un objectif masse.

REPONSES

Une réponse est une entité qui permet de demander une sortie. Par exemple la masse, la contrainte, etc.

Cette réponse peut ensuite être appelée pour renseigner un objectif ou une contrainte.

CONTRAINTES

Les contraintes sont nécessaires pour piloter l'optimisation topologique durant le calcul.

On pilote en général la contrainte, les déplacements et/ou la fréquence. On peut aussi contrôler les efforts de cisaillement sur les fixations.

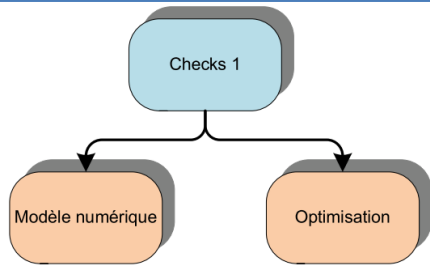
Dans la topologie, on peut renseigner une taille de barre minimale qui est une contrainte de fabrication. La taille de barre est aussi pilotée par la taille de maille. La taille de maille descend rarement en dessous de 1 mm. La taille de barre est au moins 3 fois supérieures donc 3 mm.

Le minimum est 3 mm, on utilise habituellement 6 mm.

PARAMETRES D'OPTIMISATION

Il est important que l'optimisation converge. Le nombre maximum d'itération renseigné doit être élevé afin qu'un calcul converge avant d'atteindre le nombre d'itération maximale.

Le facteur de pénalité doit être augmenté pour des optimisations topologiques en fréquence et dans le cas de chargement en pression.



Fiche 5 Check du modèle numérique et de l'optimisation

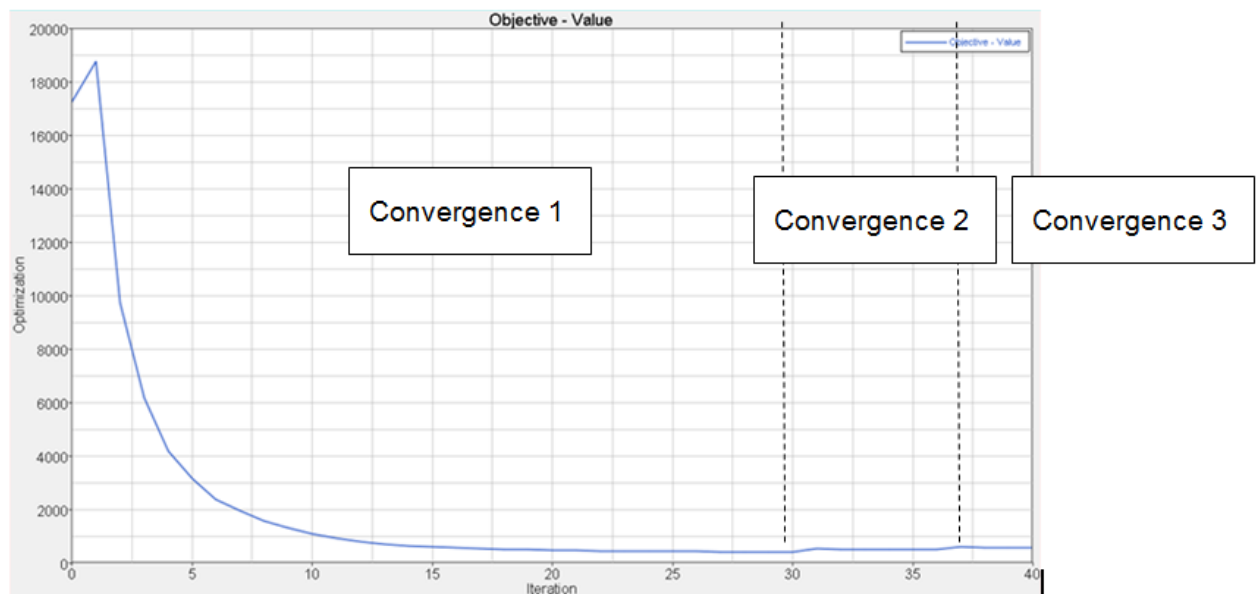
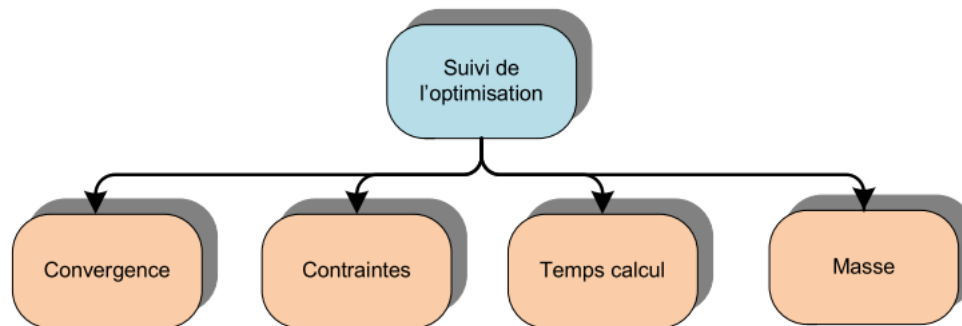
Titre MEF : _____
Client : _____
N° Affaire : _____
Nbre de ddl : _____
Date : _____

Contrôle		
NOM Prénom	Modèle Ok ou NOK	
OK	NOK	REPRIS

Contrôle géométrique				
1	Type d'éléments (cohérence 1er / 2nd ordre => spécifier l'ordre) :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Nœuds coïncidents (si OK, justifier) :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Éléments dupliqués (si OK, justifier) :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Arrêtes libres :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Normales des éléments :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Offsets des éléments :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Systèmes de coordonnées :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Maillage 3D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Nombre d'éléments	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Taille moyenne des éléments	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Qualités des éléments ("Faces" du maillage 2D) skew < 70 et aspect ratio < 10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Contrôle mise en donnée				
=> Matériaux				
12	Unités accordées avec les grandeurs physiques du modèle :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Orientation des matériaux non isotropes (pour les composites) :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
=> Propriétés				
14	Épaisseur des éléments coques :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Pour les membranes : épaisseur < 1.10e-6, pas de MID2 et MID3 :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Sections :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Inertie :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	Blocages :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	Chargements :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Contrôle des Paramètres				
20	PARAM AUTOSPC NO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	PARAM WTMASS 0.001 (si N, mm, Kg)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Contrôle Analyse Linéaire Statique				
=> SOL101 avec application d'un effort unitaire				
22	Masse du MEF (similaire à celle de la CAO) :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Contrôle Paramètres Optimisation				
23	MinDim	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	MaxDim	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	Gap	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	DesMax	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27	Mendens	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28	Discrete	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
29	Pattern grouping	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
30	Draw	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Contrôle du modèle				
31	Réponses	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
32	Contraintes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
33	DCONADD	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
34	Contact	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
35	Objectif	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Observations :				
Modèle OK				

ATTESTATION D'AUTO-CONTRÔLE			
	NOM	VISA	DATE
Auteur			

Fiche 6 Suivi de l'optimisation



CONVERGENCE

La méthode DUAL qui consiste à trouver un minimum local. A chaque fois que le critère de convergence est atteint, le facteur de pénalité est augmenté. Il existe trois boucles de convergences avant que le calcul se termine.

Ceci peut être post-traité durant les calculs et permet de s'assurer du bon déroulement de l'optimisation.

TEMPS DE CALCUL

Le temps de calcul est fonction de plusieurs paramètres machines. Il dépend :

- de la RAM utilisée. Si l'on demande d'utiliser toute la RAM disponible le calcul ira plus vite,
- Du nombre de cœur utilisé : on parle de calcul paralléliser.

Ce dernier paramètre diminue considérablement les temps de calcul mais demande aussi plus de licences calcul.

Il faut trouver un compromis.

CONTRAINTES

Le post-traitement en contrainte est très important au cours du calcul. Il permet d'observer le bon déroulement de l'optimisation et d'arrêter le calcul s'il est inutile qu'il perdure.

Au cours des itérations, on peut accéder à la valeur d'une contrainte, par exemple à l'effort de cisaillement. Le solveur calcule le pourcentage de « violation » de cette contrainte par rapport à son objectif.

Il arrive que les contraintes ne soient pas respectées dès le départ et qu'au cours des itérations elles ne soient toujours pas respectées. Le calcul peut durer plusieurs dizaines d'heures inutilement si on ne vient pas post-traiter ces paramètres et le stopper si nécessaire.

MASSE

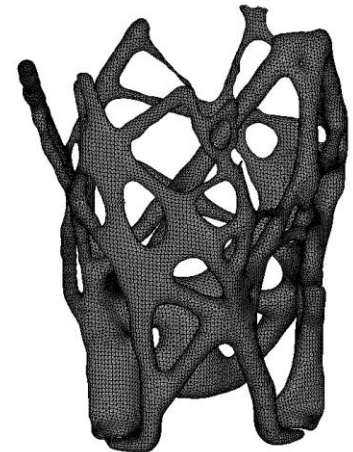
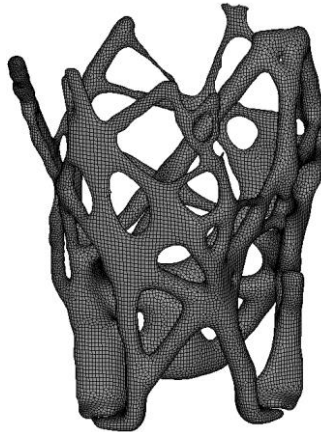
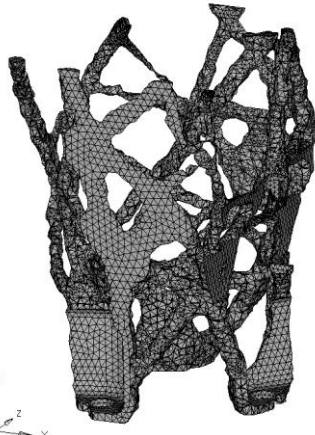
Au cours de l'optimisation topologique, on peut suivre l'évolution de la masse en regardant les itérations. On peut vite se rendre compte si on va atteindre l'objectif.

Fiche 7 Transfert résultat d'optimisation

Transfert résultats
d'optimisation -
CAO

Import du résultat
calcul

Transposition
format lisible en
CAO



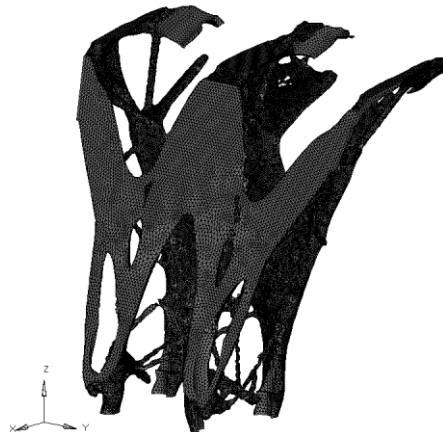
Import résultat du
calcul format stl

Outil de lissage néces-
saire souvent après une
optimisation avec un cas
de charge dynamique

Export format stl pour
la reconstruction

Import résultat du calcul format stl

Export format stl pour la reconstruction



OUTILS DE LISSAGE

Lorsque le calcul est fini, on post-traite les résultats à un certain seuil de densité d'éléments.

On choisira un seuil de densité entre 0.3 et 0.6.

On peut ensuite importer ce résultat grâce à un lissage de type Laplacien au format stl.

Le format stl est préférable même si on peut importer des fichiers au format igs ou stp.

A ce stade, on peut enregistrer le fichier stl pour aider à la reconstruction de la pièce. On peut aussi faire un lissage plus important de manière à améliorer la qualité de ce stl.

POURQUOI LE STL ?

Le stl est le format le plus léger qui permettra d'obtenir un fond tel un calque pour pouvoir reconstruire la pièce.

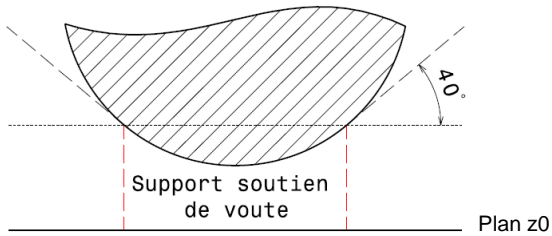
DIFFICULTES DU STL

Certains logiciels n'ont pas en natif l'import d'un fichier stl.

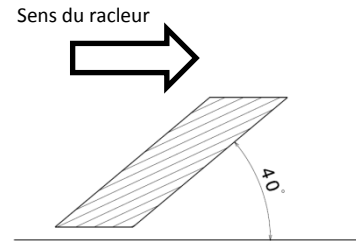
Cela demande parfois un investissement pour obtenir un patch pour lire ce stl.

Le stl est un fichier qui peut être modifié et que l'on peut lisser sur certains logiciels de CAO : on assimile cette méthode au « reverse engineering ». Cela demande parfois des modules supplémentaires dans les logiciels de CAO.

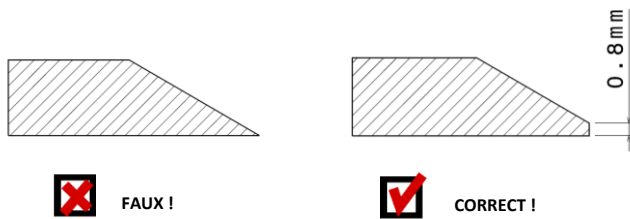
Fiche 8 Principes et règles de conception



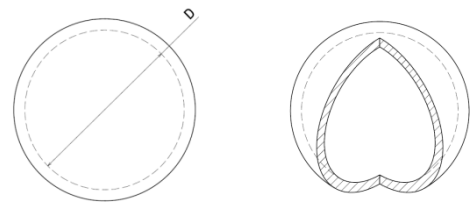
Eviter les angles inférieurs à 40°



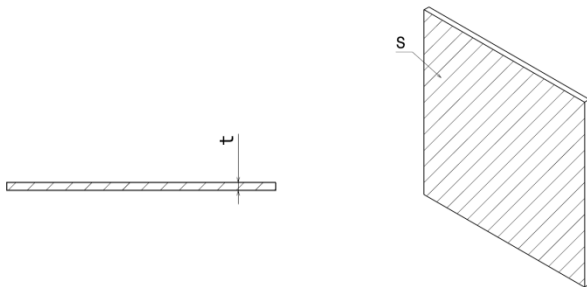
Eviter d'être face au sens du racleur
qui en fabrication étale la poudre entre
deux couches successives



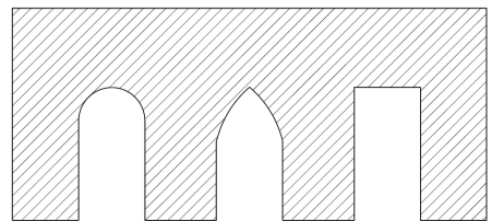
Attention aux biseaux



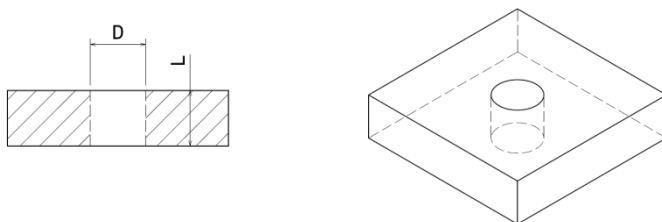
Eviter les sphères \varnothing int > 40 mm
Sinon il faudra des supports



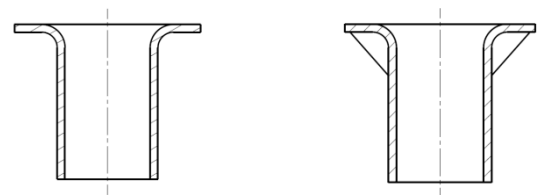
Epaisseur supérieure à 0.5 mm



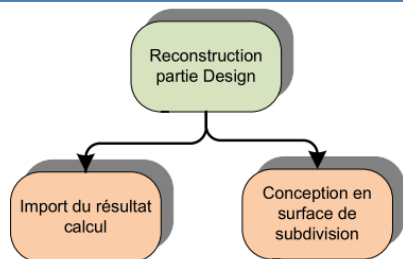
Privilégier la voûte gothique



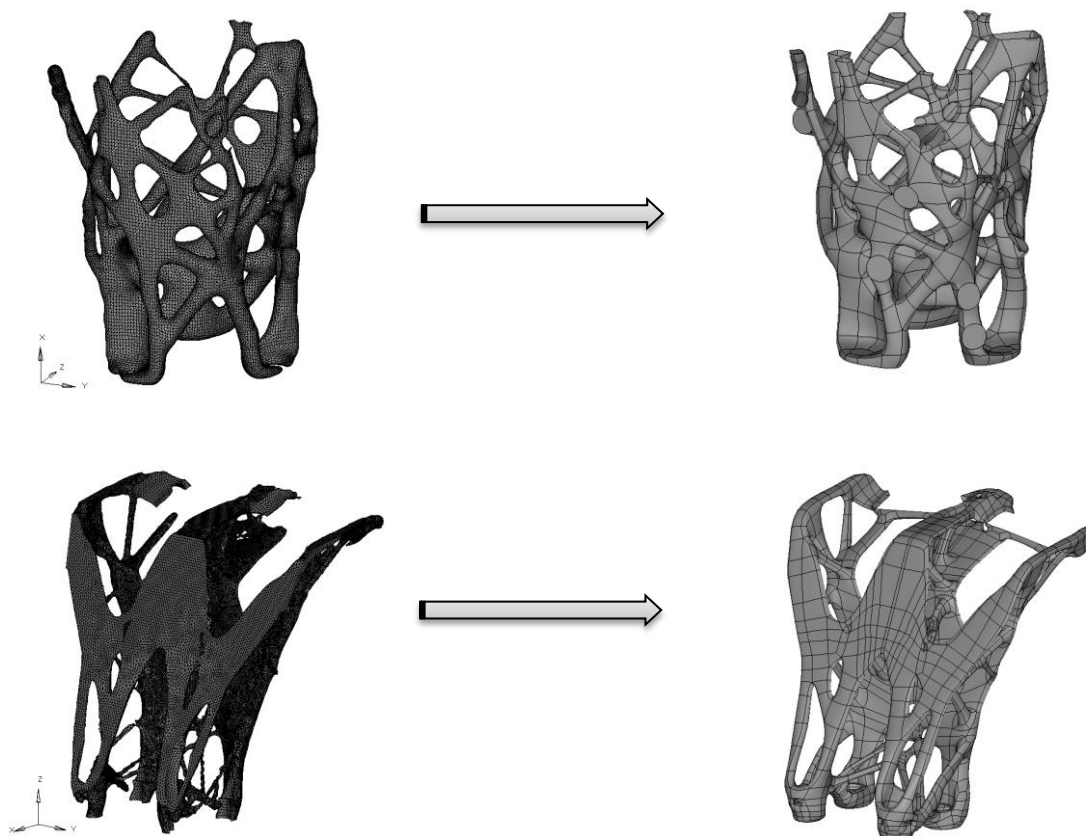
$1 \text{ mm} < \varnothing < 10 \text{ mm}$
Si supérieure possibilité de supports



Soutenir les collerettes
avec la règle des angles
inférieurs à 40°

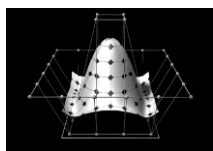


Fiche 9 Reconstruction partie Design

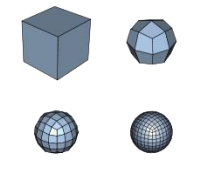


SURFACE NURBS

Une surface NURBS est une B-Spline c'est-à-dire un type de surface défini par des coordonnées de points. Ce sont les surfaces les plus utilisées en CAO dans les modules surfaciques et celles qui définissent des solides dans les modules volumiques.



NURBS



SUBDIVISION

SURFACE DE SUBDIVISION

Une surface de subdivision est une surface lisse développant un maillage. Ces types de surfaces sont apparus après les surfaces NURBS et sont présentes dans certains logiciels.

On préférera reconstruire des pièces avec ces surfaces pour des questions de facilité et de gain de temps.

ECART ACCEPTABLE ?

Une fois le fichier stl importé, celui-ci sert de calque pour reconstruire en surface de subdivision la pièce optimisée.

Il faut être conservatif lors de la reconstruction par rapport au stl et ne pas être en dessous des épaisseurs proposées par le calcul.

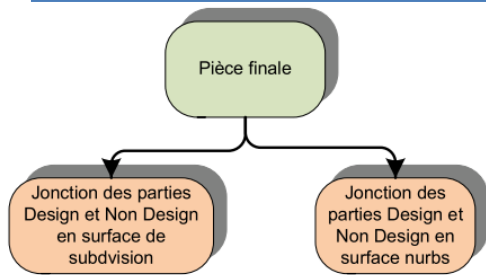
Il arrive aussi que des barres ou des formes soient modifiés pour satisfaire des contraintes de fabrication.

Au niveau des jonctions avec les parties Non Design on ne suit pas exactement le stl car on évite les concentrations de contraintes tout en respectant l'encombrement maximal. C'est une zone qui est épaissi.

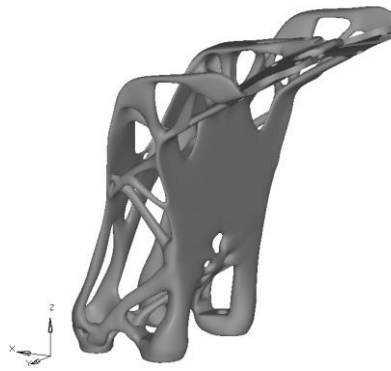
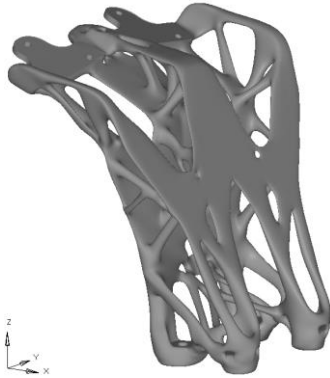
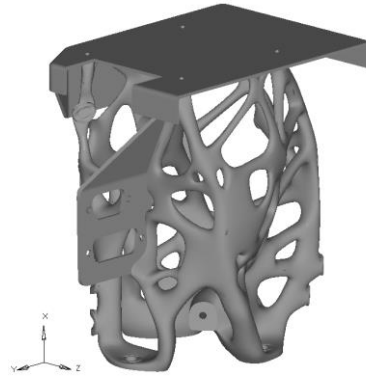
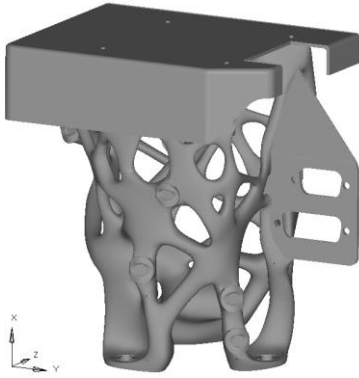
BILAN MASSE

La masse de la pièce reconstruite est supérieure à la masse de la pièce optimisée. Prenons pour référence :

Masse pièce reconstruite = masse résultat d'optimisation + 10%.



Fiche 10 Finalisation de la reconstruction



QUELLES ETAPES ?

Import des parties Non Design

Création de certaines parties Non Design en surface de subdivision

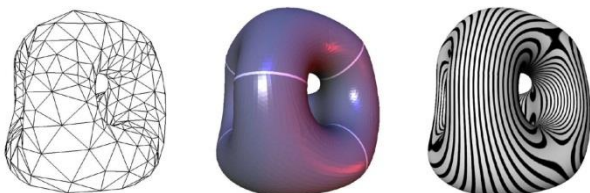
Création de certaines parties Non Design en surface nurbs

Jonction entre la partie Design et les parties Non Design

Check de l'encombrement maximal et modification si nécessaire

Check de la continuité des surfaces entre elles au moyen de zébra (affichage de lignes blanches et noires tel des isoclines afin de faciliter la détection de défauts)

Check par rapport aux principes et règles de conception : on peut parfois ajouter de la matière si cela facilite la fabrication sans trop pénaliser la masse de la pièce.



ANTICIPER LA VERIFICATION CALCUL

Une fois la pièce reconstruite, il faut vérifier le résultat de l'optimisation topologique.

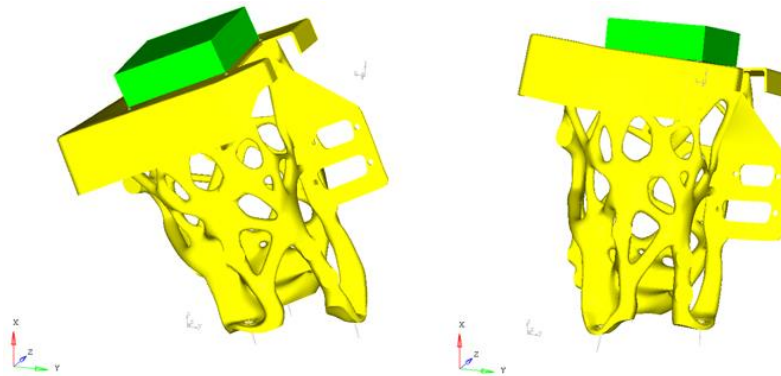
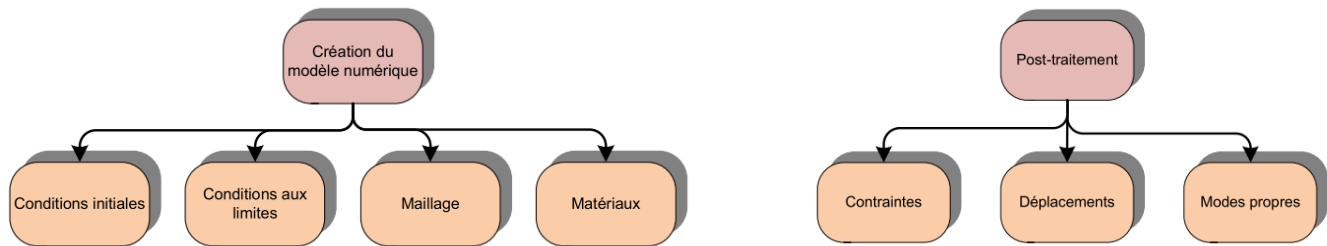
Toutes les zones de conception ne sont pas nécessaires. Par exemple, les supports de câbles intégrés sont utiles pour la pièce finie qui est fabriquée mais pas pour la vérification calcul.

Deux pièces sont ainsi créées :

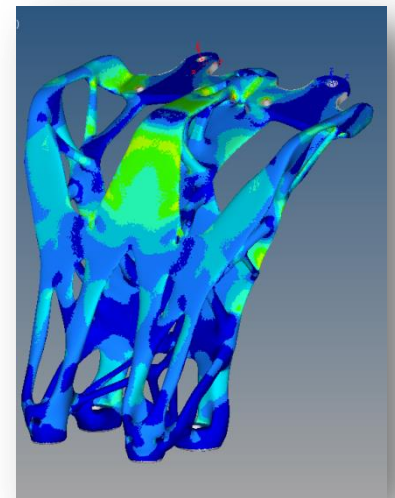
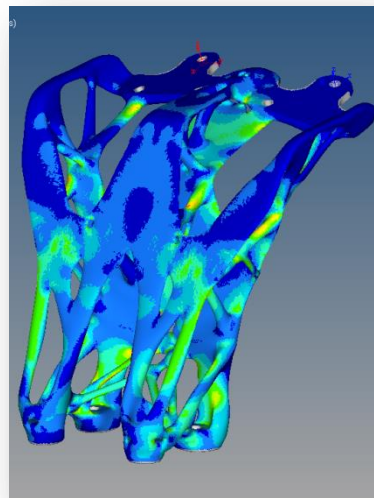
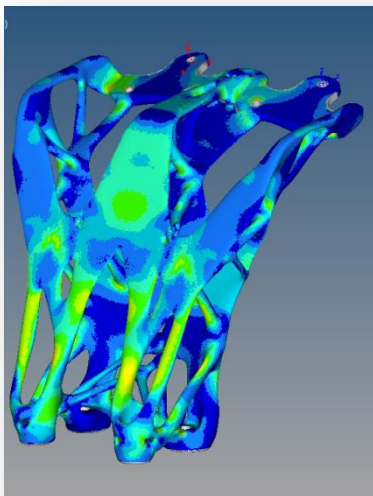
- Une en vue de la fabrication,
- Une en vue de la vérification calcul : version plus simple que celle fabriquée.

Il faut anticiper le maillage de la pièce. En effet, lors de la création de surface de subdivision, un réseau dense de « lignes » se crée. Lors du maillage, il faut éviter les singularités qui vont être générées avec ces lignes. Par conséquent, il y aura des éléments distordus.

Fiche 11 Création du modèle numérique et post-traitement



Post-traitement en fréquence



Post-traitement en contrainte

MODELE NUMERIQUE

Le modèle numérique de la forme optimisée est rapide à effectuer. Il faut reprendre le modèle du volume à optimiser et le modifier en important la pièce reconstruite.

Il reste une opération de maillage et une connexion de la nouvelle pièce avec les conditions initiales et les conditions aux limites.

POST-TRAITEMENT

Le post-traitement est une opération classique où l'on dimensionne en effort, déplacement, contrainte, fréquence etc. par rapport aux admissibles.

Les valeurs post-traitées une fois la pièce reconstruite sont les valeurs à prendre en compte pour le dimensionnement.

SAFETY FACTOR FABRICATION ADDITIVE

Lors du post-traitement, il est usuel d'ajouter des marges sur les admissibles matériaux. L'admissible matériau sans marge est un FOS pour Factor Of Safety = 1.

Les coefficients appliqués tiennent compte de facteurs environnementaux. Dans le cas du domaine spatiale, le CNES a décidé d'appliquer un **FOS = 1.65** en tenant compte du procédé de la fabrication additive qui est un domaine nouveau où le retour d'expérience est faible (Le facteur lié à l'ALM seul est 1.25).