

IJIN Concept

Maquette de plateforme semi-submersible
pour une éolienne de 22 MW - LHEEA

Conception de la maquette CIMSUB
Rapport de l'étude mécanique

IC001 02 01 B

Dominique Le Roux
15/12/2025

Document : Rapport de l'étude de la conception la maquette CIMSUB en matériaux composites

Destinataire : LHEEA - Research laboratory in hydrodynamics, energy and atmospheric environment - CNRS mixed research unit (UMR 6598)

Données d'entrées pour la réalisation de cette proposition :

- Document LHEEA : « Maquette de plateforme semi-submersible pour une éolienne de 22 MW - Cahier des charges » – version du 29/04/2025
- Document IJIN-Concept : N° : IC001 01 10 A « Maquette d'éolienne de 22 MW – LHEEA - Pré-étude -Rapport » - version du 17 juin 2025

Référence du document :

Numéro	Description	Date	Auteur
IC001 02 01 A	Première version	15 décembre 2025	Dominique Le Roux
IC001 02 01 B	Mise à jour	29 janvier 2026	Dominique Le Roux

Table des matières

1. Introduction.....	4
2. Etude mécanique de la maquette.....	4
2.1 Principe de fabrication et matériaux.....	5
2.1.1 Pièces métalliques.....	5
2.1.2 Pièces composites	5
3. Modèle CAO	6
4. Equilibrage et inerties	8
5. Etanchéités.....	9
5.1 Cas général	9
5.2 Cas particulier des interfaces capteurs	9
6. Peinture.....	10
7. Superstructure	10
8. Plans de fabrication 2D	11
9. Nomenclatures.....	11
10. Dimensionnement.....	12
10.1 Critères de dimensionnements	12
10.2 Le « faux capteur » et ses brides.....	13
10.2.1 Vis de fixation du « faux-capteur »	13
10.2.2 Couple de serrage.....	13
10.2.3 Modèle élément fini.....	15
10.2.4 Vérification de la contrainte en cisaillement de la colle des brides	24
10.3 La tape et la bride de colonne centrale.....	25
10.3.1 Vis de fixation de la tape	25
10.3.2 Couple de serrage.....	25
10.3.3 Modèle élément fini.....	26
10.3.4 Vérification de la contrainte en cisaillement de la colle de la bride	40
10.4 Vérification des modes propres des supports de lests des colonnes	41
11. Préconisations de serrage	41
12. Conclusion	42

1. Introduction.

L'objectif de cette étude est de définir de façon précise l'ensemble la maquette CIMSUB en composite en répondant au mieux au cahier des charges. Une analyse vibratoire est également prévue pour déterminer les premiers modes propres d'oscillations.

Cette étude comprend un dossier de définition complet pour permettre un lancement en fabrication de l'ensemble hormis la définition du capteur.

Compte tenu des compétences spécifiques liées à l'utilisation de matériaux composites, l'échantillonnage, le calcul de structure et les calculs vibratoires ont été confiés au bureau d'études ST2Design.

Ijin Concept et ST2Design ont donc travaillé de concert pour optimiser au mieux les différents critères.

Les calculs de résistances et de rigidité des parties composites sont fournis par ST2-Design.

2. Etude mécanique de la maquette.

Le principal enjeu de cette étude est d'optimiser l'ensemble des pièces pour satisfaire tous les paramètres à savoir :

Dimensions extérieures

Interfaces

Devis de masse

Position des centres de gravités

Inerties de la plateforme (maquette sans le mât)

Résistance mécanique selon les critères définis par l'équipe LHEEA

Rigidité de la plateforme par calcul des modes propres d'oscillation en libre-libre et encastré-libre,

Des réserves de lests sont prévues pour permettre un équilibrage de l'ensemble plateforme et mât ainsi que pour maintenir l'équilibrage avec les deux configurations d'ancrage ou l'utilisation de « Heave plates ».

La maquette embarque également les éléments suivants :

- 3 accéléromètres

- 6 ponts de jauge
- 1 centrale inertielle
- 10 connecteurs électriques dédiés à chacun des éléments ci-dessus.

Au cours de l'étude, il a été décidé d'abandonner l'idée de mettre un capteur d'effort développé chez un industriel pour insérer un « faux capteur » rigide de 150mm de long.

2.1 [Principe de fabrication et matériaux](#)

L'ensemble est constitué de pièces composites en carbone-époxy et de pièces métalliques en alliage d'aluminium et en acier inoxydable.

2.1.1 [Pièces métalliques](#)

L'alliage d'aluminium est le 6061 T6, choisi à la fois pour ses caractéristiques mécaniques et sa résistance à la corrosion.

La nuance d'acier inoxydable choisi est le Z 2 CND 17-12 ou 316L.

La visserie est prévue en inox A4-70 et A4-80.

2.1.2 [Pièces composites](#)

Le choix s'est porté sur de la réalisation de pièces composite en préimprégné carbone « one shot », c'est-à-dire réalisées en une seule fois.

Le principe consiste à réaliser un moule en plusieurs parties qui pourra accueillir l'ensemble du drapage des tissus. La polymérisation est issue d'une cuisson en autoclave.

Après cuisson, les interfaces des pièces carbonées sont reprises en usinage pour permettre le collage des inserts métalliques, eux-mêmes réalisés par usinage.

Cette technique permet de satisfaire les exigences du cahier des charges en termes de rigidité, de résistance et de précision géométrique, tout en essayant de réduire au maximum les coûts de fabrication. En effet, les opérations de drapage sont réduites au maximum.

3. Modèle CAO

Le modèle CAO est complet, il permet notamment de régler l'équilibrage de l'ensemble.

Le modèle devra être ajusté après fabrication et pesée de l'ensemble des pièces. Il existe en effet un degré d'incertitude sur la masse des pièces et notamment sur les pièces en matériaux composites en raison de surplus de colles possibles lors de la fabrication et des recouvrements de plis.

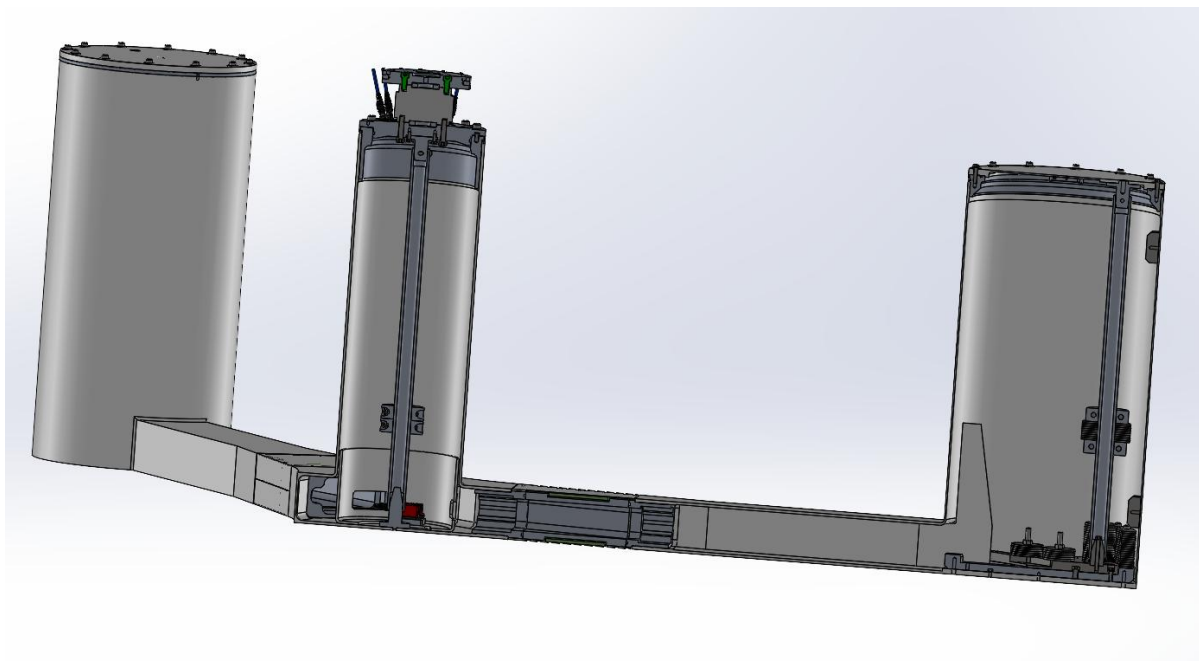


Figure 1 : Vue CAO en coupe de la plateforme

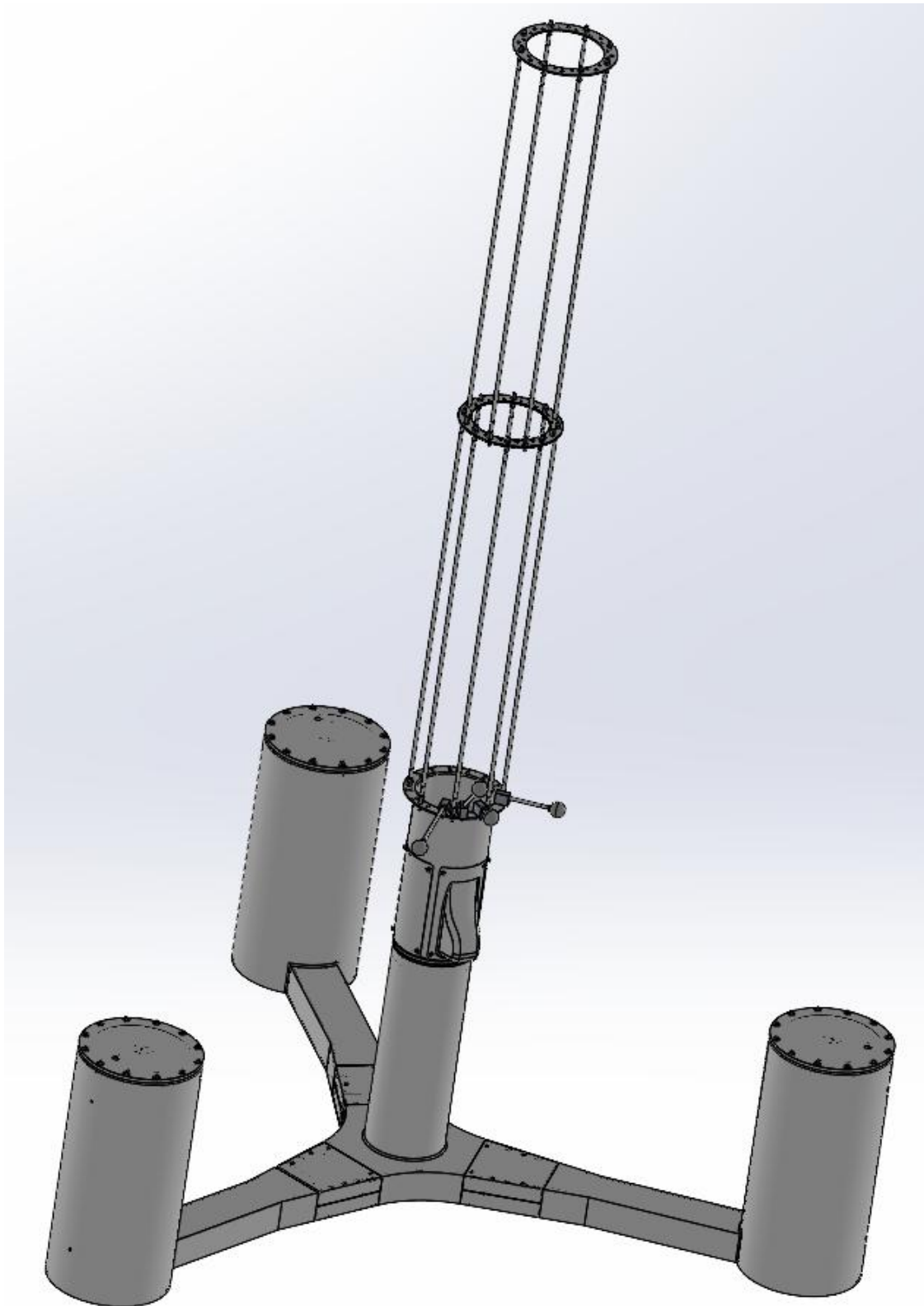


Figure 2 : Vue CAO du modèle complet (plateforme et superstructure)

4. Equilibrage et inerties

Tout au long de la conception, une attention a été porté pour permettre d'assurer l'équilibrage du système.

Un emplacement est réservé au niveau du centre de gravité de la maquette pour permettre l'ajout de masse sans modifier les inerties. Cet emplacement permet de gérer les deux configurations d'ancrages et est très utile pour équilibrer le mât et la nacelle.

Des lests sont également positionnés au pieds des colonnes périphériques en cas d'utilisation de « heave plates » à raison de 2,4 Kg par colonne. Cette masse correspond à la masse d'une plaque carbone de 2 fois le diamètre de la colonne extérieure et ayant une épaisseur de 4 mm.

Le modèle CAO proposé est conforme au cahier des charges en termes d'équilibrage et respect des inerties. Le paramètre le plus difficile à tenir est l'inertie autour de l'axe Z pour lequel le modèle donne des valeurs proches de la limite inférieure. Ce paramètre, situé dans la limite inférieure de la tolérance, n'autorise qu'un surpoids de 8% pour les parties composites lors de la fabrication (Voir paragraphe « Pièces composites »). Cette marge a été vérifiée dans le modèle par une augmentation de la masse volumique de 8%. Néanmoins il existe une possibilité d'augmenter l'inertie autour de Z de la plateforme lors de la conception de l'ensemble incluant le mât et la nacelle.

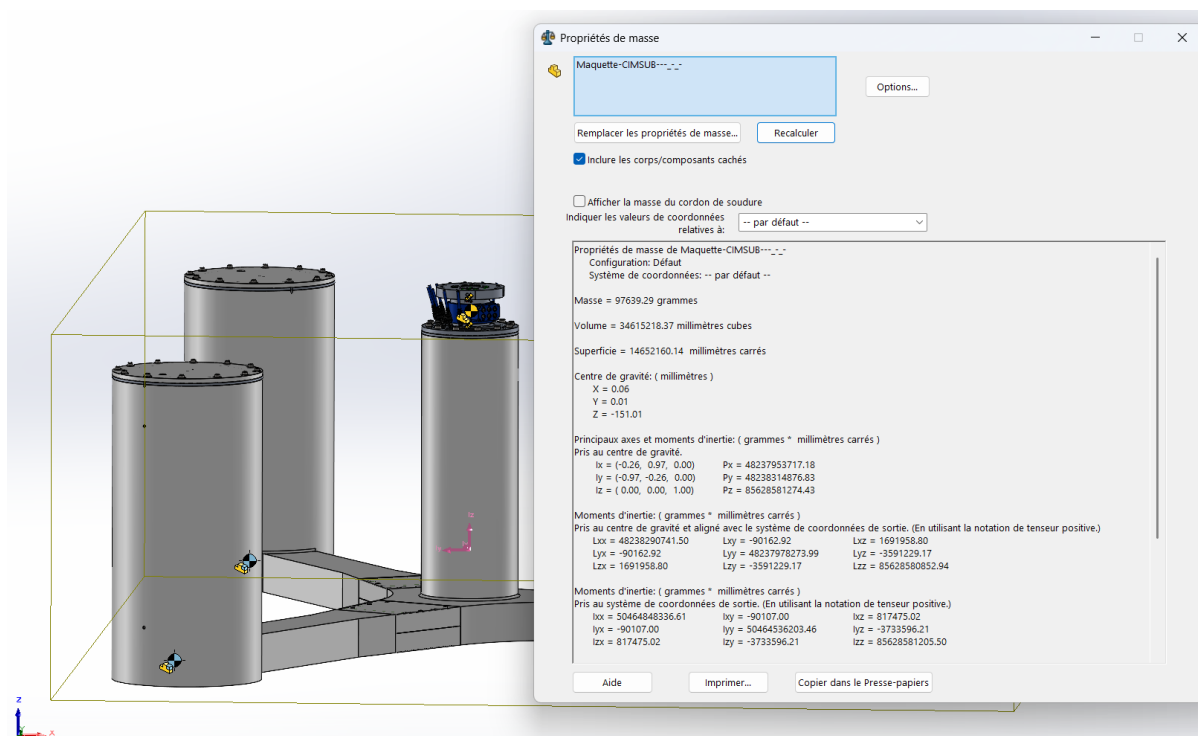


Figure 3 : Caractéristiques de la plateforme (masse volumique carbone-époxy 1550 kg/m3)

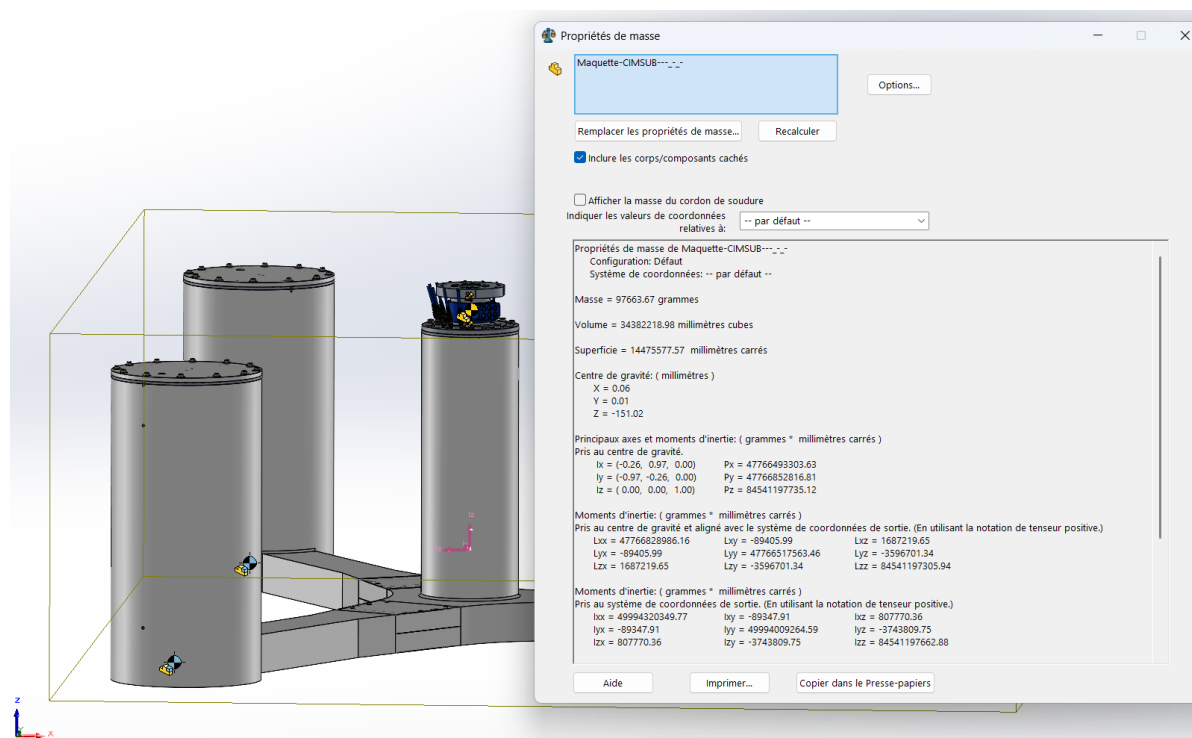


Figure 4 : Caractéristiques de la plateforme (marge de 8% - masse volumique carbone-époxy 1674 kg/m³)

5. Etanchéités

5.1 Cas général

L'ensemble des collages des pièces mécaniques sont étanches.

Les étanchéités des pièces démontables sont assurées par joints toriques mis à part les vis de la balance BG2 pour qui sont étanchées par des bagues BS.

5.2 Cas particulier des interfaces capteurs

Les interfaces capteurs et le « faux-capteur » situés dans les pontons en bas de structures sont particulièrement sollicités mécaniquement. Le faible espace disponible a rendu la tâche de conception de ces éléments particulièrement difficile.

Pour satisfaire à la fois les critères de rigidité (modes propres issues de l'analyse vibratoire), les critères de masse et d'équilibrage, les critères de résistance mécaniques ainsi que les critères de fabricabilité des pièces il restait peu de latitude pour intégrer les interfaces de

fixation et d'étanchéité. Chaque paramètre pouvant se contredire, la solution dessinée est un compromis.

Dans ce de contexte, une étanchéité « à plat » a été choisie plutôt qu'une étanchéité « en piston ».

Après une analyse des contraintes et potentielles déformations, le risque de prise d'eau à cet endroit de la structure n'est pas nul en cas de sollicitation importante. Ce risque est d'autant plus important avec un joint monté « à plat ». En effet, une étanchéité parfaite exige une épaisseur de matière importante pour éviter les déformations au niveau de la gorge de joint.

Pour pallier à ce problème, le faux-capteur a été rigidifié par notamment un épaissement de ces embases de fixation. Ce rajout de masse proche de la maquette a pour conséquence de limiter les marges sur l'équilibrage de l'ensemble.

6. Peinture

Le cahier des charges ne prévoit pas de peinture, néanmoins la demande de peinture figure dans les plans des pièces de structures en composite. Une peinture augmenterait la masse de l'ensemble à raison d'environ 200 à 300 grammes par mètre carré, soit environ 800 à 1200 grammes pour toute la maquette. La masse de la peinture n'est pas prise en compte dans l'équilibrage de la CAO.

7. Superstructure

Une superstructure permet de positionner les cibles de trajectométrie, de protéger la balance des vagues de submersion et pour guider les câbles électriques sur la nacelle. Cette superstructure est composée d'une pièce tubulaire en carbone-époxy, de quatre capots carbones dont un permettant le passage des connecteurs électriques de la balance, et d'un ensemble de tiges et platines en carbone et aluminium.

8. Plans de fabrication 2D

Un ensemble de plan est fourni pour permettre la fabrication de l'ensemble. Concernant les pièces composites, les plans IJIN Concept sont complémentaires des plans de drapage fournis par ST2-Design.

Avant tout lancement en fabrication l'ensemble des plans IJIN-Concept et ST2-Design seront relus par l'équipe du LHEEA. Après vérification du LHEEA, les plans seront indicés et porteront la mention « Bon pour fabrication ».

Le plan de la bride supérieure de la balance BG2 ne figure pas dans le dossier. Cette pièce reprend exactement la géométrie de la pièce « E2205-SE100-PD02 Platine BG2 Floatech pesée » conçue par le LHEEA avec un changement de matière : AG 6061 T6 au lieu de Z35CD17. Un plan avec la nouvelle matière devra être édité pour la mise en fabrication.

9. Nomenclatures

Une nomenclature document répertorie l'ensemble des plans IJIN-Concept et une nomenclature des articles répertorie l'ensemble des éléments nécessaires au montage, y compris les éléments du commerce comme la visserie et les joints.

10. Dimensionnement

Lors de la réalisation des devis ST2-Design et IJIN-Concept, l'ensemble des pièces structurales étaient prévu en composite. Afin de réduire au maximum les coûts de fabrication, des pièces composites ont remplacés des éléments métalliques (voir paragraphe « Principe de fabrication et matériaux »). Le contrat IJIN Concept ne prévoit pas de calculs de dimensionnement de structure.

Néanmoins une vérification des pièces métalliques a été réalisé par des calculs RDM et un modèle élément fini de l'ensemble sous SolidWorks Simulation en statique Linéaire.

10.1 Critères de dimensionnements

Pièces en alliages d'aluminium

Les pièces structurales en alliages d'aluminium sont AG 6061 T6.

La limite élastique est $R_e = 270 \text{ MPa}$.

La limite à la rupture est $R = 305 \text{ MPa}$

Les contraintes maximales dans les pièces structurales en alliages d'aluminium doivent être inférieures à 2/3 de la limite élastique soit 180 MPa .

Un certificat matière est demandé sur les plans des pièces structurales.

Visserie en Inox

La visserie reprenant des efforts structuraux est en INOX-A4 – 80.

La limite élastique est $R_e = 600 \text{ MPa}$.

La limite à la rupture est $R = 800 \text{ MPa}$

Les contraintes maximales dans les vis structurales doivent être inférieures à la moitié de la limite élastique soit 300 MPa .

10.2 Le « faux capteur » et ses brides

10.2.1 Vis de fixation du « faux-capteur »

Le cahier des charges prévoit un chargement maximal pouvant générer un moment M_y de 1000 N.m au niveau de la bride du « faux capteur ».

L'écartement vertical des vis de fixation M12 est de 48mm.

F_{\max} de traction par vis = $M_y / (e * N_{\text{vis}}) = 1000 / (0,048 * 2) = 10417 \text{ N}$

σ_{\max} de traction par vis = $F * 4 / (\pi * \varnothing_{\text{noyau}}^2) = 10417 * 4 / (\pi * 10,25^2) = 126 \text{ MPa}$

Le calcul en cisaillement dans les filets de la vis et du taraudage donne des valeurs de contraintes nettement inférieure pour une implantation minimale de 1,5 fois le diamètre.

10.2.2 Couple de serrage

Moment M_y

Pour que chacune des vis travaillent de la même manière, il est préconisé de les serrer au couple. La valeur du couple de serrage de chacune des vis est calculée de telle façon que la précontrainte en traction dans la vis soit légèrement supérieure à la valeur d'effort en traction maximal calculée précédemment en appliquant le moment maxi de 1000 N.m. Le coefficient de frottement K choisi pour le calcul est de 0,15 en considérant que les vis sont bien graissées lors du montage et du serrage.

Couple de serrage (vis M12) = $K * F * \varnothing_{\text{vis}} = 0,15 * 10417 * 0,012$

Couple de serrage (vis M12) = 18,75 N.m

Moment M_x

L'application d'une précontrainte dans les vis de fixation du « faux capteur » permet également d'éviter de solliciter les pions de positionnement en cisaillement.

La force de frottement entre le « faux capteur » et sa bride doit être supérieure à la force tangentielle engendrée par le moment M_x le long des pontons et appliquée au niveau du rayon des vis de fixation du « faux capteur » (rayon mini 57mm).

La force tangentielle est donc : $F_{\text{tan}} = M_x / \text{rayon} = 600 / 0,057 = 10527 \text{ N}$

$F_{\text{frottement}} = F_{\text{normale}} * \text{Coefficient de frottement}$

Le coefficient de frottement alu/alu pris pour le calcul est 0,25

La force normale appliquée par les 4 vis doit être supérieure à 42108 N ($10527 / 0,25$)

La force normale d'une vis doit être supérieure à 10527 N

Couple de serrage (vis M12) $> 0,15 * 10527 * 0,012$

Couple de serrage (vis M12) > 18.95 N.m

Couple de serrage (vis M12) choisi (avec marge) = 28 N.m

Pour s'assurer qu'il n'y ait pas de glissement le couple de serrage préconisé est de 28 N.m pour les vis M12 de fixation du « faux capteur » sur ses brides.

Avec ce serrage au couple de 28 N.m, la force de traction dans chaque vis est donc :

$$F = C / (K * \phi_{\text{vis}}) = 28 / (0,15 * 0,012) = 15556 \text{ N}$$

et la contrainte en traction est :

$$\sigma = F * 4 / (\pi * \phi_{\text{noyau}}^2) = 15556 * 4 / (\pi * 10,25^2) = 189 \text{ MPa.}$$

10.2.3 Modèle élément fini.

Pour cette série de calcul les éléments composites du modèle ont été modifiés pour faciliter la mise en place des efforts et remplacés par des éléments acier. Le but étant de vérifier le niveau de contrainte dans les pièces en alliage d'aluminium.

Deux cas de charges et deux types de contacts ont été mis en œuvre dans les calculs soit au total 4 cas. Pour chacun des cas, l'ensemble des pièces sont en contact, un couple de serrage de 28 N.m avec un coefficient de frottement de 0,15 est appliqué en lieu et place des vis M12.

Le collage des brides n'est pas modélisé, c'est pourquoi deux types de contacts sont appliqués :

Brides non fixées en contact avec les éléments de bâti. Ce cas est très conservatif car la surface de contact est bien plus faible sur le modèle que dans la réalité par l'absence de colle et car les bride n'est pas solidaires des bâtis.

Brides solidaires des éléments de bâtis.

Pour les deux cas de chargements F_z et F_y les efforts sont appliqués de la manière suivante :

F_z : Application d'un effort vertical dirigé vers le bas de 1200 N équivalent à un effort situé au centre du couvercle de la colonne extérieure de façon à générer un moment de 1000 N.m au niveau de l'embase du « faux capteur » (distance selon X de 851,5 mm).

F_y : Application d'un effort horizontal de 1200 N équivalent à un effort situé dans la partie haute de la colonne extérieure (distance selon Z de 500 mm de l'axe des pontons et distance selon X de 851,5 mm de l'embase du « faux capteur »). Cet effort génère ainsi un moment de 1000 N.m autour de l'axe Y au niveau de l'embase du « faux capteur » et un moment de 600 N.m autour de l'axe X au niveau des pontons.

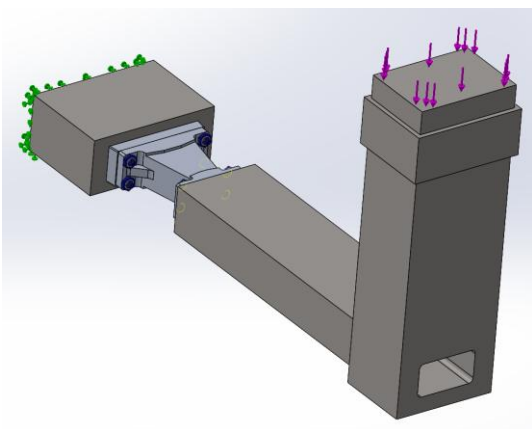


Figure 5 : Cas de chargement F_z

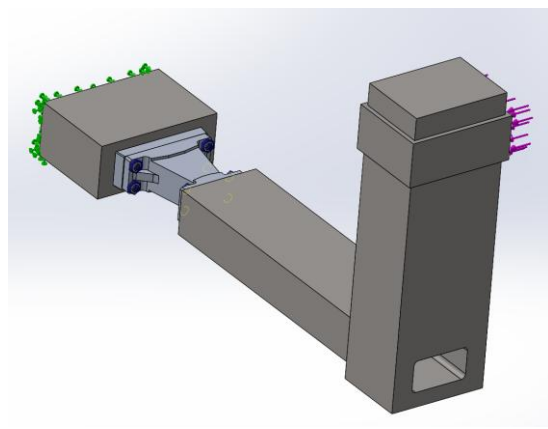


Figure 6 : Cas de chargement F_y

Fz et brides non fixées

Nom du modèle: Calcul-FauxCapteur-Embase-Contacts-V3-Renforts-Bride-M12-Precontrainte-RajoutEpFauxCapteur-Flexion-Torsion----V3-----V22
Nom de l'étude: Statique 1(-Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1

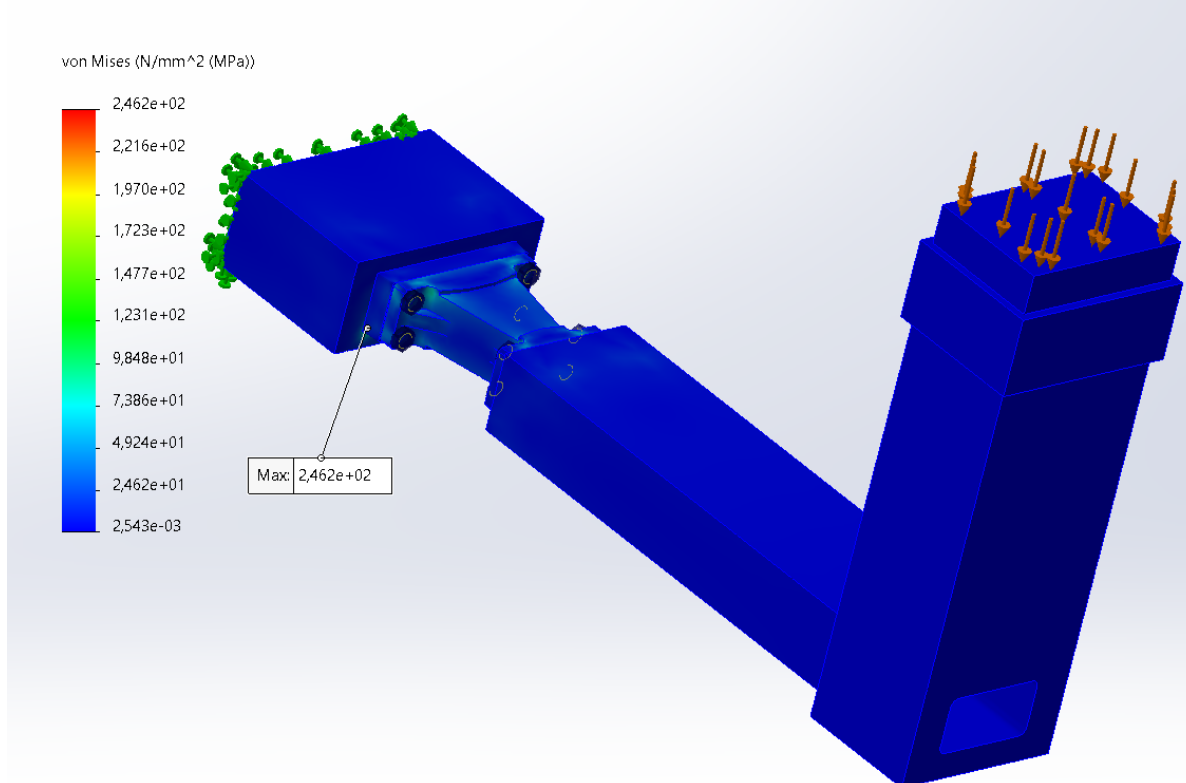
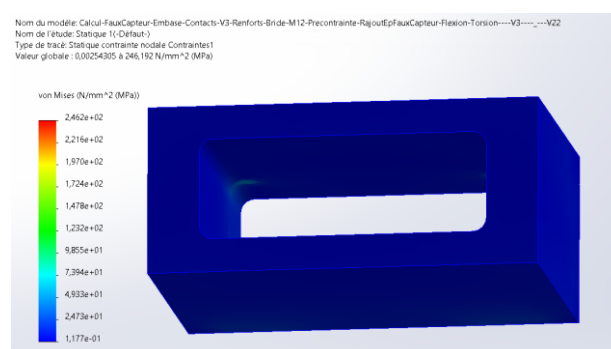
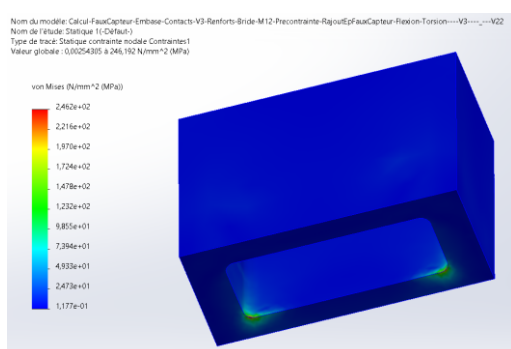
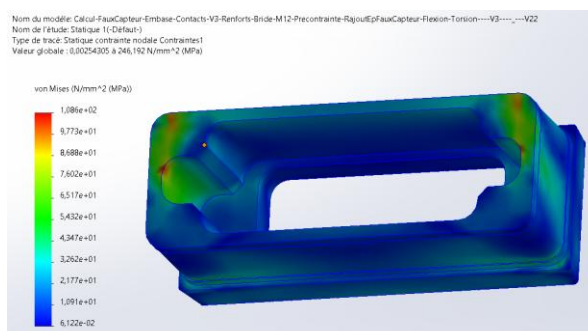
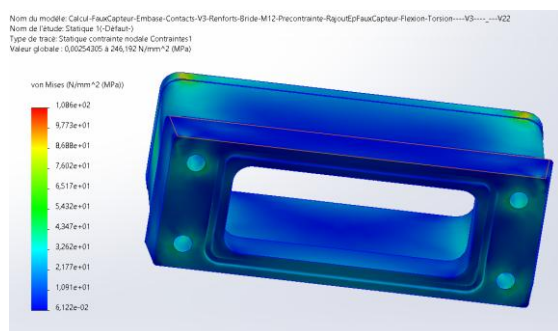


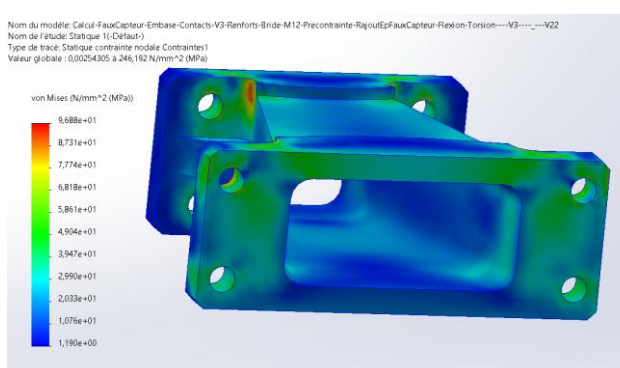
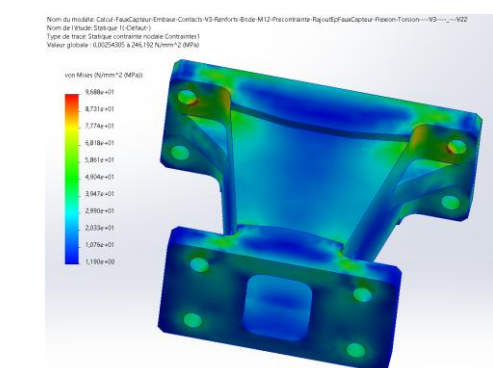
Figure 7 : Contraintes de Von Mises – Fz et brides non-fixées



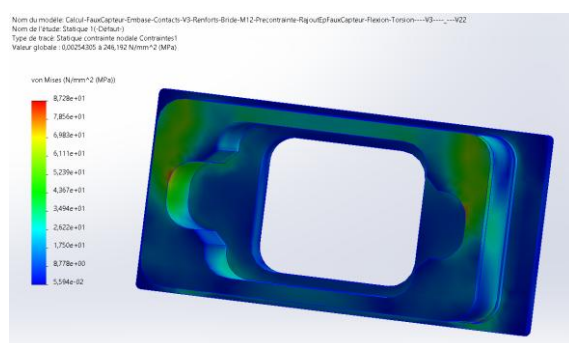
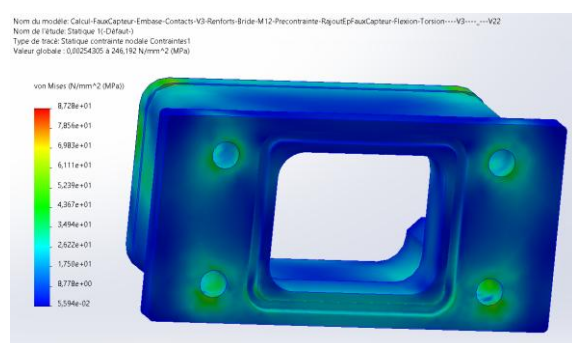
Figures 8 et 9 : Contraintes de Von Mises dans le bâti – Fz et brides non-fixées



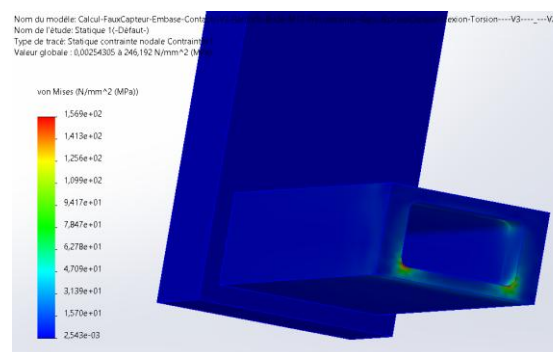
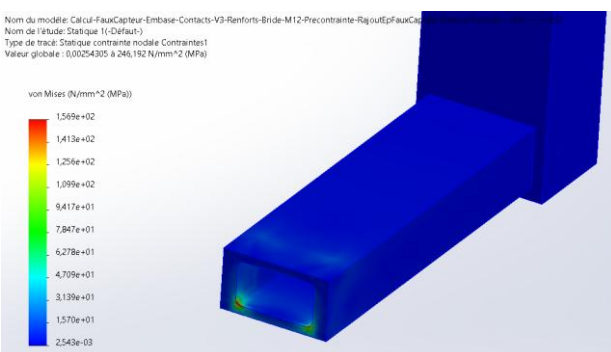
Figures 10 et 11 : Contraintes de Von Mises dans la bride centrale – Fz et brides non-fixées



Figures 12 et 13 : Contraintes de Von Mises dans le « faux capteur » – Fz et brides non-fixées



Figures 14 et 15 : Contraintes de Von Mises dans la bride extérieure– Fz et brides non-fixées



Figures 16 et 17 : Contraintes de Von Mises dans la poutre bâti– Fz et brides non-fixées

La valeur de contrainte maximale sur le bâti au contact de la bride est de 246,2 MPa est très localisée. Cette valeur est due à la une pression élevée sur une petite surface. Ce cas n'est pas très représentatif de la réalité car les pièces seront assemblées par collage, la surface de contact sera plus importante.

Dans le reste des pièces en alliage d'aluminium, « faux capteur » et brides le niveau de contrainte est inférieur à 108,6 MPa.

Fy et brides non fixées

Nom du modèle: Calcul-FauxCapteur-Embase-Contacts-V3-Renforts-Bride-M12-Precontrainte-RajoutEpFauxCapteur-Flexion-Torsion----V3----V22
Nom de l'étude: Statique 2(-Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1

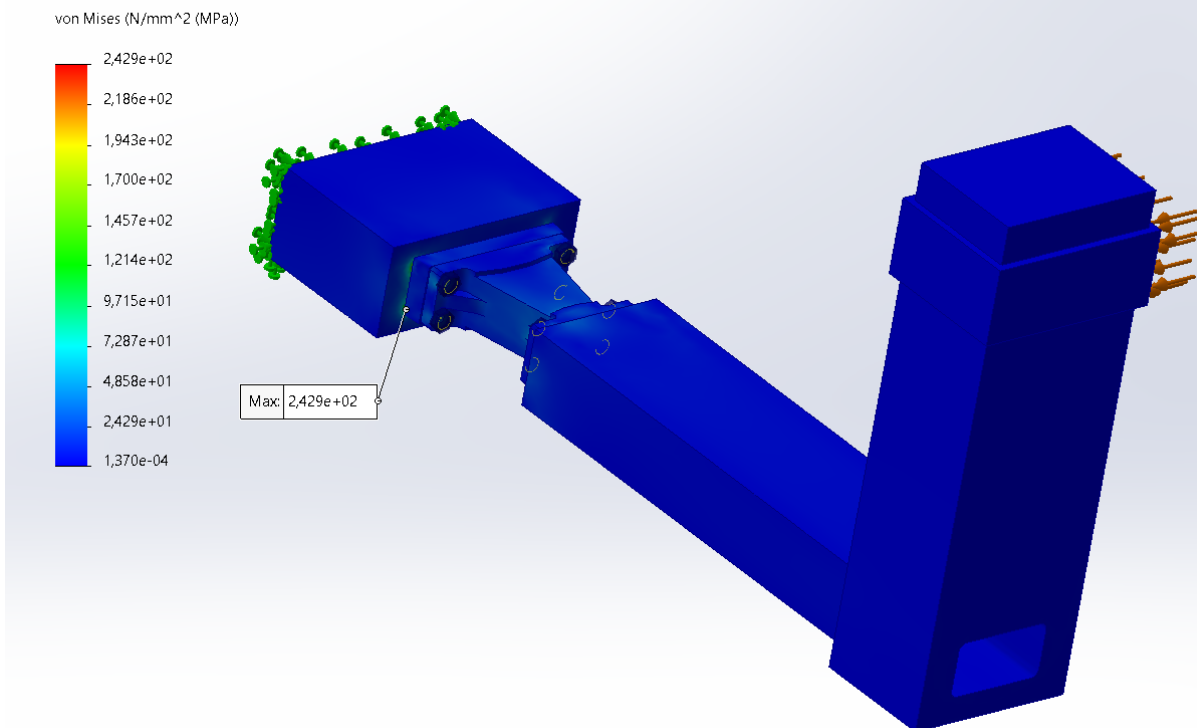
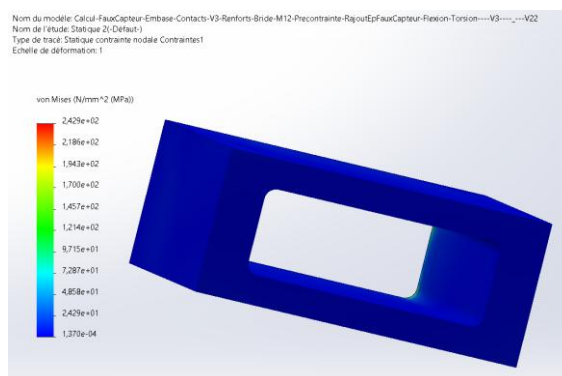
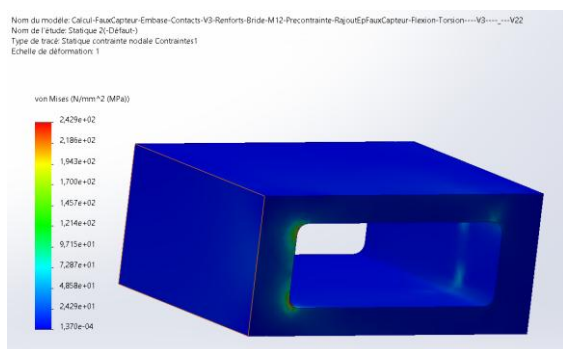
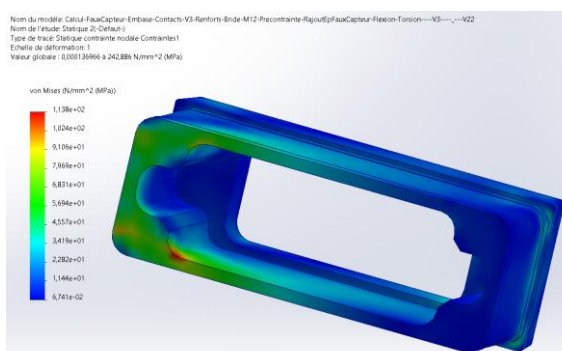
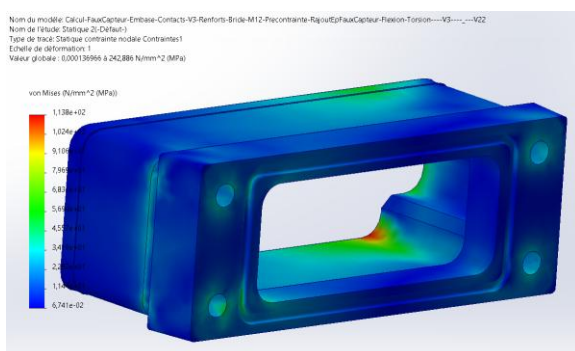


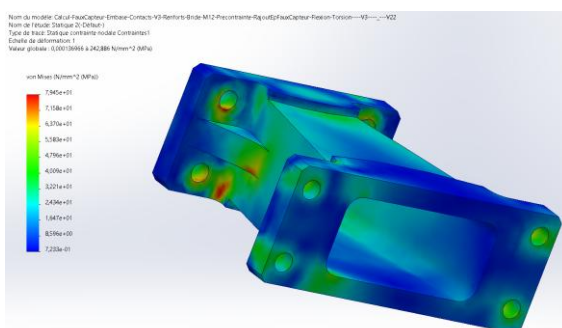
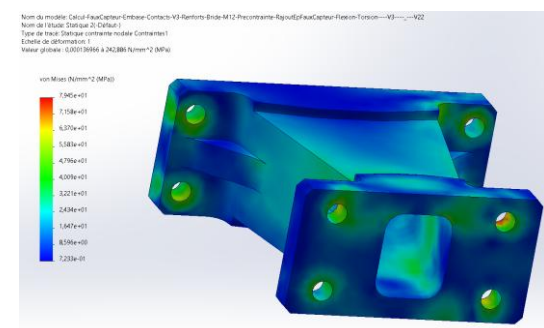
Figure 18 : Contraintes de Von Mises – Fy et brides non-fixées



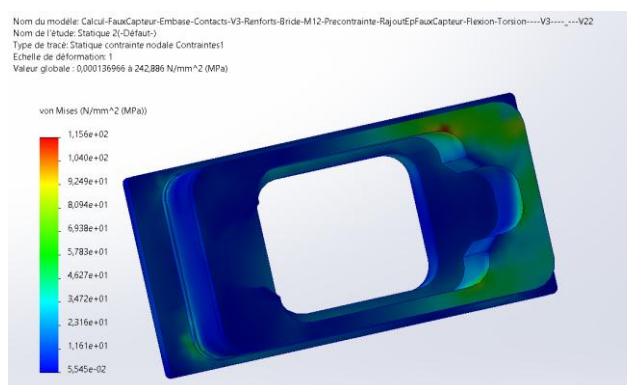
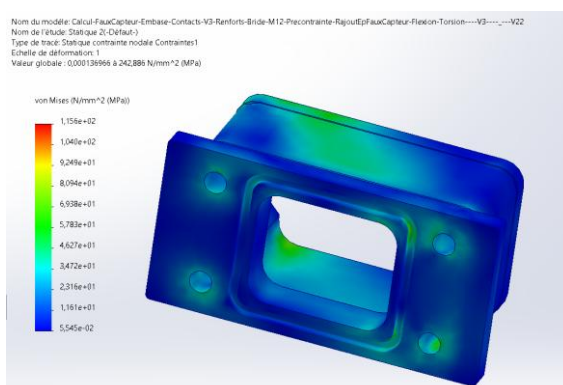
Figures 19 et 20 : Contraintes de Von Mises dans le bâti – Fy et brides non-fixées



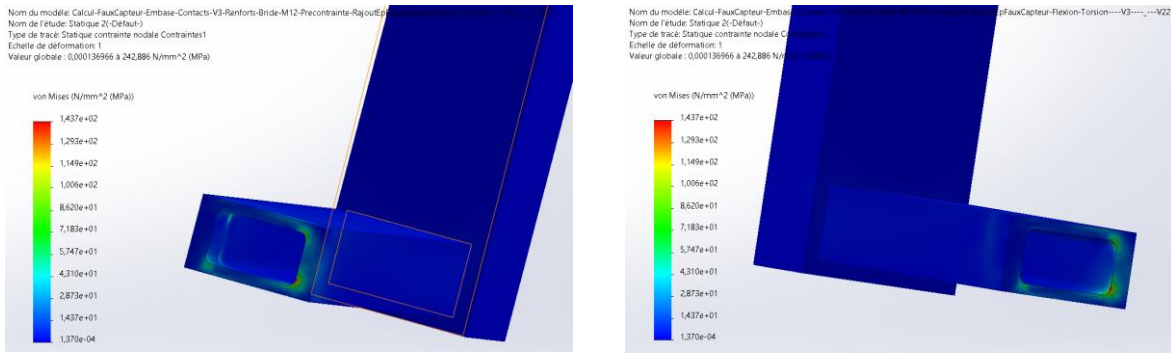
Figures 21 et 22 : Contraintes de Von Mises dans la bride centrale – Fy et brides non-fixées



Figures 23 et 24 : Contraintes de Von Mises dans le « faux capteur » – Fy et brides non-fixées



Figures 25 et 26 : Contraintes de Von Mises dans la bride extérieure– Fy et brides non-fixées



Figures 27 et 28 : Contraintes de Von Mises dans la poutre bâti– Fy et brides non-fixées

A l'instar du cas de chargement Fz, le cas de chargement Fy donne une valeur de contrainte maximale dans le bâti au contact de la bride importante mais très localisée. Cette valeur de 242,9 MPa est due à la faible surface des pièces en contact et à l'absence de collage.

Dans le reste des pièces en alliage d'aluminium, « faux capteur » et brides le niveau de contrainte est inférieur à 115,6 MPa.

Fz et brides solidaires

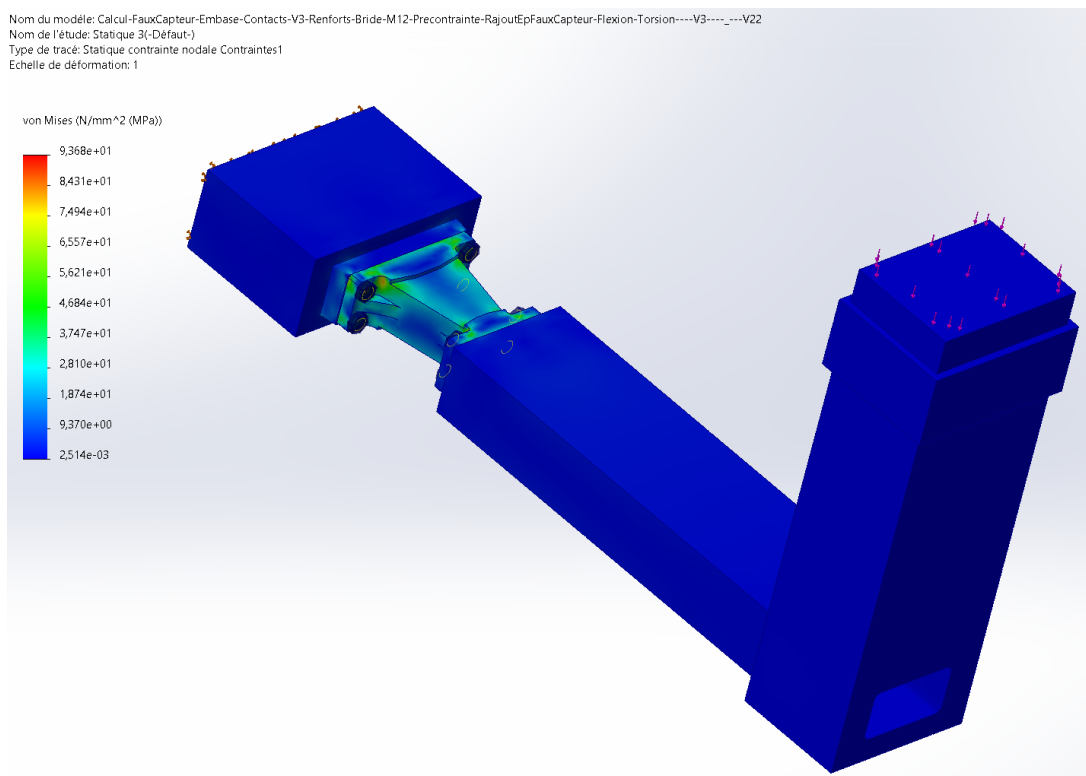


Figure 29 : Contraintes de Von Mises – Fz et brides solidaires

Le niveau de contrainte maximal pour le cas de chargement Fz avec les brides solidaires des bâtis est de 93,68 MPa.

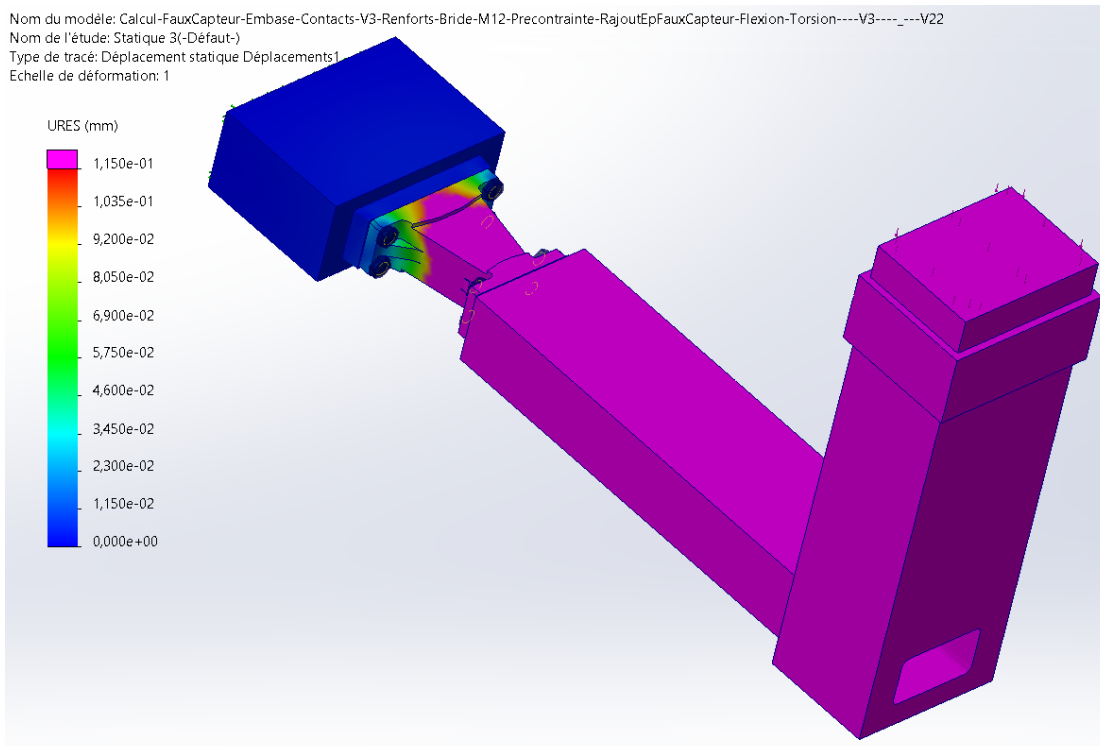


Figure 30 : Déplacements (valeur limite 0,115 mm) – Fz et brides solidaires

Afin d'assurer une étanchéité parfaite entre le « faux-capteur » et les brides, la déformation différentielle entre les pièces doit être très faible (montage du joint à plat). La compression du joint étant de 0,7mm, la valeur de déformation différentielle doit être inférieure pour que le système soit étanche. Les premiers calculs ont donné une déformation différentielle de l'ordre de 0,3 mm. Le renforcement du « faux capteur » par un ajout de matière a permis de réduire la déformation différentielle considérablement pour la ramener à 0,115 mm.

Fy et brides solidaires

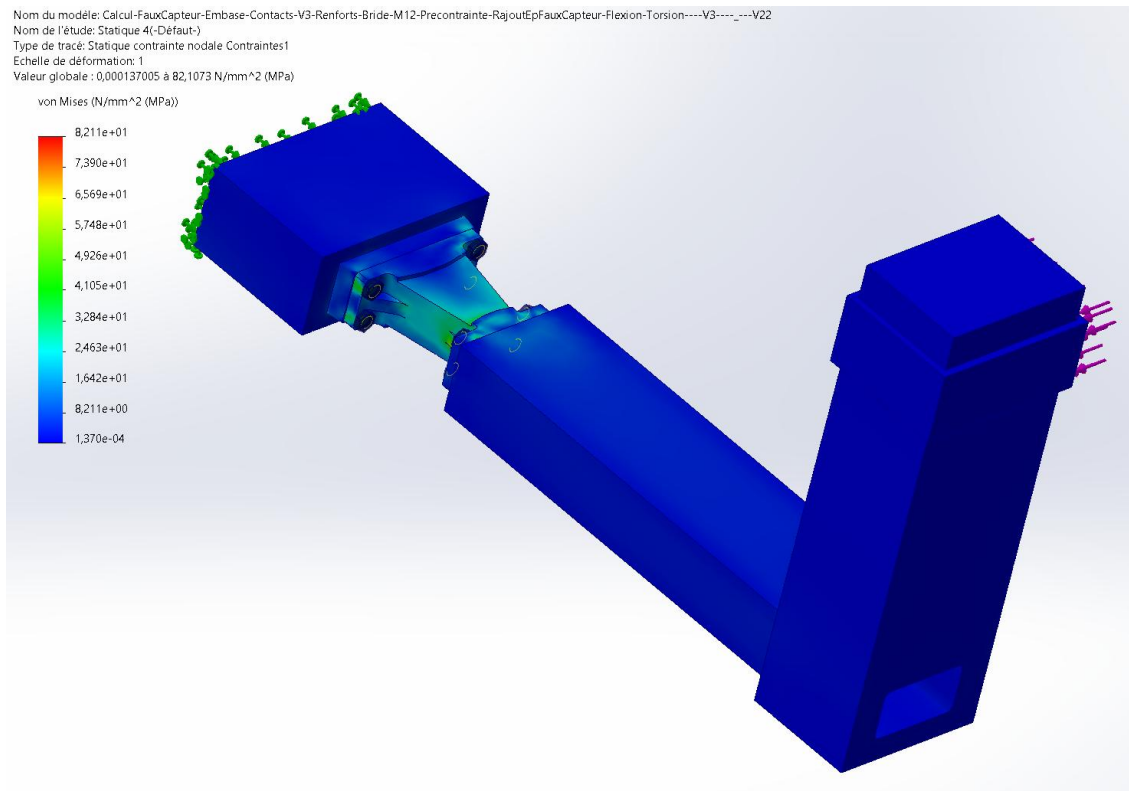


Figure 31 : Contraintes de Von Mises – Fy et brides solidaires

Le niveau de contrainte maximal pour le cas de chargement Fy avec les brides solidaires des bâtis est de 82,11 MPa.

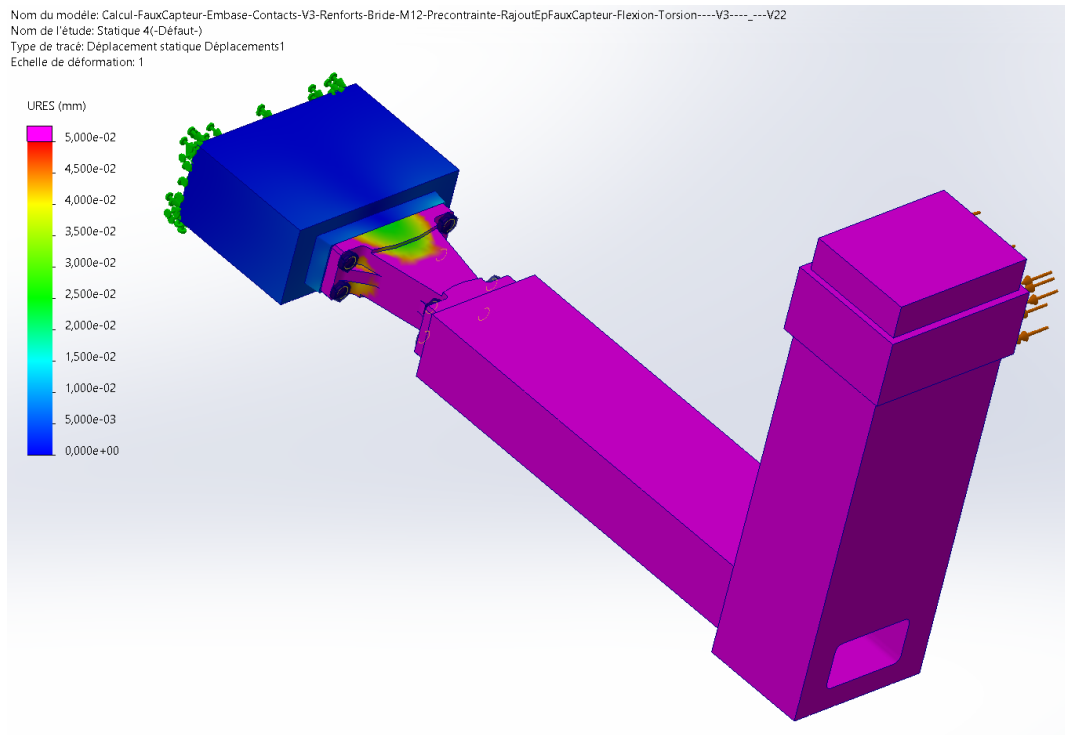


Figure 32 : Déplacements (valeur limite 0,05 mm) – Fy et brides solidaires

Pour ce cas de chargement, la déformation différentielle est en torsion et a une valeur très faible de l'ordre de 0,05mm.

Les calculs donnent un niveau maximal de contrainte inférieur à 120 MPa pour le « faux capteur » et ses brides soit un niveau de contrainte nettement inférieur au critère de 180 MPa.

10.2.4 Vérification de la contrainte en cisaillement de la colle des brides

Bride centrale - Moment My

La surface de collage de la bride centrale sollicitée avec un moment My est de :

$$\text{Scollage} = 205 * 46 = 9430 \text{ mm}^2$$

La force de cisaillement est : $F_{\text{cisaillement}} = M_y / (h_{\text{bride}} / 2) = 1000 / 0,0714 = 14006 \text{ N}$

La contrainte de cisaillement dans la colle est :

$$\tau = \sqrt{3} * F_{\text{cisaillement}} / \text{Scollage} = \sqrt{3} * 14006 / 9430 = 2,57 \text{ MPa}$$

Bride centrale - Moment Mz

La surface de collage de la bride centrale sollicitée avec un moment Mz est de :

$$\text{Scollage} = 71,4 * 46 = 3284,4 \text{ mm}^2$$

La force de cisaillement est : $F_{\text{cisaillement}} = M_z / (h_{\text{bride}} / 2) = 1000 / 0,205 = 4878 \text{ N}$

La contrainte de cisaillement dans la colle est :

$$\tau = \sqrt{3} * F_{\text{cisaillement}} / \text{Scollage} = \sqrt{3} * 4878 / 3284,4 = 2,57 \text{ MPa}$$

Bride extérieure - Moment My

La surface de collage de la bride extérieure sollicitée avec un moment My est de :

$$\text{Scollage} = 129 * 46 = 5934 \text{ mm}^2$$

La force de cisaillement est : $F_{\text{cisaillement}} = M_y / (h_{\text{bride}} / 2) = 800 / 0,0712 = 11236 \text{ N}$

La contrainte de cisaillement dans la colle est :

$$\tau = \sqrt{3} * F_{\text{cisaillement}} / \text{Scollage} = \sqrt{3} * 11236 / 5934 = 3,28 \text{ MPa}$$

Bride extérieure - Moment Mz

La surface de collage de la bride extérieure sollicitée avec un moment Mz est de :

$$\text{Scollage} = 71,2 * 46 = 3275,2 \text{ mm}^2$$

La force de cisaillement est : $F_{\text{cisaillement}} = M_z / (h_{\text{bride}} / 2) = 800 / 0,129 = 6202 \text{ N}$

La contrainte de cisaillement dans la colle est :

$$\tau = \sqrt{3} * F_{\text{cisaillement}} / \text{Scollage} = \sqrt{3} * 6202 / 3275,2 = 3,28 \text{ MPa}$$

Les valeurs de contraintes de cisaillement de la colle sont très faibles, inférieures à 4 MPa pour les sollicitations maximales et des simplifications rendant les calculs très conservatifs. Un collage structural à la résine 420 pouvant résister à des contraintes en cisaillement de l'ordre de 20 MPa.

10.3 La tape et la bride de colonne centrale

10.3.1 Vis de fixation de la tape

L'effort vertical de 1200N appliqué au centre de la colonne extérieure génère un moment M_y de 1275,6 N.m sur la tape de la colonne centrale (entraxe des colonnes de 1063 mm).

La tape est équipée de 12 vis M8 équidistantes sur un diamètre de 180 mm.

Pour simplifier, la contrainte de traction dans les vis peut être calculée en considérant que 4 vis reprennent tous les efforts générés par le moment.

Le bras de levier considéré pour le calcul est $b = 143$ mm (rayon épaulement tape (80 mm) + distance vis de l'axe (63 mm)).

$$F_{\text{max de traction par vis}} = M_y / (b * N_{\text{vis}}) = 1275,6 / (0,143 * 4) = 2230 \text{ N}$$

$$\sigma_{\text{max de traction par vis}} = F * 4 / (\pi * \varnothing_{\text{noyau}}^2) = 2230 * 4 / (\pi * 6,75^2) = 62,32 \text{ MPa}$$

Le calcul en cisaillement dans les filets de la vis et du taraudage donne des valeurs de contraintes nettement inférieure pour une implantation minimale de 1,5 fois le diamètre.

10.3.2 Couple de serrage

Moment M_y

Pour que chacune des vis travaillent de la même manière, il est préconisé de les serrer au couple. La valeur du couple de serrage de chacune des vis est calculée de telle façon que la précontrainte en traction dans la vis soit supérieure à la valeur d'effort en traction maximal calculée précédemment en appliquant le moment maxi M_y de 1275,6 N.m. Le coefficient de frottement choisi pour le calcul est de 0,15 en considérant que les vis sont bien graissées lors du montage et du serrage.

$$\text{Couple de serrage (vis M8)} = K * F * \varnothing_{\text{vis}} = 0,15 * 2230 * 0,008$$

$$\text{Couple de serrage (vis M8)} = 2,676 \text{ N.m}$$

Moment M_z

L'application d'une précontrainte dans les vis de fixation de la tape est également nécessaire pour éviter de solliciter les pions de positionnement en cisaillement.

La force de frottement doit être supérieure à la force tangentielle engendrée par le moment M_z et appliquée au niveau du rayon des vis de fixation de la tape.

Pour être conforme aux cas de chargement du « faux capteur », la valeur du moment M_z est de 1275,6 N.m (F_y (1200N) x entraxe colonnes (1063 mm)).

La force tangentielle est donc : $F_{tan} = M_z / \text{rayon} = 1275.6 / 0,090 = 14173 \text{ N}$

$F_{\text{frottement}} = F_{\text{normale}} \times \text{Coefficient de frottement}$

Le coefficient de frottement alu/alu pris pour le calcul est 0,25

La force normale des 12 vis doit être supérieure à 56692 N ($14173 / 0,25$)

La force normale d'une vis doit être supérieure à 4724 N

Couple de serrage (vis M8) $> 0,15 * 4724 * 0,008$

Couple de serrage (vis M8) $> 5.67 \text{ N.m}$

Couple de serrage (vis M8) choisi (avec marge) = 8 N.m

Pour s'assurer qu'il n'y ait pas de glissement le couple de serrage préconisé est de 8 N.m pour les 12 vis M8 de fixation de la tape

Avec ce serrage au couple de 8 N.m, la force de traction dans chaque vis est donc :

$F = C / (K * \phi_{\text{vis}}) = 8 / (0,15 * 0,008) = 6667 \text{ N}$

et la contrainte en traction est :

$\sigma = F * 4 / (\pi * \phi_{\text{noyau}}^2) = 6667 * 4 / (\pi * 6,75^2) = 186 \text{ MPa.}$

10.3.3 Modèle élément fini.

Pour cette série de calcul les éléments composites du modèle ont été également modifiés pour faciliter la mise en place des efforts et remplacés par des éléments acier. Le but étant de vérifier le niveau de contrainte dans les pièces en alliage d'aluminium.

Quatre modèles de calculs ont été mis en œuvre. Deux types de contacts ont été modélisés avec deux cas de chargements.

Les types de contacts sont les suivants :

- **Solidaire** : L'ensemble des pièces sont solidaires.
- **Visserie** : Contact entre les pièces avec un coefficient de friction de 0,15 et mise en place d'éléments de modélisation de la visserie de la balance et de la tape. La modélisation des vis M8 prend en compte le serrage au couple de 8 N.m et le coefficient de frottement de 0,15. Dans cette modélisation, la bride est solidaire du bâti.

Les deux cas de chargements sont les suivants :

- **Fz** : Application d'un effort vertical dirigé vers le bas de 1200 N équivalent à un effort situé au centre du couvercle de la colonne extérieure de façon à générer un moment

M_y de 1275,6 N.m au niveau du centre de la tige de la colonne centrale (distance selon X de 1063 mm).

- **F_y** : Application d'un effort horizontal de 1200 N équivalent à un effort situé au bas de la colonne extérieure de façon à générer des moments M_z de 1275,6 N.m et M_x de 780 N.m au niveau du centre de la tige de la colonne centrale (distance selon X de 1063 mm et selon z de 650 mm).

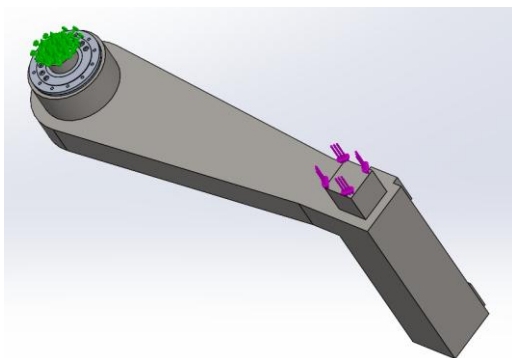


Figure 33 : Modèle 1 – contacts solidaire - cas de chargement Fz

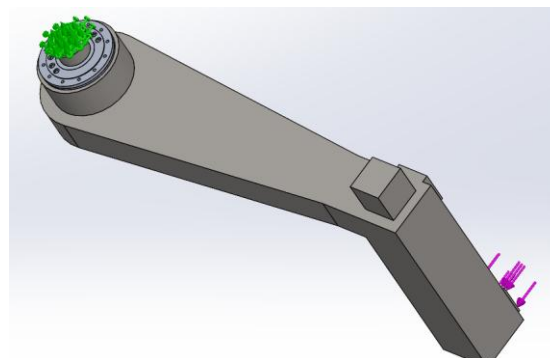


Figure 34 : Modèle 2 – contacts solidaire - cas de chargement Fy

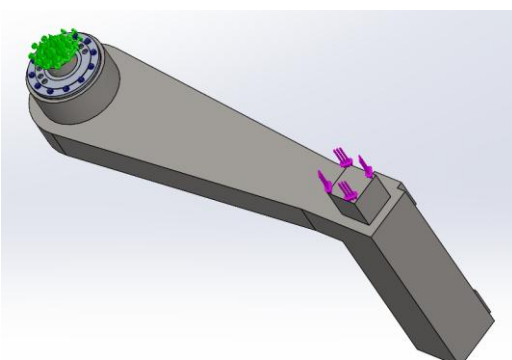


Figure 35 : Modèle 3 – contacts visserie - cas de chargement Fz

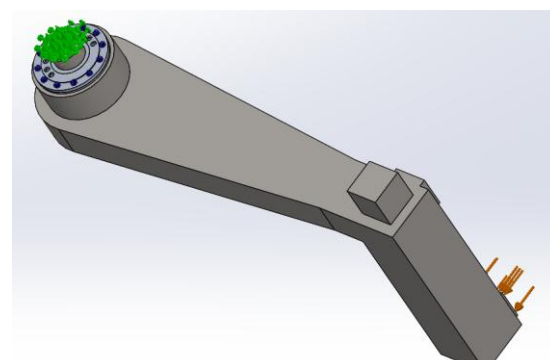
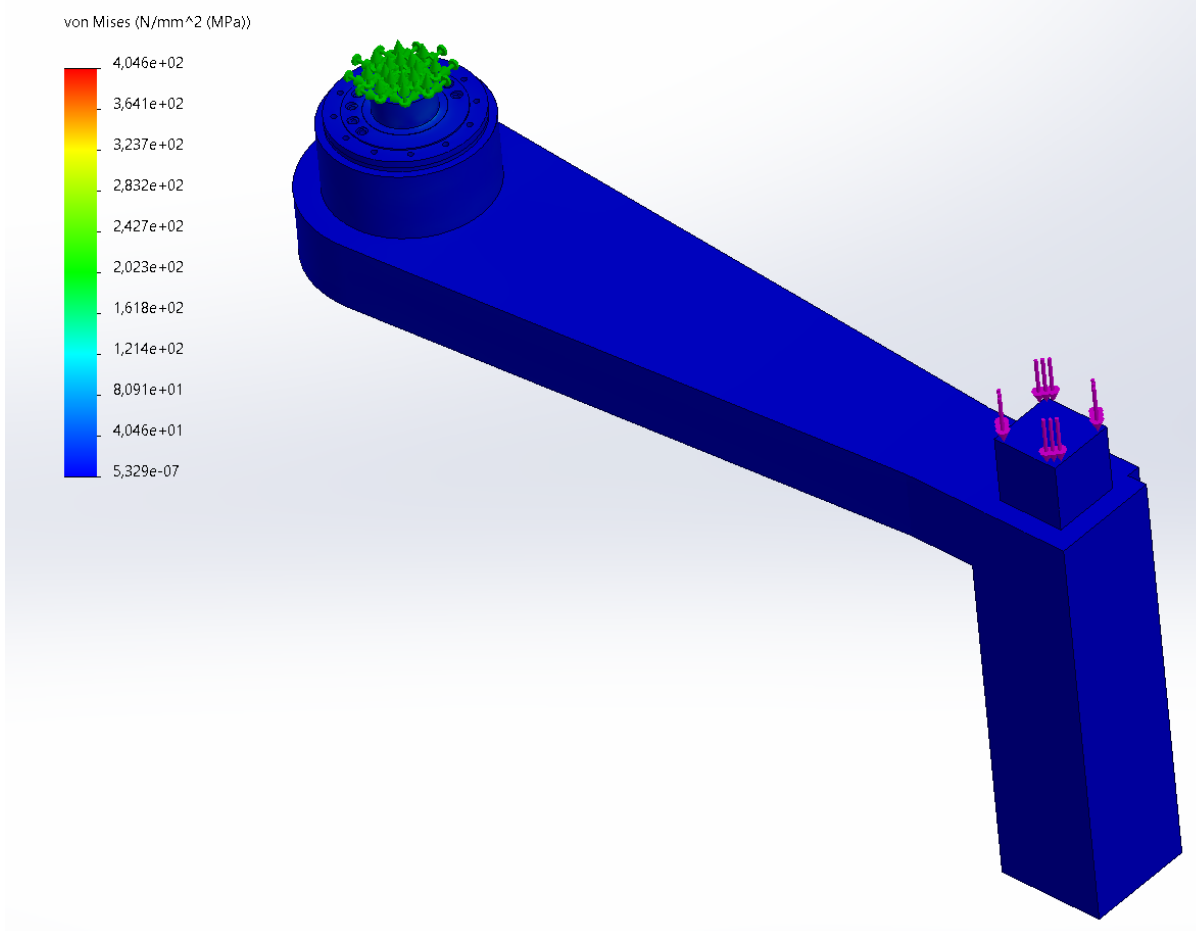


Figure 36 : Modèle 4 – contacts visserie - cas de chargement Fy

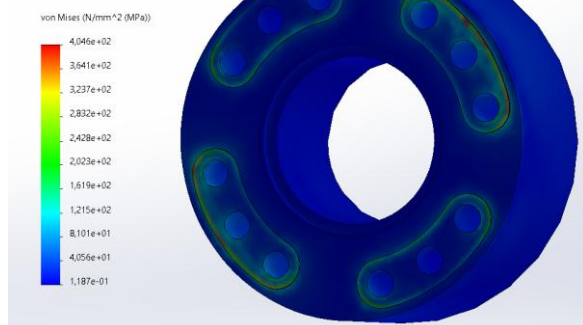
Modèle 1 – contacts solidaire - cas de chargement Fz

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-V8-V9
Nom de l'étude: Statique 3-(-Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 5,32897e-07 à 404,572 N/mm² (MPa)

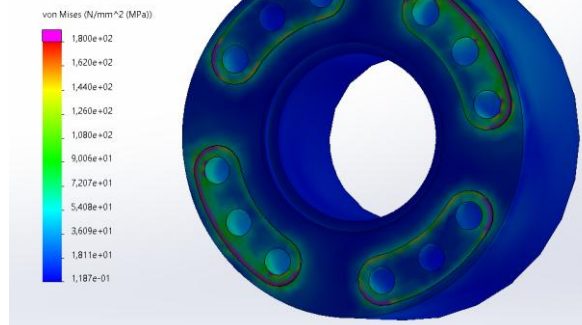


*Figure 37 : Contraintes de Von Mises –
Modèle 1 – contacts solidaire - cas de chargement Fz*

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 3-(Default-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 92,8026
Valeur globale: 5,32897e-07 à 404,572 N/mm² (MPa)

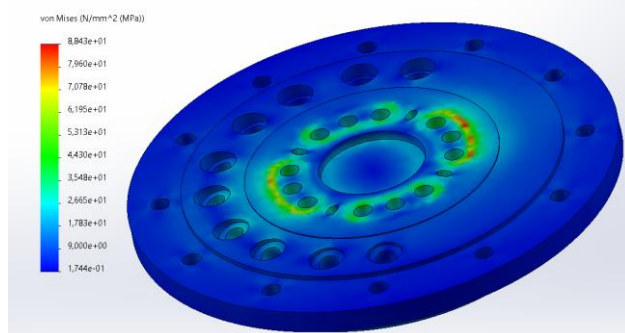


Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 3-(Default-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 92,8026
Valeur globale: 5,32897e-07 à 404,572 N/mm² (MPa)

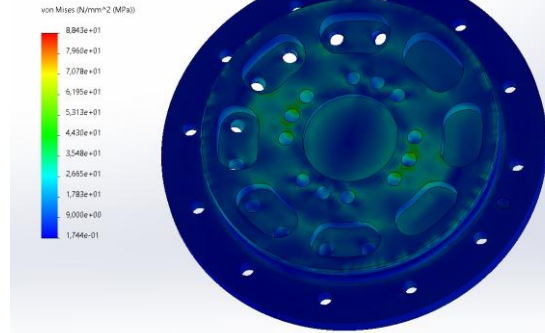


Figures 38 et 39 : Contraintes de Von Mises – Interface balance BG2 -
Modèle 1 – contacts solidaire - cas de chargement Fz

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 3-(Default-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 5,32897e-07 à 404,572 N/mm² (MPa)

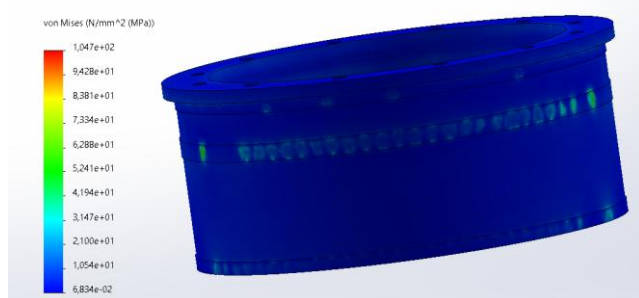


Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 3-(Default-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 5,32897e-07 à 404,572 N/mm² (MPa)

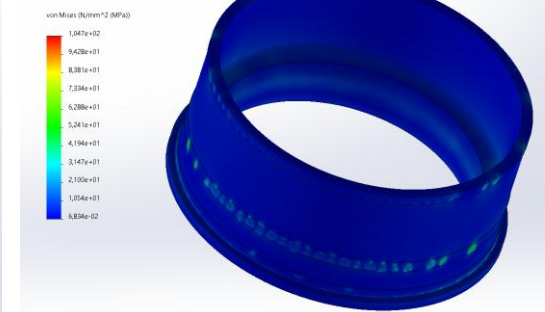


Figures 40 et 41 : Contraintes de Von Mises – Tape colonne centrale -
Modèle 1 – contacts solidaire - cas de chargement Fz

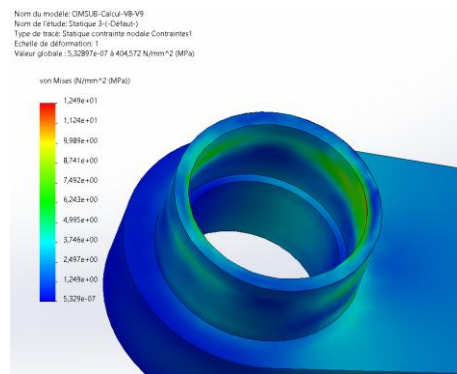
Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 3-(Default-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 5,32897e-07 à 404,572 N/mm² (MPa)



Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 3-(Default-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 5,32897e-07 à 404,572 N/mm² (MPa)



Figures 42 et 43 : Contraintes de Von Mises – Bride supérieure colonne centrale -
Modèle 1 – contacts solidaire - cas de chargement Fz



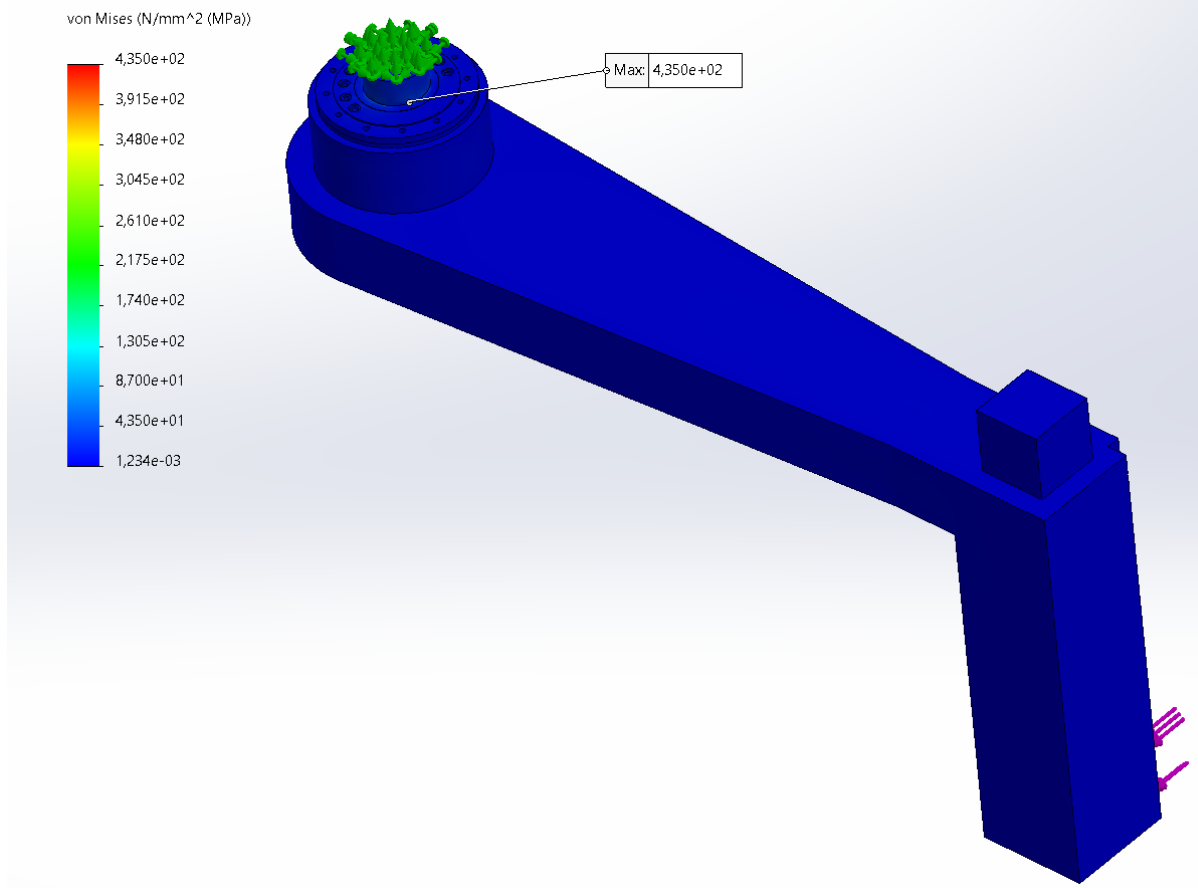
*Figure 44 : Contraintes de Von Mises – Contact bâti -
Modèle 1 – contacts solidaire - cas de chargement Fz*

Les calculs issus de ce modèle nous donnent un niveau de contraintes tout à fait acceptable de l'ordre de 105 MPa maximum dans la tige et la bride supérieure.

Le niveau élevé de contraintes sur l'interface balance BG2 est très localisé. Ce niveau de contrainte est lié à la faible épaisseur de matière qui génère une distorsion des mailles du modèle élément finis.

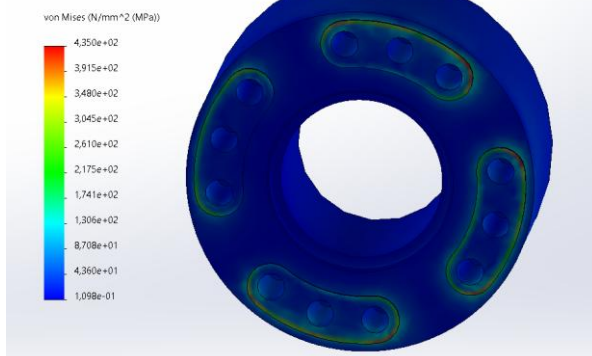
Modèle 2 – contacts solidaire - cas de chargement Fy

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-V8-V9
Nom de l'étude: Statique 5(-Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 0,00123367 à 434,976 N/mm² (MPa)

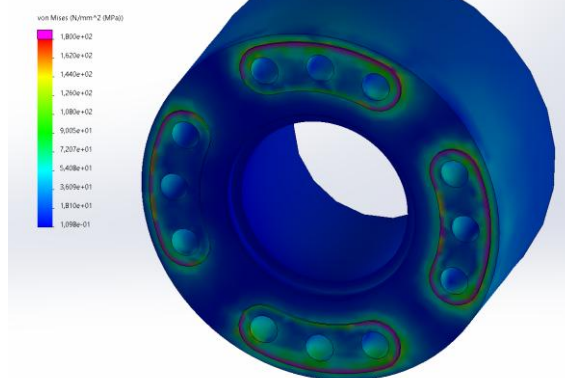


*Figure 45 : Contraintes de Von Mises –
Modèle 2 – contacts solidaire - cas de chargement Fy*

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique S1 (Défaut)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 0,00123387 à 434,976 N/mm² (MPa)

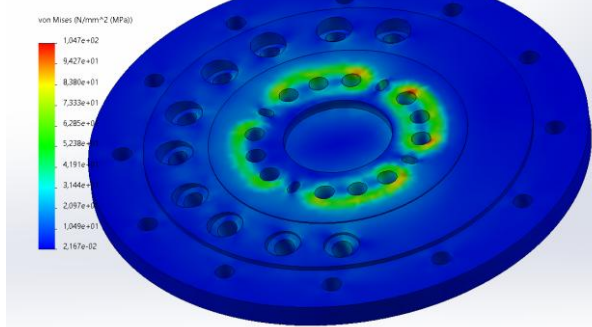


Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique S1 (Défaut)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 0,00123387 à 434,976 N/mm² (MPa)

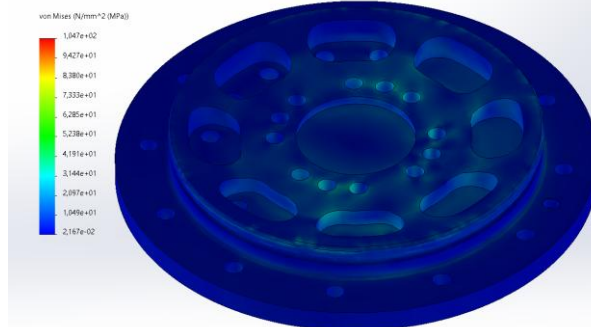


Figures 46 et 47 : Contraintes de Von Mises – Interface balance BG2 -
Modèle 2 – contacts solidaire - cas de chargement Fy

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique S1 (Défaut)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 0,00123387 à 434,976 N/mm² (MPa)

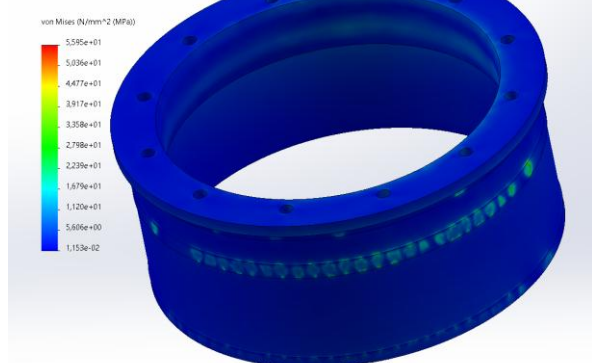


Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique S1 (Défaut)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 0,00123387 à 434,976 N/mm² (MPa)

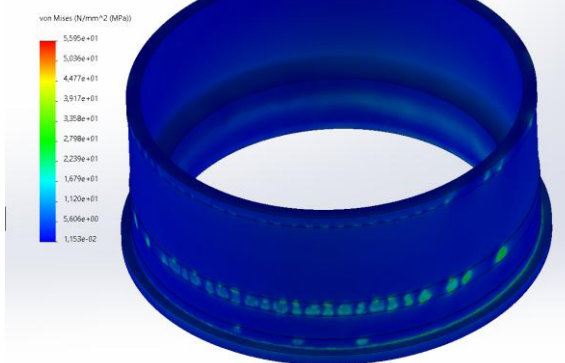


Figures 48 et 49 : Contraintes de Von Mises – Tape colonne centrale -
Modèle 2 – contacts solidaire - cas de chargement Fy

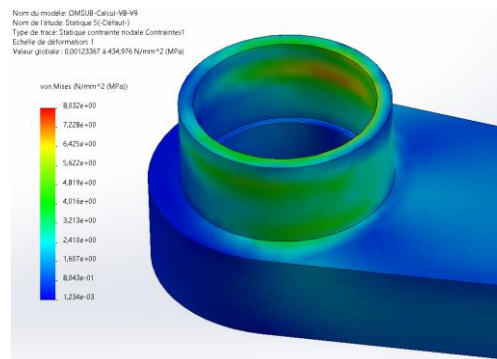
Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique S1 (Défaut)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 0,00123387 à 434,976 N/mm² (MPa)



Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique S1 (Défaut)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 0,00123387 à 434,976 N/mm² (MPa)



Figures 50 et 51 : Contraintes de Von Mises – Bride supérieure colonne centrale -
Modèle 2 – contacts solidaire - cas de chargement Fy



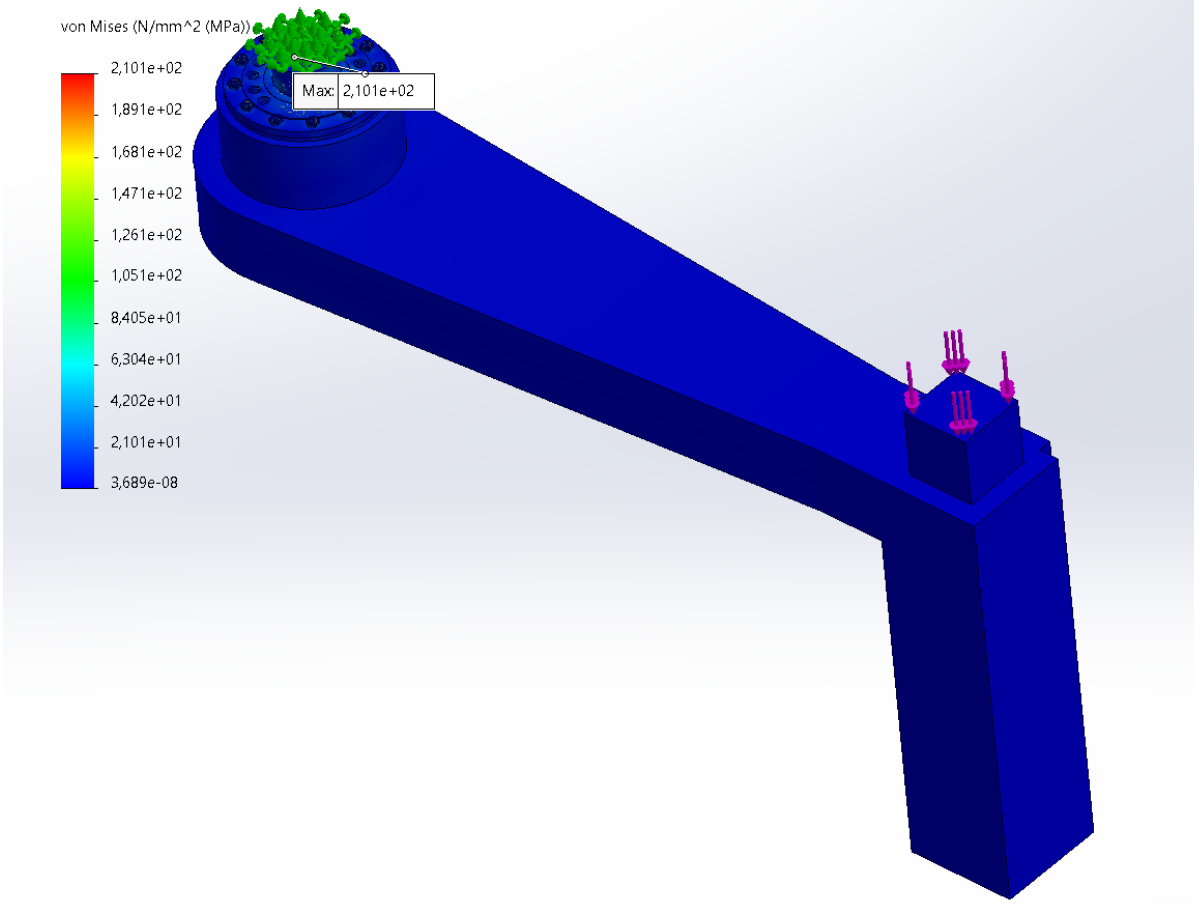
*Figure 52 : Contraintes de Von Mises – Contact bâti -
Modèle 2 – contacts solidaire - cas de chargement Fy*

A l'instar du modèle 1, les calculs issus du modèle 2 nous donnent un niveau de contraintes tout à fait acceptable de l'ordre de 105 MPa maximum dans la tige et la bride supérieure.

Le niveau élevé de contraintes sur l'interface balance BG2 est très localisé. Ce niveau de contrainte est lié à la faible épaisseur de matière qui génère une distorsion des mailles du modèle élément finis.

Modèle 3 – contacts visserie -cas de chargement Fz

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-V8-V9
Nom de l'étude: Statique 6-(-Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 3,68948e-08 à 210,12 N/mm² (MPa)

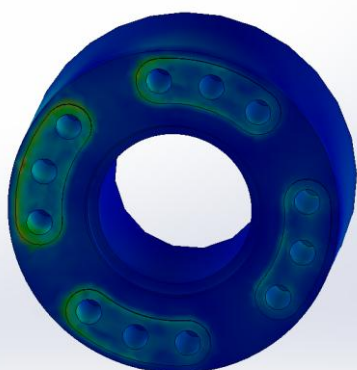


*Figure 53 : Contraintes de Von Mises –
Modèle 3 – contacts visserie -cas de chargement Fz*

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 6-(Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 3,68948e-08 à 210,12 N/mm² (MPa)

von Mises (N/mm² (MPa))

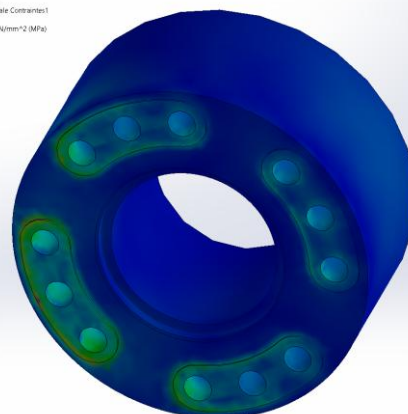
2,101e+02
1,892e+02
1,682e+02
1,472e+02
1,262e+02
1,053e+02
8,430e+01
6,333e+01
4,236e+01
2,139e+01
4,196e-01



Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 6-(Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 3,68948e-08 à 210,12 N/mm² (MPa)

von Mises (N/mm² (MPa))

1,800e+02
1,641e+02
1,441e+02
1,261e+02
1,062e+02
9,021e+01
7,225e+01
5,429e+01
3,634e+01
1,838e+01
4,196e-01

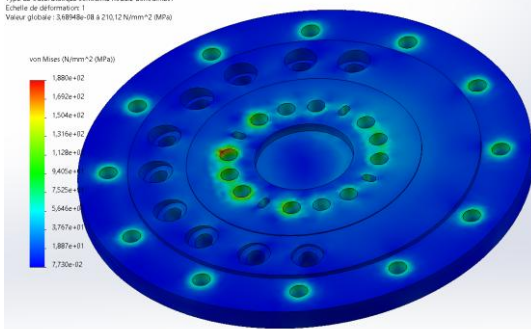


Figures 54 et 55 : Contraintes de Von Mises – Interface balance BG2 -
Modèle 3 – contacts visserie -cas de chargement Fz

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 6-(Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 3,68948e-08 à 210,12 N/mm² (MPa)

von Mises (N/mm² (MPa))

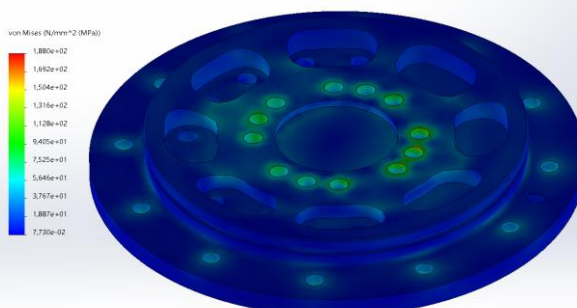
1,880e+02
1,662e+02
1,504e+02
1,316e+02
1,128e+02
9,405e+01
7,525e+01
5,646e+01
3,767e+01
1,887e+01
1,730e-02



Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 6-(Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 3,68948e-08 à 210,12 N/mm² (MPa)

von Mises (N/mm² (MPa))

1,880e+02
1,662e+02
1,504e+02
1,316e+02
1,128e+02
9,405e+01
7,525e+01
5,646e+01
3,767e+01
1,887e+01
1,730e-02

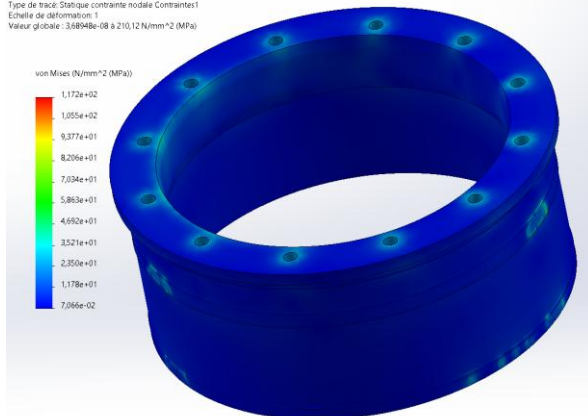


Figures 56 et 57 : Contraintes de Von Mises – Tape colonne centrale -
Modèle 3 – contacts visserie -cas de chargement Fz

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 6-(Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 3,68948e-08 à 210,12 N/mm² (MPa)

von Mises (N/mm² (MPa))

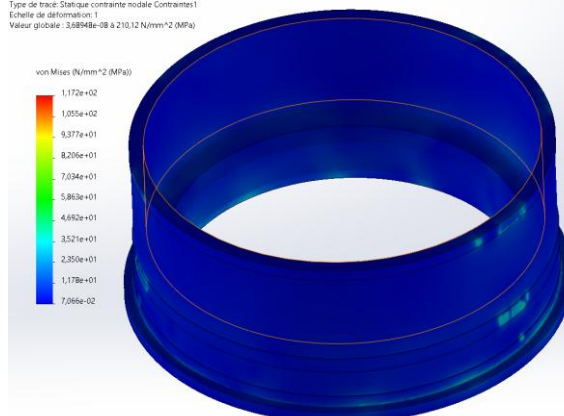
1,172e+02
1,055e+02
9,377e+01
8,206e+01
7,034e+01
5,863e+01
4,692e+01
3,521e+01
2,350e+01
1,178e+01
7,066e-02



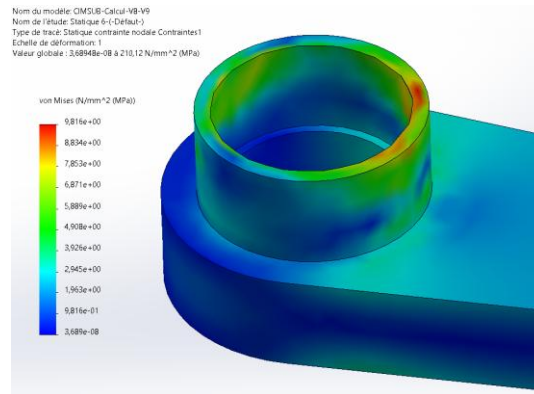
Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-VB-V9
Nom de l'étude: Statique 6-(Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale: 3,68948e-08 à 210,12 N/mm² (MPa)

von Mises (N/mm² (MPa))

1,172e+02
1,055e+02
9,377e+01
8,206e+01
7,034e+01
5,863e+01
4,692e+01
3,521e+01
2,350e+01
1,178e+01
7,066e-02



Figures 58 et 59 : Contraintes de Von Mises – Bride supérieure colonne centrale -
Modèle 3 – contacts visserie -cas de chargement Fz



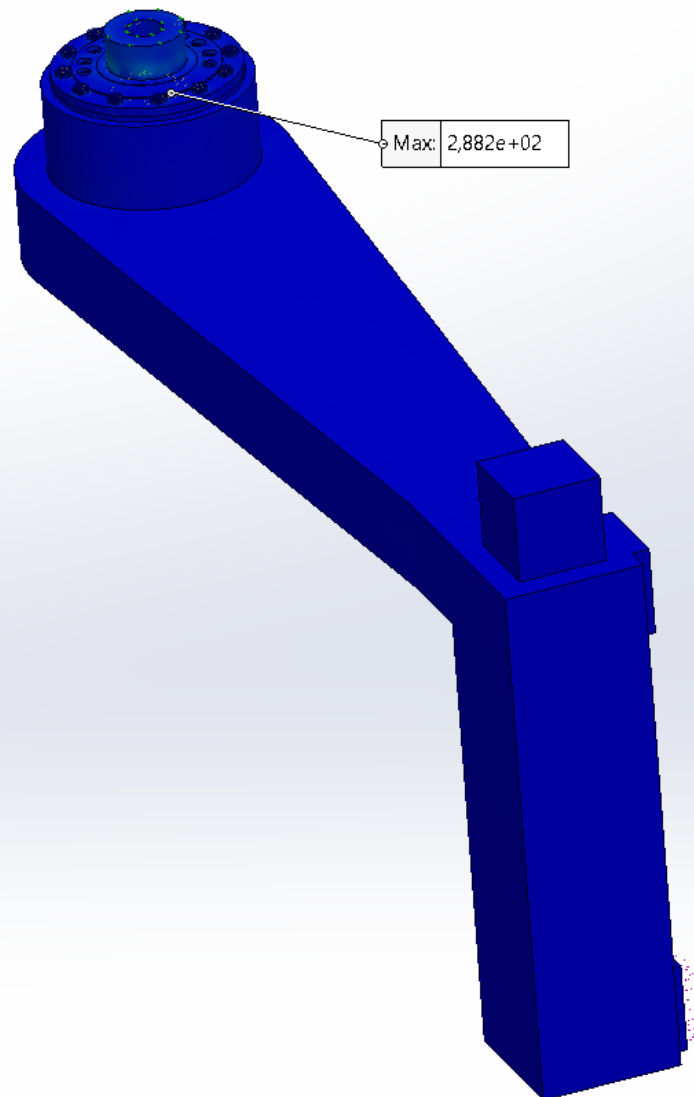
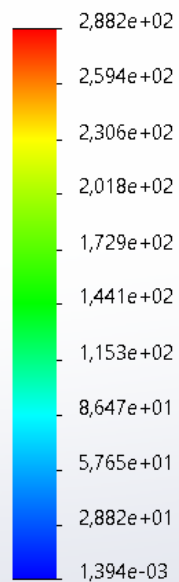
*Figure 60 : Contraintes de Von Mises – Contact bâti -
Modèle 3 – contacts visserie -cas de chargement Fz*

Les calculs issus de ce modèle nous donnent un niveau de contraintes de 188 MPa maximum dans la tôle et de 117 MPa dans la bride. La légère sur-contrainte dans la tôle résulte du modèle et notamment de la modélisation des vis. Cette sur-contrainte est très localisée et n'est pas représentative de la réalité car la surface d'appui des vis n'est pas prise en compte dans le modèle. Le niveau de contrainte est tout à fait acceptable.

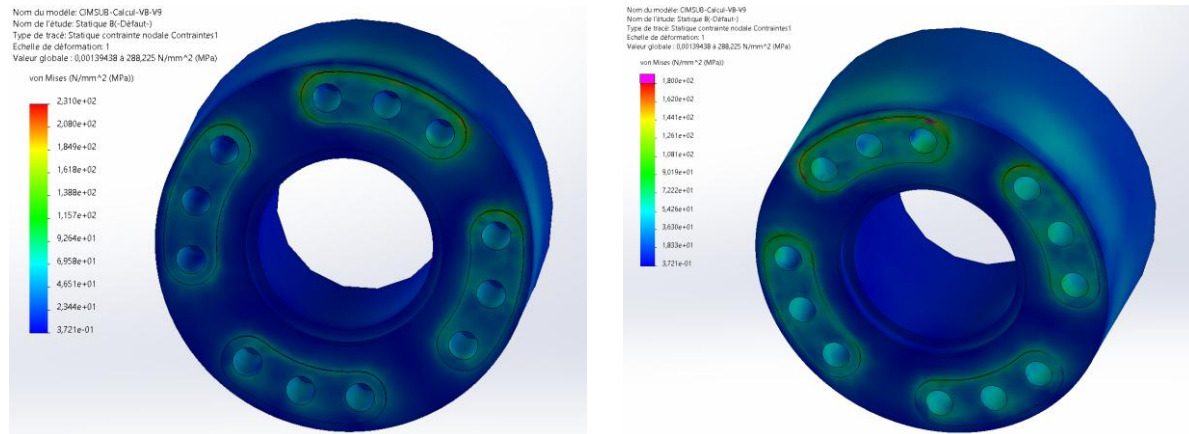
Modèle 4 – contacts visserie -cas de chargement Fy

Nom du modèle: CIMSUB-Calcul-V8-V9
Nom de l'étude: Statique 8(-Défaut-)
Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
Echelle de déformation: 1
Valeur globale : 0,00139438 à 288,225 N/mm² (MPa)

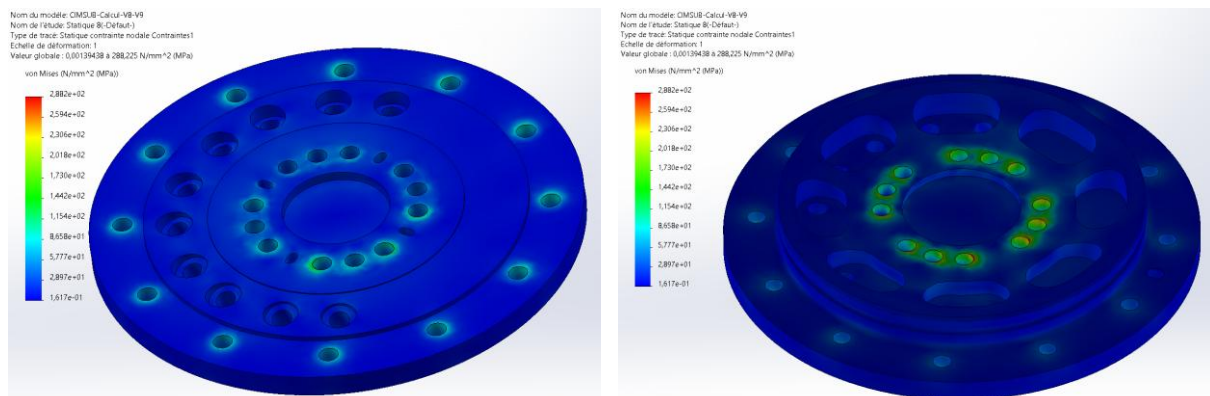
von Mises (N/mm² (MPa))



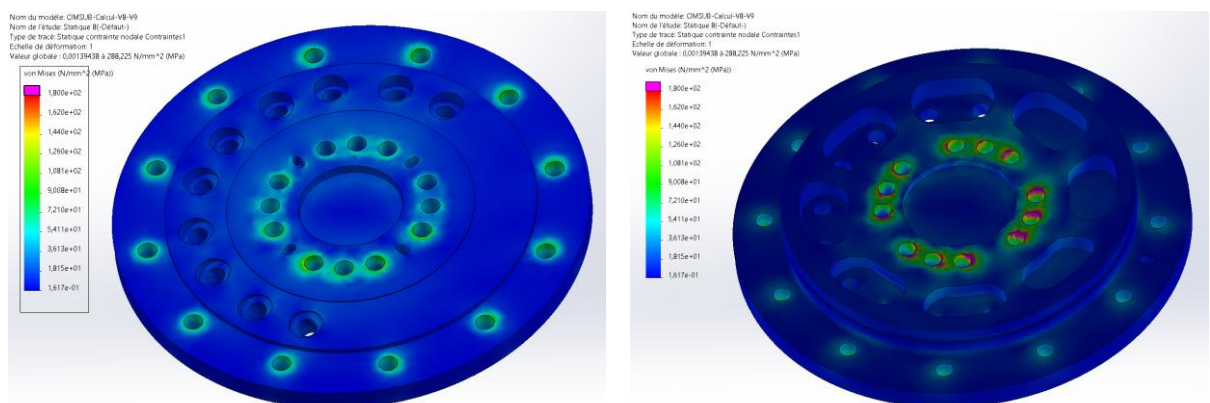
*Figure 61 : Contraintes de Von Mises –
Modèle 4 – contacts visserie -cas de chargement Fy*



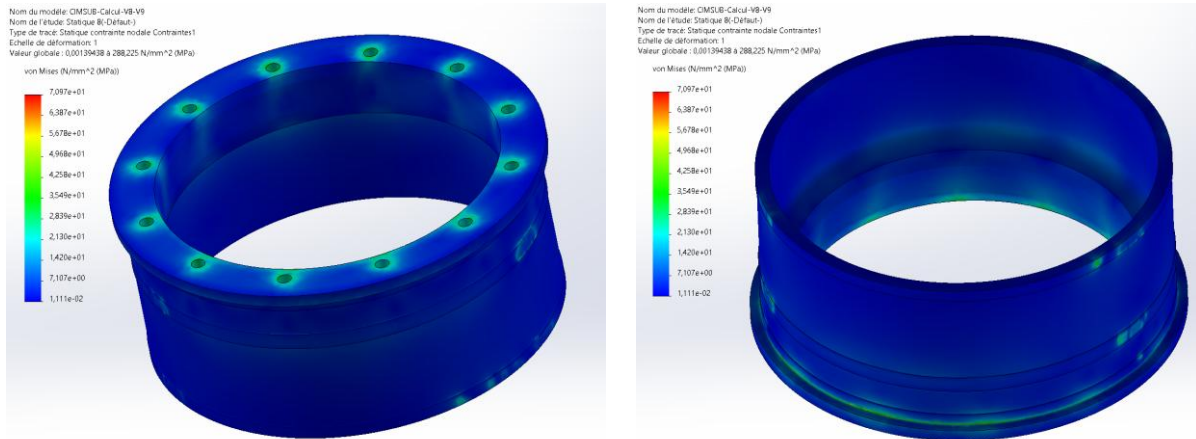
Figures 62 et 63 : Contraintes de Von Mises – Interface balance BG2 -
Modèle 4 – contacts visserie -cas de chargement Fy



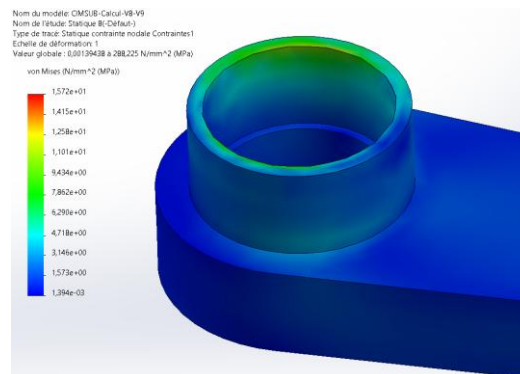
Figures 64 et 65 : Contraintes de Von Mises – Tape colonne centrale -
Modèle 4 – contacts visserie -cas de chargement Fy



Figures 66 et 67 : Contraintes de Von Mises (limitées à 180 MPa) – Tape colonne centrale -
Modèle 4 – contacts visserie -cas de chargement Fy



*Figures 68 et 69 : Contraintes de Von Mises – Bride supérieure colonne centrale -
Modèle 4 – contacts visserie -cas de chargement Fy*



*Figure 70 : Contraintes de Von Mises – Contact bâti -
Modèle 4 – contacts visserie -cas de chargement Fy*

Les calculs issus de ce modèle nous donnent un niveau de contraintes de 288 MPa maximum dans la tôle et de 71 MPa dans la bride. Comme pour le modèle 3, la sur-contrainte dans la tôle résulte du modèle et notamment de la modélisation des vis. Cette sur-contrainte est très localisée et n'est pas représentative de la réalité car la surface d'appui des vis n'est pas prise en compte dans le modèle. Le niveau de contrainte est tout à fait acceptable.

10.3.4 Vérification de la contrainte en cisaillement de la colle de la bride

Moment M_z

La surface de collage sollicitée avec un moment M_z est de :

$$\text{Scollage} = \pi * \varnothing_{\text{bride}} * h_{\text{collagebride}} = \pi * 197,4 * 60 = 37210 \text{ mm}^2$$

$$\text{La force de cisaillement est : } F_{\text{cisaillement}} = M_z / R_{\text{bride}} = 1275,6 / 0,0987 = 12924 \text{ N}$$

La contrainte de cisaillement dans la colle est :

$$\tau = \sqrt{3} * F_{\text{cisaillement}} / \text{Scollage} = \sqrt{3} * 12924 / 37210 = 0,6 \text{ MPa}$$

Moment M_y

Un calcul simple et très conservatif consiste à considérer que la surface de collage sollicitée avec un moment M_y est de 1/6 de la surface totale de collage, soit une sollicitation sur 60° de la bride.

$$S'_{\text{collage}} = \text{Scollage} / 6 = 6201 \text{ mm}^2$$

Dans ce cas la force de cisaillement est :

$$F'_{\text{cisaillement}} = M_y / \varnothing_{\text{bride}} = 1275,6 / 0,1974 = 6462 \text{ N}$$

La contrainte de cisaillement dans la colle est :

$$\tau' = \sqrt{3} * F'_{\text{cisaillement}} / S'_{\text{collage}} = \sqrt{3} * 6462 / 6201 = 1,04 \text{ MPa}$$

Les valeurs de contraintes de cisaillement de la colle sont très faibles, de l'ordre de 1 MPa pour les sollicitations maximales et des simplifications générant un calcul très conservatif. Un collage structurel à la Rédux 420 pouvant résister à des contraintes en cisaillement de l'ordre de 20 MPa.

10.4 Vérification des modes propres des supports de lests des colonnes

Un calcul sous Inventor Nastran a permis de vérifier les modes propres de la barre support de lest avec un lest de 8Kg.

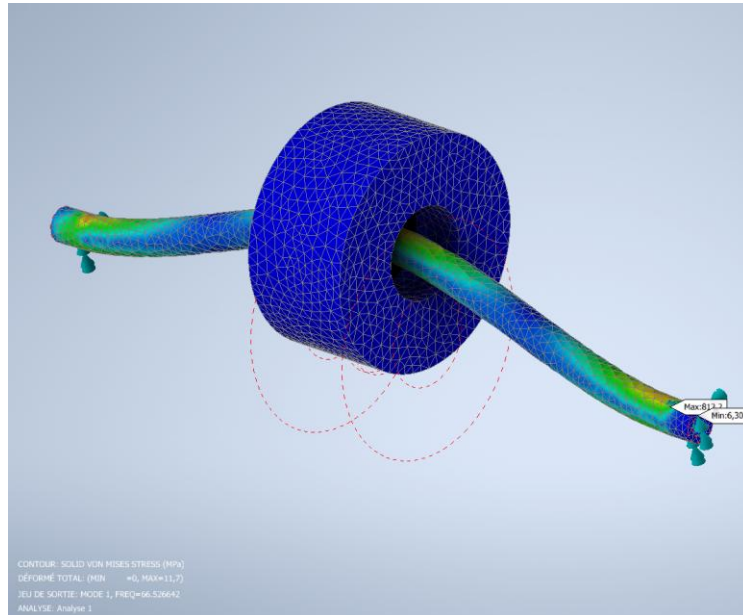


Figure 6 : Calcul des modes propres en encasté de chaque côté de la barre support de lests

Le premier mode propre en encasté de chaque côté est de 66Hz, soit bien supérieur aux 21Hz souhaité.

11. Préconisations de serrage

Afin de s'assurer que les vis soient sollicitées de la même manière il est fortement préconisé de bien graisser les vis et d'effectuer un serrage au couple avec une clé dynamométrique :

Vis M12 de fixation des « faux-capteurs » avec rondelles : 28 N.m

Vis M8 de fixation de la tape centrale : 8 N.m

Vis M6 de fixation de la tape extérieure : 2 N.m

Les pièces en aluminium ne doivent pas être graissées afin d'augmenter le coefficient de frottement.

12. Conclusion

Le modèle proposé dans cette étude répond aux exigences du cahier des charges. La marge est très faible concernant l'inertie de la plateforme autour de l'axe Z.