



ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

ME-373 : Modélisation et simulation par éléments finis

ÉTUDE DU *F* DU LOGO EPFL



Teo HALEVI, SCIPER : 329561
William MARTIN, SCIPER : 346983
Roy TURK, SCIPER : 345573

Table des matières

1 Buts de l'étude	3
1.1 Objectifs	3
1.2 Type d'analyse	3
1.3 Méthodologie	3
2 Hypothèses géométriques	3
2.1 Présentation de la géométrie	3
2.2 Système d'unités	4
2.3 Soudure	4
2.4 Dimensions caractéristiques	4
2.5 Symétries du problème	4
2.6 Espace de modélisation géométrique	4
3 Hypothèses de comportements physiques	4
3.1 Description des matériaux	4
4 Hypothèses de chargements	5
4.1 Modèle de conditions limites	7
4.2 Cas de charge	7
4.2.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)	8
4.2.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)	9
4.2.3 Flambage sur le support central (cas 3)	11
4.3 Conditions de symétries	11
4.4 Modes de corps rigides	12
4.5 Systèmes de coordonnées	12
4.6 Distribution spatiale et temporelle	12
5 Hypothèses de discréétisation et maillage	12
5.1 Choix du type d'éléments finis	12
5.2 Méthode de maillage	14
5.3 Taille et nombre d'éléments	14
5.4 Maillage optimisé	15
6 Type de problème/résolution	16
6.1 Type de problème résolu	16
6.2 Options de résolution	16
6.3 Résultats calculés	16

7 Étude de convergence de maillage	17
7.1 Critère	17
7.2 Présentation des différents maillages	18
7.3 Résultat du maillage initial	19
7.3.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)	19
7.3.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)	19
7.3.3 Flambage (cas 3)	20
7.4 Résultats pour le maillage raffiné	21
7.4.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)	21
7.4.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)	23
7.4.3 Flambage (cas 3)	25
7.5 Estimation d'erreur relative	26
7.5.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)	26
7.5.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)	27
7.5.3 Flambage (cas 3)	28
7.6 Choix du maillage optimal	28
8 Résultats	28
8.1 Résultat 1 - Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse	29
8.2 Résultat 2 - Force distribuée sur les faces latérales	29
8.3 Résultat 3 - Flambage	29
9 Analyse et conclusion	30
9.1 Résumé des résultats obtenus	30
9.2 Pertinence et précision des résultats	30
9.3 Critères et analyse	30
9.4 Conclusion	31
9.5 Recommandations	31
10 Remerciements	31
11 Annexes	32
11.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)	32
11.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)	35
11.3 Flambage (cas 3)	38

1 Buts de l'étude

1.1 Objectifs

Le logo EPFL [1] représente une structure mécanique intéressante. En particulier, la forme unique de la structure formée par le *F* attire l'attention et la curiosité de nombreux ingénieurs, en raison de ses caractéristiques géométriques particulières. Nous avons donc décidé d'étudier le *F* du logo EPFL pour mieux comprendre les réactions de ce type de structure face à divers cas de charge.

Les trois cas de charge étudiés visent à représenter des scénarios couramment rencontrés ou à étudier les limites de la structure :

- Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse
- Force distribuée sur les faces latérales
- Force distribuée sur le support vertical dans une analyse de flambage

1.2 Type d'analyse

Dans le cadre de ce cours d'éléments finis, toutes les études menées se concentrent sur des analyses statiques de la structure. Une étude supplémentaire de flambage a été réalisée sur la barre centrale afin d'évaluer sa charge critique.

1.3 Méthodologie

La première étape était la conception d'un modèle 3D aussi proche de la réalité que possible. Pour ce faire, nous avons pris contact avec METAL-SYSTEM [2], l'entreprise ayant conçu la structure en 2019. Les plans 2D ainsi que les spécifications des matériaux ont été mis à notre disposition pour permettre une reproduction précise de l'intégralité de la structure.

Par la suite, nous avons établi les hypothèses géométriques nécessaires à la simplification du problème, afin de procéder à la définition des charges et des conditions de bord.

Pour déterminer la méthode de discréétisation la plus adaptée à notre problème, nous étudierons plusieurs simulations avec différents ordres et tailles d'éléments finis. Cela permettra également de raffiner localement le maillage si besoin.

Les résultats des simulations et l'analyse critique qui l'accompagne seront présentés dans ce rapport, en détaillant les paramètres d'entrée (type, taille, ordre d'élément fini) et de sortie (contrainte, déplacement).

2 Hypothèses géométriques

2.1 Présentation de la géométrie

Le *F* est constitué d'un assemblage par soudure de tôles d'aluminium de différentes épaisseurs. Une particularité de la structure est l'absence de support central au niveau de la traverse [3] du *F*. Une plaque d'aluminium de 25mm d'épaisseur en bordure du fût [3] de la lettre assure sa stabilité.

Comme présenté dans les dessins techniques qui suivent, des renforts intérieurs sont présents dans le fût. Néanmoins, la position de ces renforts ne nous a pas été communiquée par l'entreprise. Nous avons donc fait l'hypothèse que les renforts se trouvent à égale distance les uns des autres.

2.2 Système d'unités

Les dimensions de la pièce sont données en millimètre. Il est donc judicieux de choisir le système "millimètre, Newton, seconde" pour notre étude.

2.3 Soudure

Les différentes tôles d'aluminium ont été assemblées par soudage MAG avec un fil d'aluminium de diamètre 1.2mm.

Nous considérons dans cette étude que les soudures ne forment qu'une seule pièce, et par conséquent, que notre étude ne contient pas d'assemblage.

2.4 Dimensions caractéristiques

Les dimensions de la pièce sont présentées dans les dessins 2D ci-dessous.

2.5 Symétries du problème

La structure du *F* contient une symétrie par rapport à un plan parallèle à la vue de face. Nous détaillerons plus cette symétrie après avoir défini un système d'axe approprié dans Abaqus.

2.6 Espace de modélisation géométrique

Pour notre étude, nous nous plaçons dans un espace de modélisation 3D continu de type déformable.

3 Hypothèses de comportements physiques

3.1 Description des matériaux

La structure du *F* est fabriquée en aluminium, avec deux alliages distincts : EN AW-5083 [4] et EN AW-6082 [5].

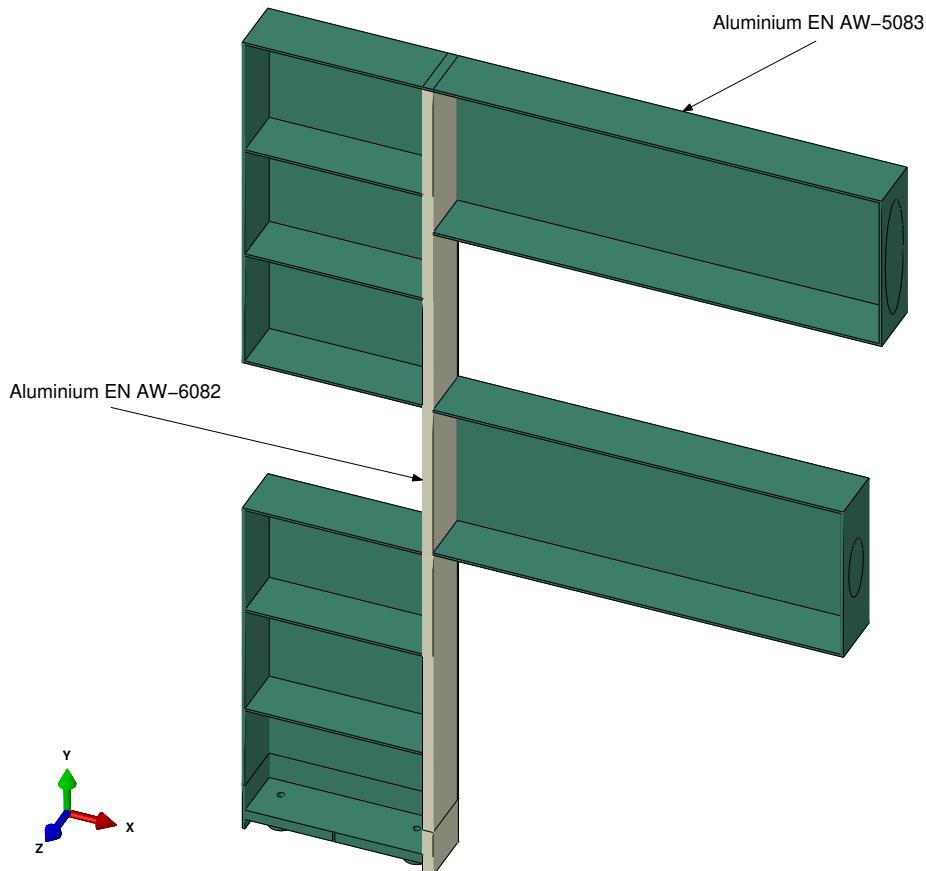
Les tôles d'une épaisseur de 6mm ainsi que les renforts internes sont fabriqués à partir de l'alliage EN AW-5083, tandis que la plaque centrale de 25mm est constituée de l'alliage EN AW-6082. L'utilisation de ces alliages est justifiée par leur très bonne soudabilité ainsi que leur résistance à la corrosion et aux substances chimiques.

Il est raisonnable de modéliser le *F* comme un solide élastique homogène et isotrope. Il ne faut donc définir que deux constantes (dépendantes de E et ν) dans la matrice des constantes élastiques. Les propriétés mécaniques qui nous intéressent pour faire notre étude sont données dans le tableau ci-dessous :

	Module d'élasticité E [MPa]	Coefficient de Poisson ν [-]
EN AW-5083	71 000	0.365
EN AW-6082	70 000	0.326

TABLE 3.1 – Propriétés mécaniques des alliages

Nous appliquons ces deux matériaux dans Abaqus en effectuant des partitionnements de la pièce.

FIGURE 3.1 – Partitionnement du F selon les différents matériaux.

4 Hypothèses de chargements

Les surfaces de charge sont présentées dans la figure qui suit. Pour alléger la représentation, la seule condition limite présentée est l'encastrement aux pieds. Les conditions limites dues à la symétrie sont présentes mais n'ont pas été représentées.

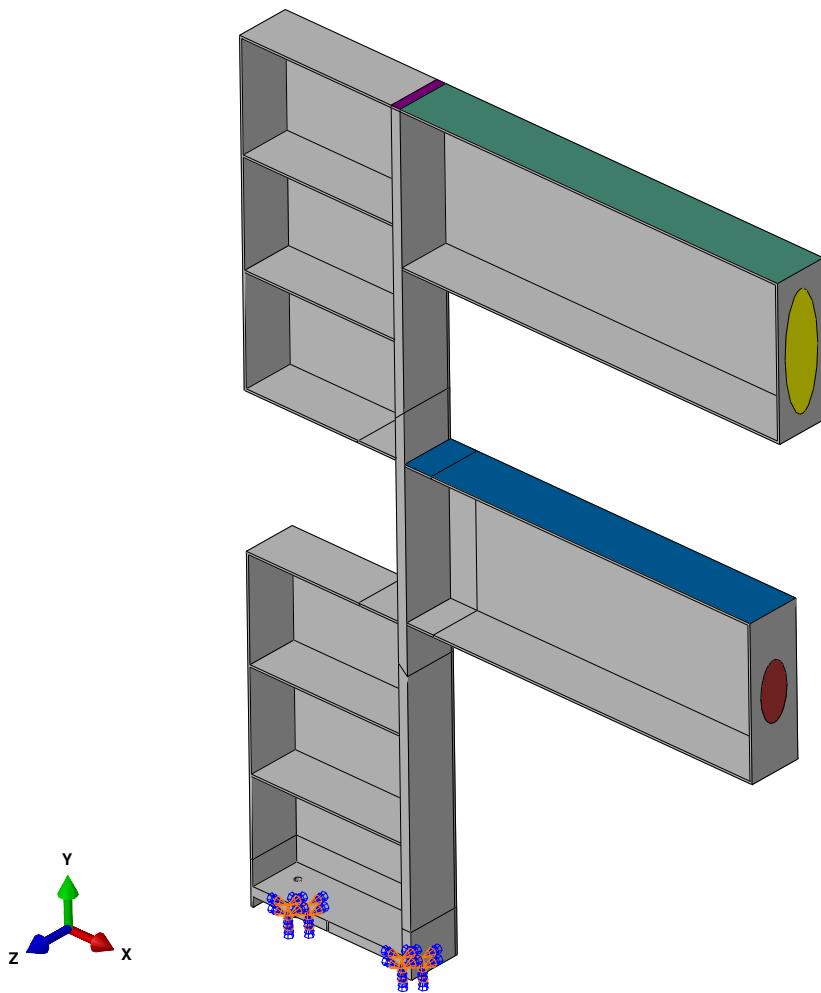


FIGURE 4.2 – Surfaces de charge pour les trois cas étudiés : vert et bleu [premier cas de charge], jaune et rouge [deuxième cas de charge], violet [troisième cas de charge, flambage].

Pour la clarté des analyses qui vont suivre, les coins autour de la traverse du *F* sont nommés selon la figure suivante. Nous ferons référence à ces coins lors des présentations des résultats de simulation.

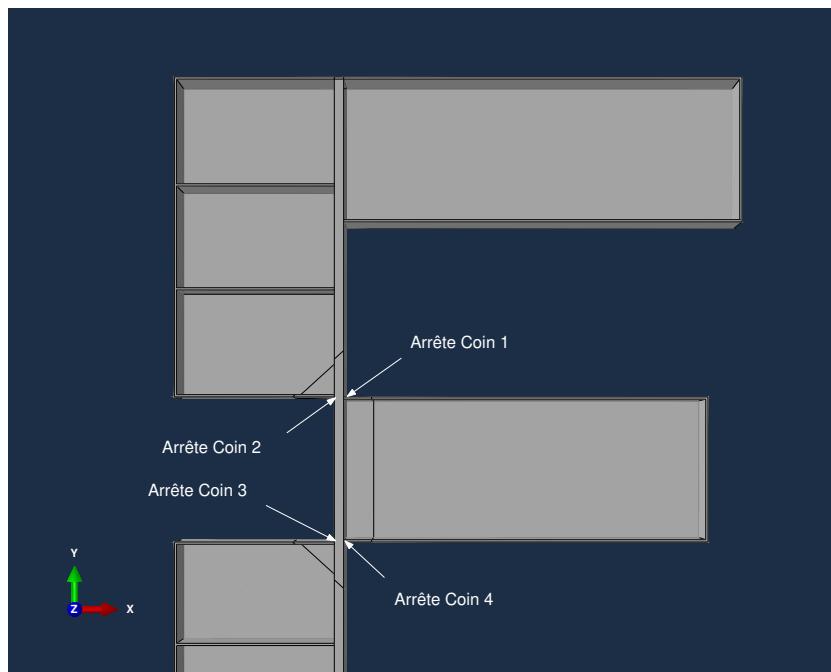


FIGURE 4.3 – Désignation des coins autour de la traverse.

4.1 Modèle de conditions limites

Pour toutes les modélisations, nous imposons aux quatre pieds du *F* un encastrement comme condition aux bords avec

$$U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$$

4.2 Cas de charge



FIGURE 4.4 – Exemple de charges appliquées sur les différentes lettres du logo EPFL [6].

4.2.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)

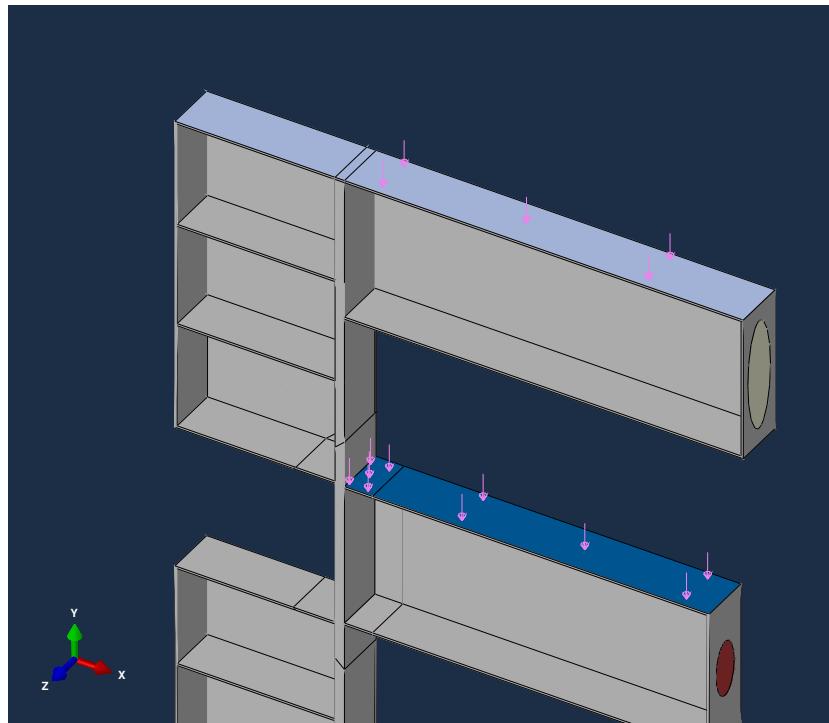


FIGURE 4.5 – Surfaces de charges et forces sur le côté du *F*.

Après discussion avec l'entreprise, nous avons appris que la structure a été conçue pour pouvoir supporter une charge de plus de dix personnes. Pour notre premier cas de charge, nous décidons donc de répartir ces 10 personnes sur la partie supérieure et sur la traverse du *F*.

Supposons un poids moyen de 85kg pour une personne, donc pour 5 personnes la force totale appliquée est de

$$F_1 = 85 \times 5 \times 9.81 = 4169.25\text{N}$$

sur une surface supérieure de

$$S_1 = 1066 \times 280 = 298480\text{mm}^2$$

On en déduit la charge répartie sur la partie supérieure

$$p_1 = \frac{F_1}{S_1} = 0.01397\text{MPa}$$

En prenant en compte la symétrie du matériau, la charge appliquée est

$$p_{1,sym} = \frac{p_1}{2} = 0.007\text{MPa}$$

Pour la traverse, avec les mêmes considérations que la partie précédente, nous obtenons

Poids de 5 personnes : $F_2 = 85 \times 5 \times 9.81 = 4169.25\text{N}$

Surface de charge sans symétrie : $S_2 = 280 \times 975 = 273000\text{mm}^2$

Charge répartie avec symétrie : $p_{2,sym} = \frac{1}{2} \frac{F_2}{S_2} = 0.00765\text{MPa}$

4.2.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)

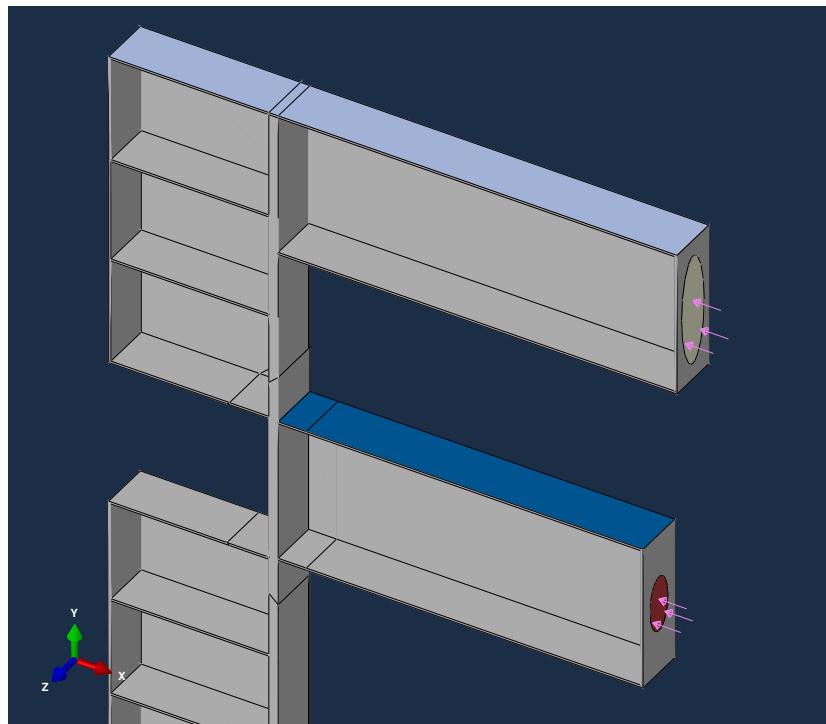


FIGURE 4.6 – Surfaces de charges et forces sur le côté du F .

Ce dernier cas de charge permet de modéliser une personne qui appuie avec ses pieds sur le côté droit du F et une personne qui pousse avec ses mains le F vers la gauche.

Nous avons estimé qu'une personne serait capable de délivrer une force d'appui par ses jambes proche de son propre poids, soit donc 80kg environ

$$F_3 = 80 \times 9.81 = 784.8\text{N}$$

La surface d'appui des pieds est approchée par deux ellipses de demi-axes

$$a = 150\text{mm}$$

$$b = 50\text{mm}$$

D'où une surface totale de

$$S_3 = 2 \times (\pi ab) = 47124\text{mm}^2$$

Finalement, la charge répartie a une valeur de

$$p_{3,sym} = \frac{1}{2} \frac{F_3}{S_3} = 0.0085\text{MPa}$$

Sur le même côté du F , nous modélisons l'appui d'une personne avec ses mains sur la barre centrale. L'étude *Maximum forces and joint stability implications during in-line arm pushes [7]* dans *Theoretical Issues in Ergonomics Science* donne une estimation de la force horizontale maximale appliquée par un homme ou une femme sur une surface.



FIGURE 4.7 – Exemple de la configuration expérimentale.

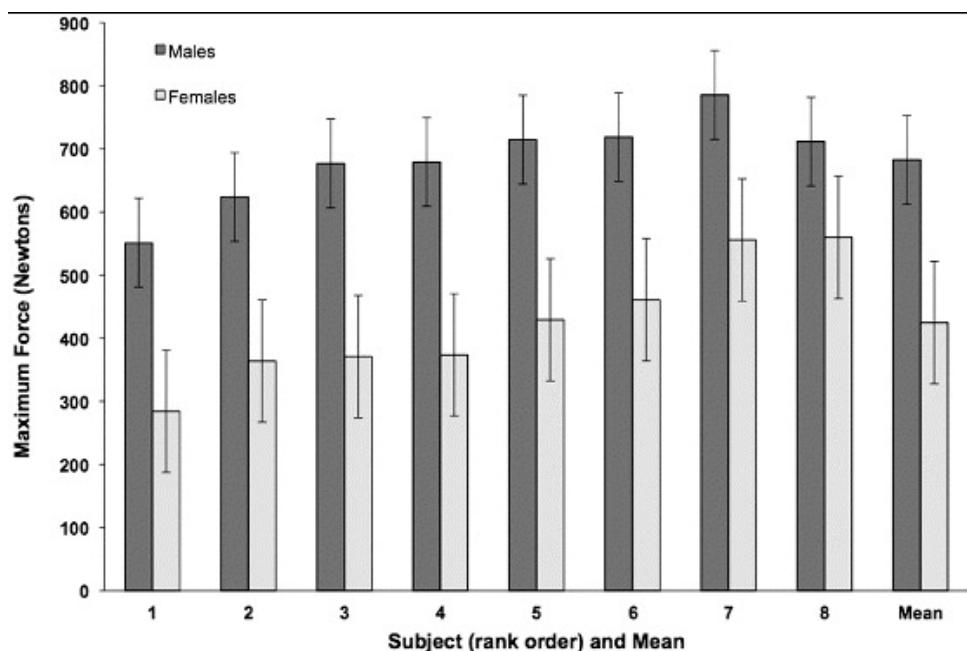


FIGURE 4.8 – Force maximale moyenne produite par chaque sujet au cours de l'essai d'effort volontaire maximal. Les sujets sont classés de la plus faible à la plus forte moyenne ($n = 7$ hommes, $n = 8$ femmes). Les écarts types sont indiqués. [7]

En prenant la force la plus importante de la figure 4.8, on obtient environ 800N. Cette force n'est appliquée que par un bras. Pour approcher la force appliquée par les 2 bras d'une personne qui appuie son dos au mur, nous prendrons $F_4 = 800 \times 1.5 = 1200\text{N}$. Nous utiliserons donc cette valeur comme référence pour une poussée maximale horizontale.

La surface d'appui des mains a également été approchée par deux ellipses de demi-axes

$$a = 75\text{mm}$$

$$b = 40\text{mm}$$

D'où une surface totale de

$$S_4 = 2 \times (\pi ab) = 18850\text{mm}^2$$

La charge répartie a donc une valeur de

$$p_{4,sym} = \frac{1}{2} \frac{F_4}{S_4} = 0.032 \text{ MPa}$$

4.2.3 Flambage sur le support central (cas 3)

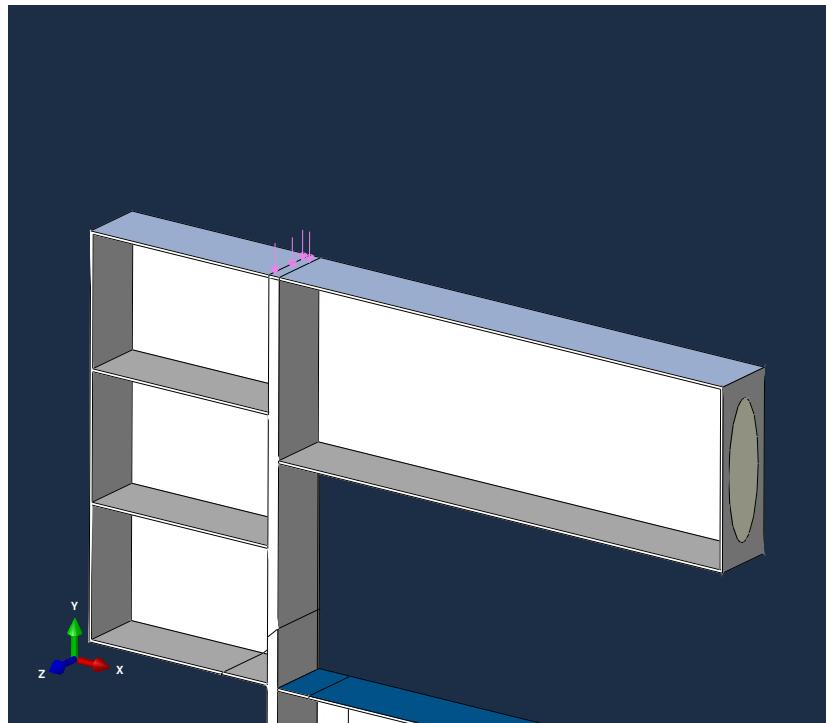


FIGURE 4.9 – Charge de flambage sur le support central du F .

Le résultatat λ de l'analyse de flambage dans Abaqus est un multiplicateur de force. La charge critique de flambage est un multiple de ce résultatat. Pour simplifier notre analyse, notre charge appliquée est donc mise à 1MPa pour que le résultatat d'Abaqus soit directement la charge critique de flambage.

4.3 Conditions de symétries

Le F présente une symétrie selon le plan xy . Pour simplifier nos simulations, nous allons donc couper notre pièce selon ce plan et appliquer des conditions aux limites afin de pouvoir effectuer l'analyse sous les bonnes conditions.

Le plan de coupe est normal à l'axe z , donc les conditions de symétrie sont :

$$U3 = UR1 = UR2 = 0$$

Cette symétrie sera utilisée pour nos trois cas de charge. En particulier, la géométrie de notre pièce induit une déformation de flambage dans le plan de coupe de la symétrie, ce qui nous conduit à conserver la coupe de symétrie pour ce cas de charge.

La condition d'encastrement reste la même que celle définie précédemment (section 4.1). Les 2 pieds présents après la coupe sont encastrés au sol :

$$U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3$$

4.4 Modes de corps rigides

Notre étude ne fait pas intervenir les modes de corps rigides puisque nous avons imposé un encastrement aux quatre pieds de la structure du F .

4.5 Systèmes de coordonnées

Le système de coordonnées utilisé est un système cartésien d'axes (x, y, z) avec le F orienté le long de l'axe y .

4.6 Distribution spatiale et temporelle

Afin de rester dans un cadre d'analyse en statique, nous faisons l'hypothèse que les charges ne varient pas en fonction du temps et que nous étudions le système à l'état stationnaire.

Nos trois cas de charge s'appliquent directement sur les surfaces externes de la structure du F .

5 Hypothèses de discréétisation et maillage

5.1 Choix du type d'éléments finis

La simulation a été effectuée en prenant en compte la symétrie normale à l'axe z .

Compte tenu de la géométrie du F , nous estimons qu'un maillage utilisant des éléments finis tétraédriques est acceptable.

Le maillage représenté dans la figure 5.10 correspond à notre maillage initial sans avoir effectué aucun raffinement local.

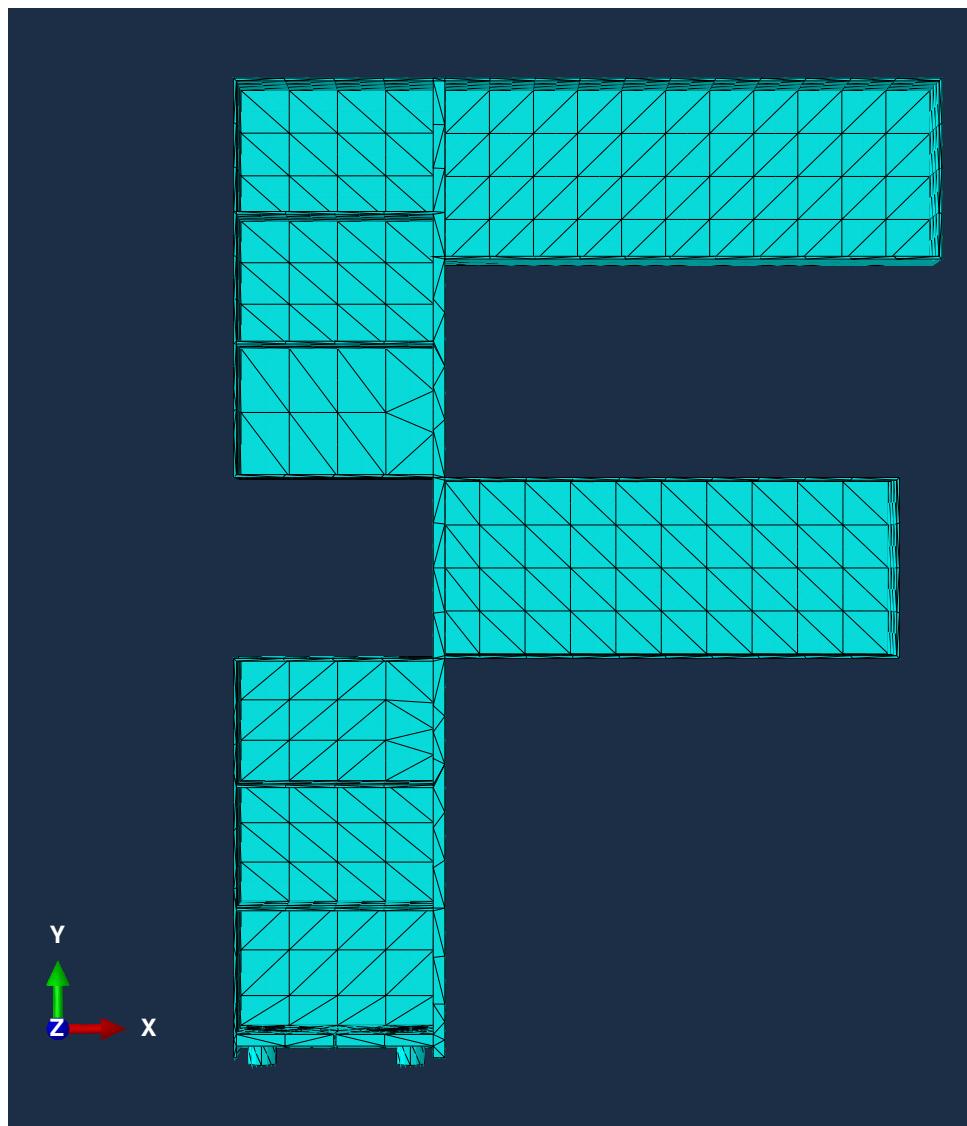


FIGURE 5.10 – Maillage du *F* en tétraédrique libre avec une taille globale de $h_{global} = 100\text{mm}$.

Nous procémons ensuite à un raffinement local aux niveaux de régions que nous estimons comme critiques ou possédant des géométries plus particulières. En particulier, nous nous intéressons à raffiner la région connectant la traverse du *F* au support central et la zone autour des pieds de la structure.

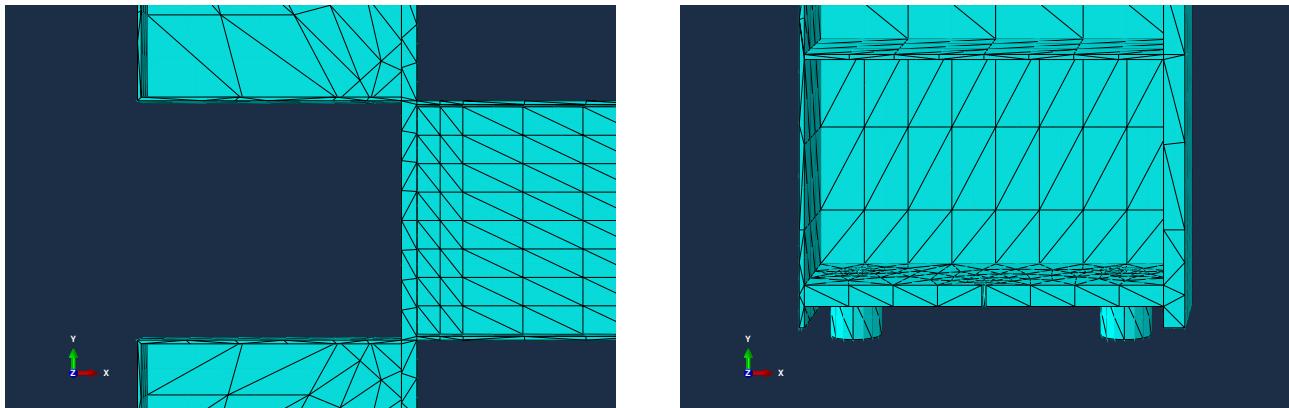


FIGURE 5.11 – Zones du F ayant subi un raffinement local avec une taille globale de $h_{global} = 100\text{mm}$ et une taille locale de $h_{local} = 50\text{mm}$.

5.2 Méthode de maillage

L’unique méthode de maillage employée pour la partie tétraédrique est libre.

5.3 Taille et nombre d’éléments

Nous présentons les différents maillages générés pour effectuer l’étude de convergence. Dans la table 5.2, nous définissons la taille du maillage global ainsi que la taille du maillage local pour les coins de la barre centrale et la partie encastrée. Il est suggéré de faire varier la taille des éléments avec un facteur de 2 entre chaque maillage, mais étant donné que nous sommes limités à 250'000 noeuds dans notre version académique d’Abaqus, nous n’avons pas respecté cette règle pour tous les maillages.

ID	h_{global}	h_{local}	# noeuds	# éléments	Warning
	[mm]	[mm]	-	-	%
1	100	50	12111	6232	61.81
2	50	25	35834	18582	30.00
3	30	20	77155	40326	2.81
4	25	15	121859	64082	1.19
5	20	10	241059	131057	0.63

TABLE 5.2 – Caractéristiques des maillages utilisés.

Le premier maillage grossier utilise les paramètres $h_{global} = 100\text{mm}$ et $h_{local} = 50\text{mm}$. L’analyse de ce maillage montre un haut taux de warning (61.81%).

En raffinant localement le maillage, nous arrivons à faire chuter ce taux de warnings à 0.63% pour avoir une simulation de meilleure qualité.

Une représentation graphique des avertissements est présentée ci-dessous :

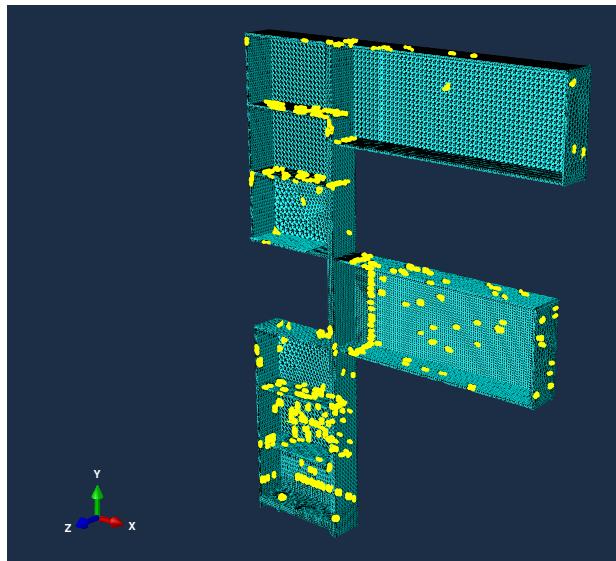
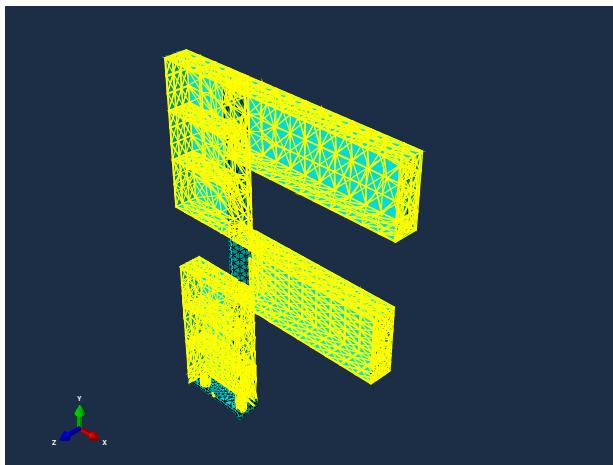


FIGURE 5.12 – Comparaison des warnings (en jaune) entre le maillage grossier n°1 (gauche) et le maillage raffiné n°5 (droite).

5.4 Maillage optimisé

Le maillage final optimisé possède une taille globale d’éléments $h_{global} = 20\text{mm}$ et une taille locale $h_{local} = 10\text{mm}$.

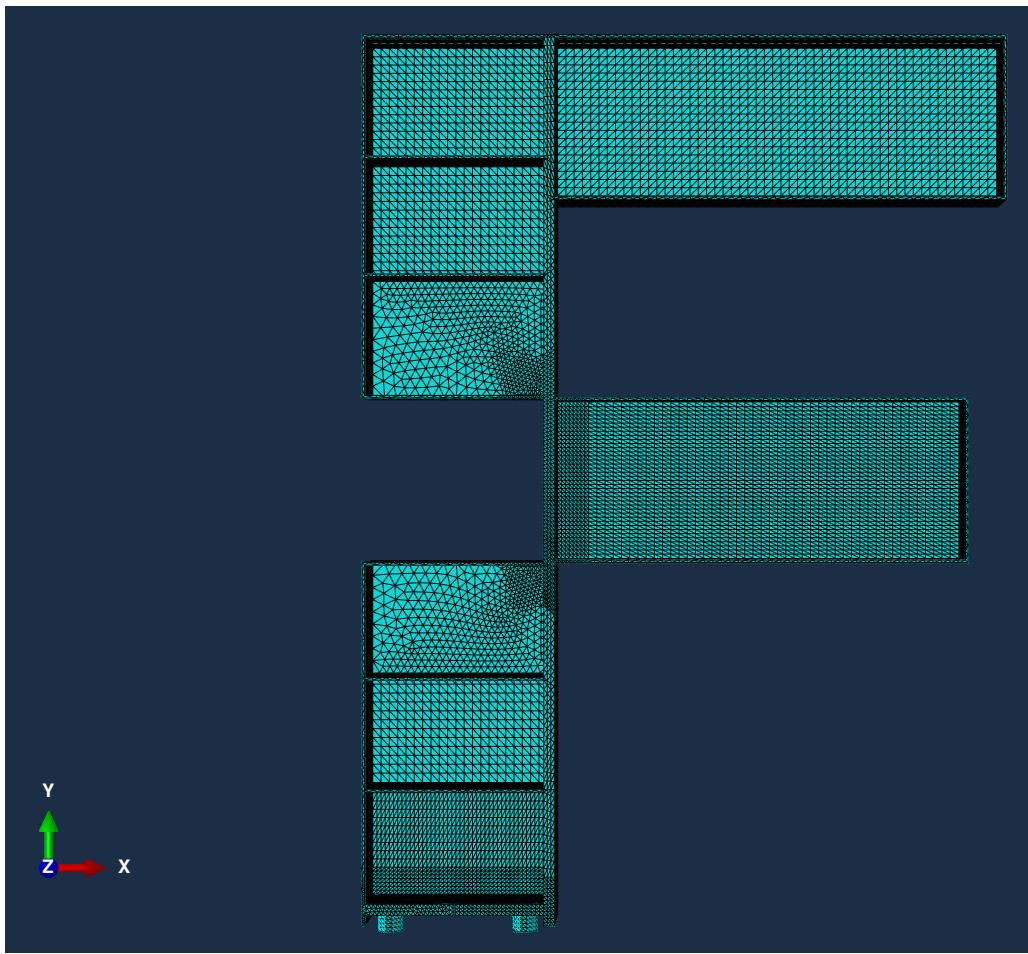


FIGURE 5.13 – Maillage optimisé du F avec une taille d’éléments finis globale de $h_{global} = 20\text{mm}$ et une taille locale de $h_{local} = 10\text{mm}$.

6 Type de problème/résolution

6.1 Type de problème résolu

Nous étudions les trois cas de charge d’un point de vue statique. Nos valeurs d’intérêts sont les déformation et contrainte pour les charges réparties et la charge critique dans le cas du flambage.

6.2 Options de résolution

Pour les deux premiers cas de charges, nous gardons les paramètres par défaut d’Abaqus pour la résolution complète du problème. Quant au flambage, nous imposons le calcul des cinq premières valeurs propres avec un nombre maximal d’itérations de 100.

6.3 Résultats calculés

Afin d’identifier les zones critiques de notre structure, nous étudions en particulier les contraintes maximales ainsi que les déplacements maximaux. La connaissance de ces quantités permet de déter-

miner les points de faiblesse potentiels et de prévoir les comportements de la structure sous diverses charges.

7 Étude de convergence de maillage

7.1 Critère

Pour notre analyse, nous nous concentrons sur la détermination des contraintes et déplacements maximaux, ainsi que sur la charge critique en flambage. Nous considérons que la convergence est atteinte lorsque l'erreur entre deux maillages consécutifs n'excède pas 7.5%.

La contrainte de Von-Mises est calculée à une zone précise qui ne correspond pas à un concentrateur de contrainte. Nous prenons ainsi le point P situé aux coordonnées $(x, y, z) = (453, 856, 73)$. Avec notre symétrie, notre pièce a une épaisseur total de 140mm, nous étudions donc la variation de la contrainte au quart de l'arrête du coin 4 du F , comme présenté sur la figure qui suit.

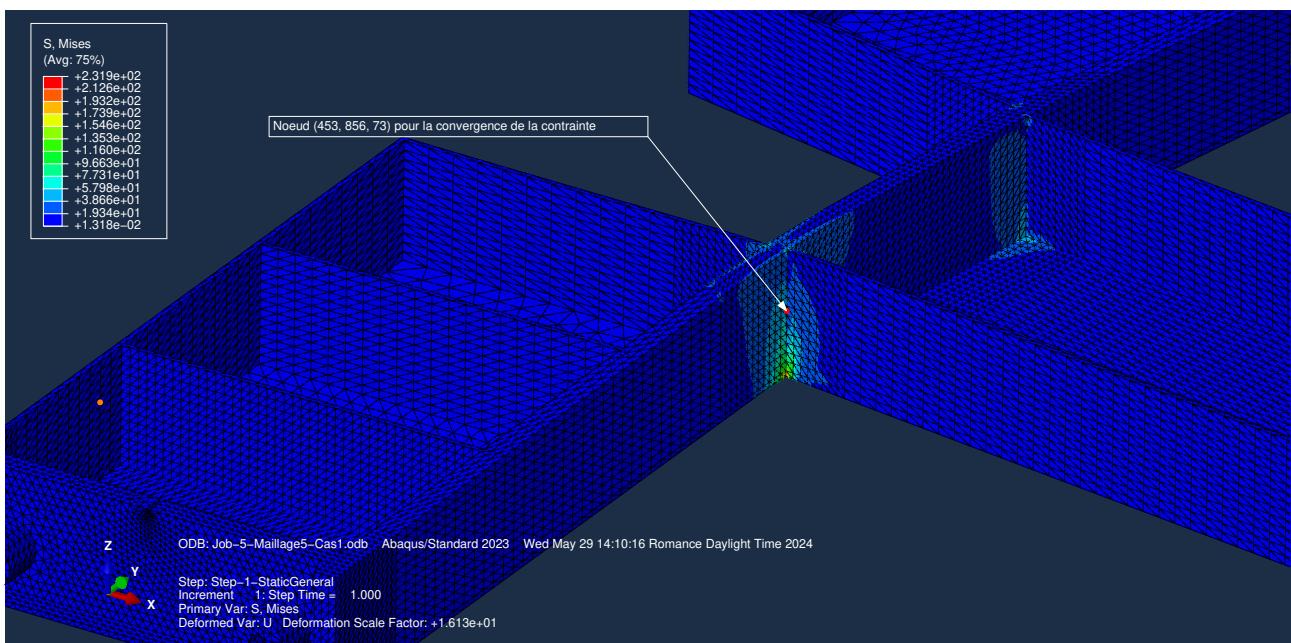


FIGURE 7.14 – Noeud utilisé pour l'étude de convergence de la contrainte de Von-Mises pour les deux premiers cas de charge.

L'analyse de convergence est une analyse sans connaissance de la solution exacte. La méthode de résolution est la suivante :

1. Utiliser un maillage grossier (nous avons commencé avec un maillage global de taille $h_{global} = 100\text{mm}$ et un maillage local de taille $h_{local} = 50\text{mm}$).
 - Obtenir la contrainte de Von-Mises au noeud situé en $(x, y, z) = (453, 856, 73)$.
 - Obtenir le déplacement maximal dans la pièce.
 - Pour l'analyse de flambage, obtenir la première valeur propre positive.

2. Raffiner progressivement les maillages et calculer les nouvelles valeurs de contrainte de Von-Mises, déplacement maximal, et première valeur propre de flambage (troisième cas de charge).
3. Calculer l'erreur relative de convergence de la manière suivante :

$$\varepsilon_i = \frac{|\Sigma(i) - \Sigma(i-1)|}{|\Sigma(i)|}$$

où $\Sigma(i)$ est la solution (contrainte de Von-Mises, déplacement, valeur propre de flambage) à l'itération i et $\Sigma(i-1)$ est la solution à l'itération $i-1$.

4. Lorsque l'erreur relative est inférieure à 7.5%, nous considérons qu'il y a convergence et que le maillage est satisfaisant.

7.2 Présentation des différents maillages

Nous effectuons notre étude suivant les maillages définis dans le tableau 5.2, allant d'un maillage initial considéré comme grossier (maillage n°1) à un maillage final avec un niveau de raffinement élevé (maillage n°5).

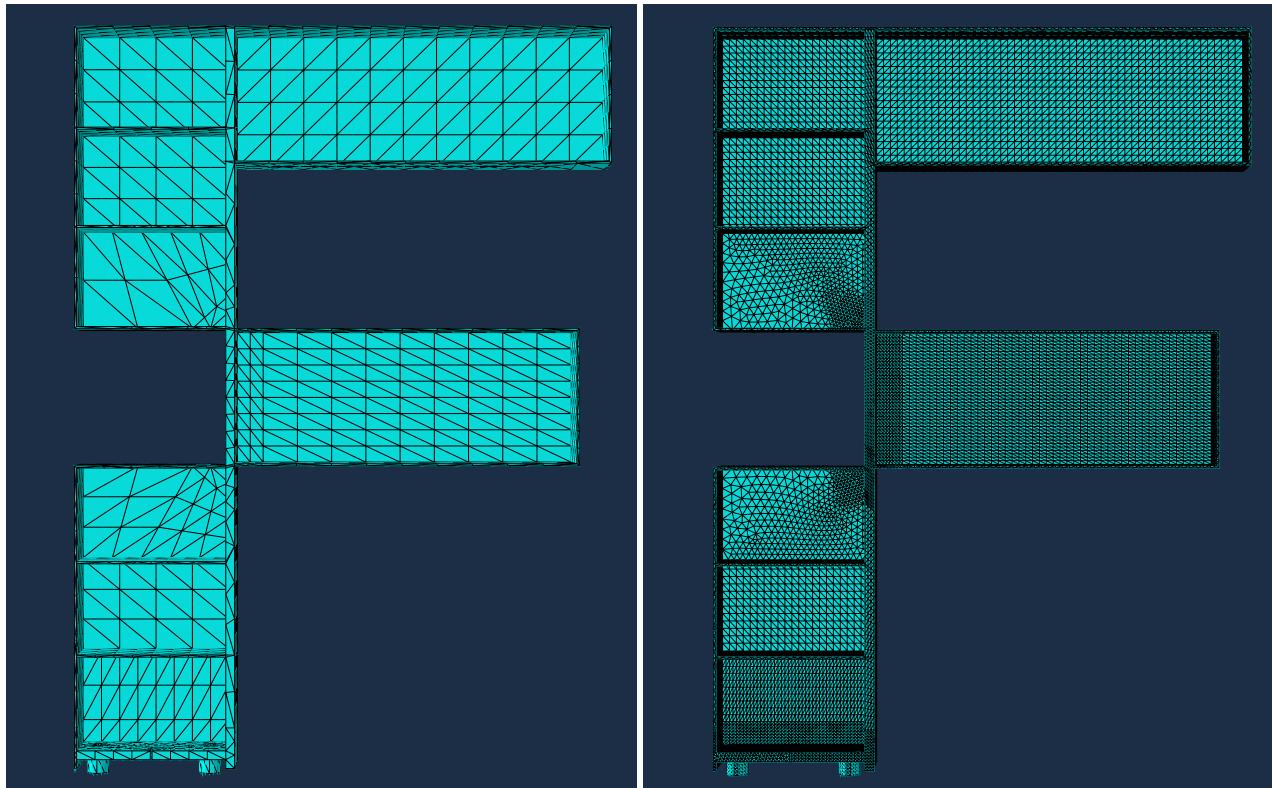


FIGURE 7.15 – Comparaison entre le maillage initial n°1 grossier et le maillage final n°5 raffiné.

7.3 Résultat du maillage initial

7.3.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)

Les résultats de simulation pour notre premier cas de charge avec notre premier maillage non raffiné sont présentés ci-dessous.

Le déplacement maximal de la pièce est de 15.04mm.

Nous notons la présence d'un concentrateur de contrainte au coin 1 qui fait exploser la contrainte à 105.6MPa, tandis que la contrainte au point P , situé à environ 70mm du concentrateur est plutôt de 27.107MPa.

ID	h_{global}	h_{local}	# noeuds	# éléments	Warning	$S_{c1}@P$	$S_{max,c1}$	$U_{max,c1}$
	[mm]	[mm]	-	-	%	[MPa]	[MPa]	[mm]
1	100	50	12111	6232	61.81	27.107	105.6	15.04

TABLE 7.3 – Résultats pour le maillage n°1 pour le premier cas de charge.

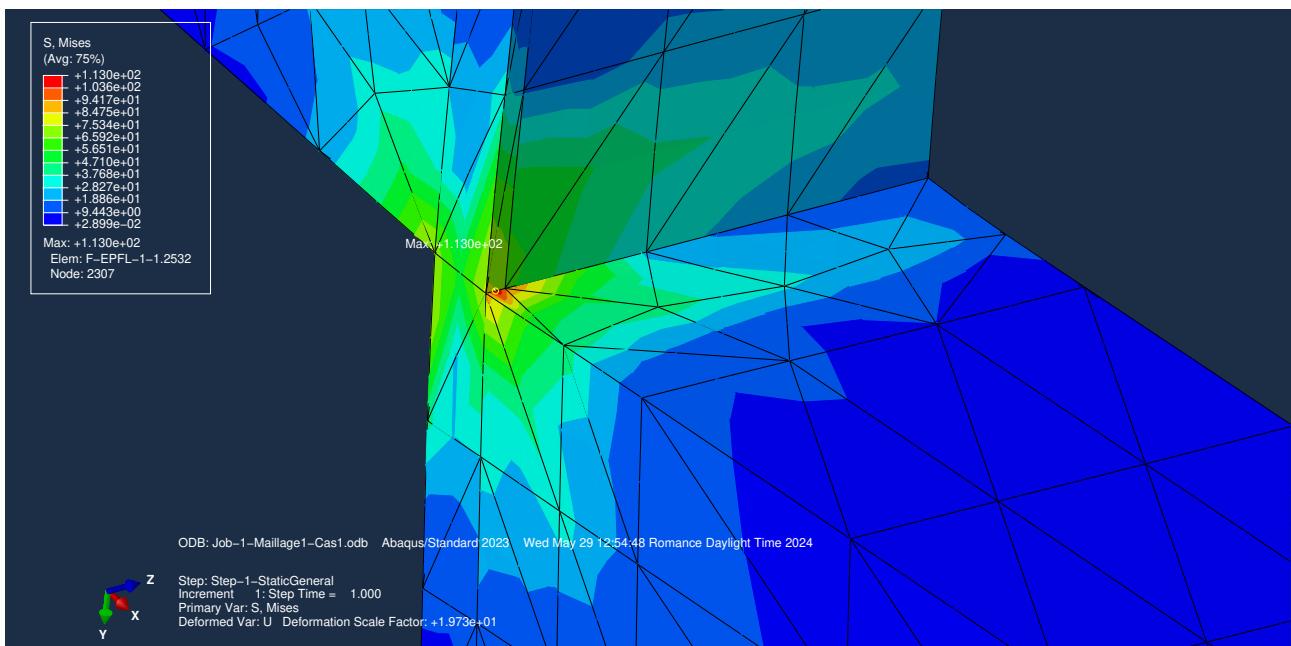


FIGURE 7.16 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage initial n°1 pour le premier cas de charge (coin 1).

7.3.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)

Pour le deuxième cas de charge, le déplacement maximal est de l'ordre de 3mm.

Le concentrateur de contrainte se situe cette fois sur le coin 4. Nous remarquons également que la contrainte de Von-Mises au point P est de 6.68MPa tandis que le concentrateur est de l'ordre de 25MPa.

ID	h_{global}	h_{local}	# noeuds	# éléments	Warnings	$S_{c2}@P$	$S_{max,c2}$	$U_{max,c2}$
	[mm]	[mm]	-	-	%	[MPa]	[MPa]	[mm]
1	100	50	12111	6232	61.81	6.68	24.82	3.672

TABLE 7.4 – Résultats pour le maillage n°1 pour le deuxième cas de charge.

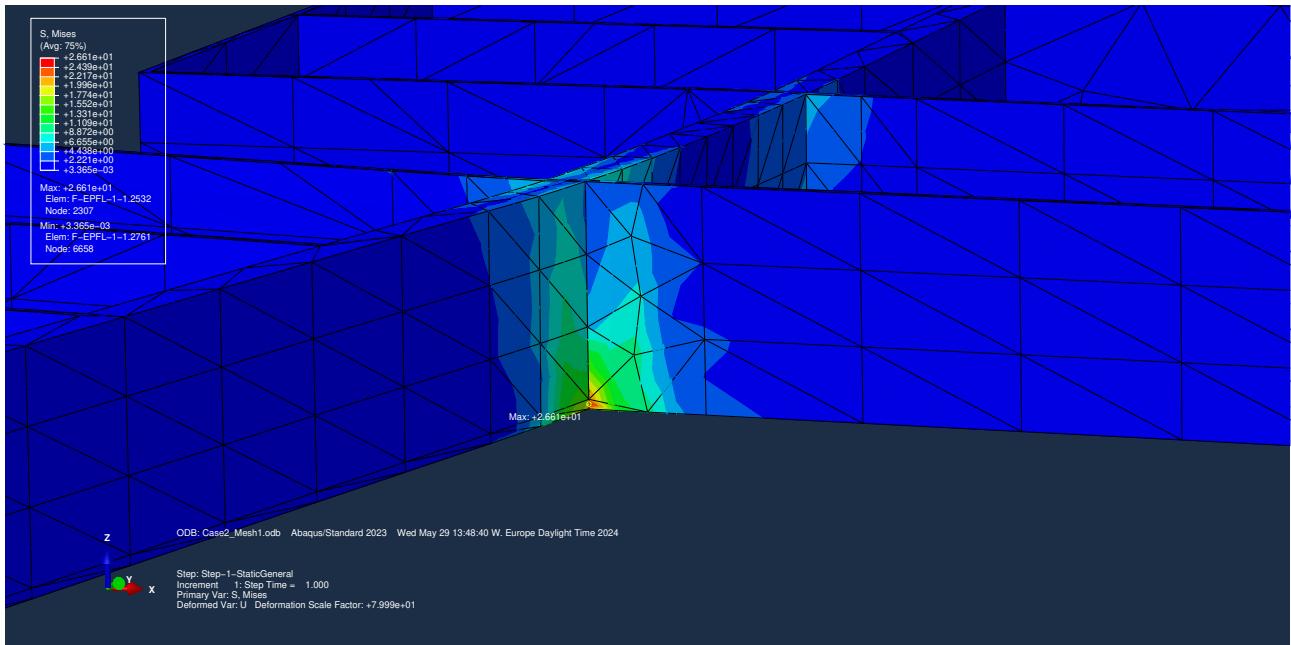


FIGURE 7.17 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage initial n°1 pour le deuxième cas de charge (coin 4).

7.3.3 Flambage (cas 3)

Le flambage est un cas de charge particulier à étudier. La simulation nous donne plusieurs valeurs propres qui sont solutions de l'équation de flambage, mais nous ne prenons que la première valeur propre positive. Pour le premier maillage, celle-ci est de 156.38MPa.

L'allure du premier mode propre est présenté dans la figure qui suit. La simulation Abaqus donne une allure du déplacement, les valeurs numériques de déplacement ne sont pas forcément celles observées en réalité.

ID	h_{global}	h_{local}	# noeuds	# éléments	Warnings	λ_c
	[mm]	[mm]	-	-	%	[MPa]
1	100	50	12111	6232	61.81	156.38

TABLE 7.5 – Résultats pour le maillage n°1 en cas de flambage.

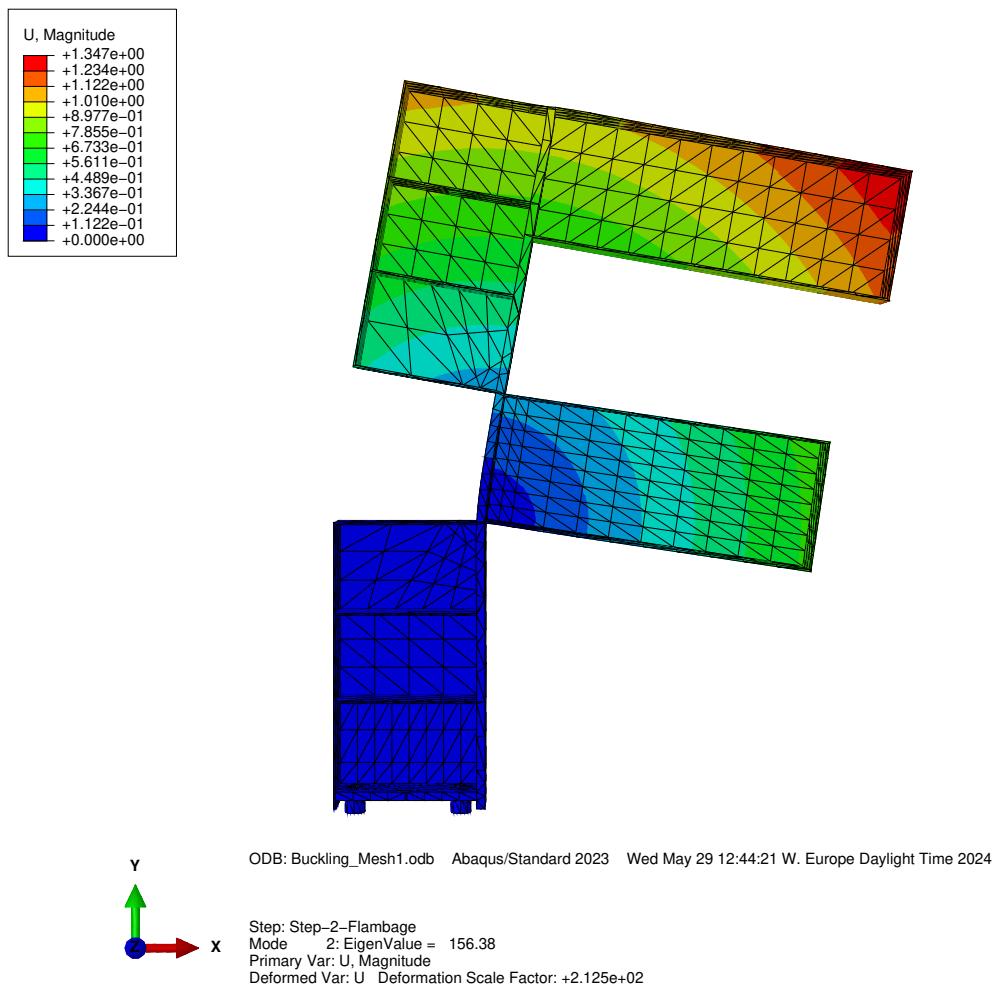


FIGURE 7.18 – Allure du mode propre correspondant à la première valeur propre positive avec le maillage initial n°1.

7.4 Résultats pour le maillage raffiné

Le champ de déplacement au sein du *F* est présenté dans les figures 7.20 et 7.22 pour respectivement le premier et deuxième cas de charge. L'allure du déplacement est identique dans les différents maillages, c'est pourquoi nous avons décidé de représenter uniquement le résultat pour notre dernier maillage raffiné.

7.4.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)

La simulation du premier cas de charge avec le dernier maillage montre une contrainte de Von-Mises au point *P* de 41.57MPa. Pour comparaison, le premier maillage présentait une contrainte de Von-Mises au point *P* de 27.107MPa. Cette contrainte a donc beaucoup augmenté, mais l'analyse la section qui suit montre que cette augmentation est progressive et converge vers le dernier maillage.

Concernant le déplacement maximal, celui-ci atteint 18.43mm ce qui est assez proche du premier maillage avec 15.04mm.

On note également que le concentrateur de contrainte a doublé de valeur (premier maillage : 105.6MPa, dernier maillage : 212MPa). Une chose intéressante à noter est que ce concentrateur de contrainte a changé d'arête. Dans le premier maillage, la contrainte maximale était sur le coin 1 tandis qu'avec le dernier maillage, la contrainte maximale est sur le coin 4.

ID	h_{global} [mm]	h_{local} [mm]	# noeuds	# éléments	Warnings %	$S_{c1}@P$ [MPa]	$S_{max,c1}$ [MPa]	$U_{max,c1}$ [mm]
5	20	10	241059	131057	0.63	41.57	212.0	18.43

TABLE 7.6 – Résultats pour le maillage n°5 pour le premier cas de charge.

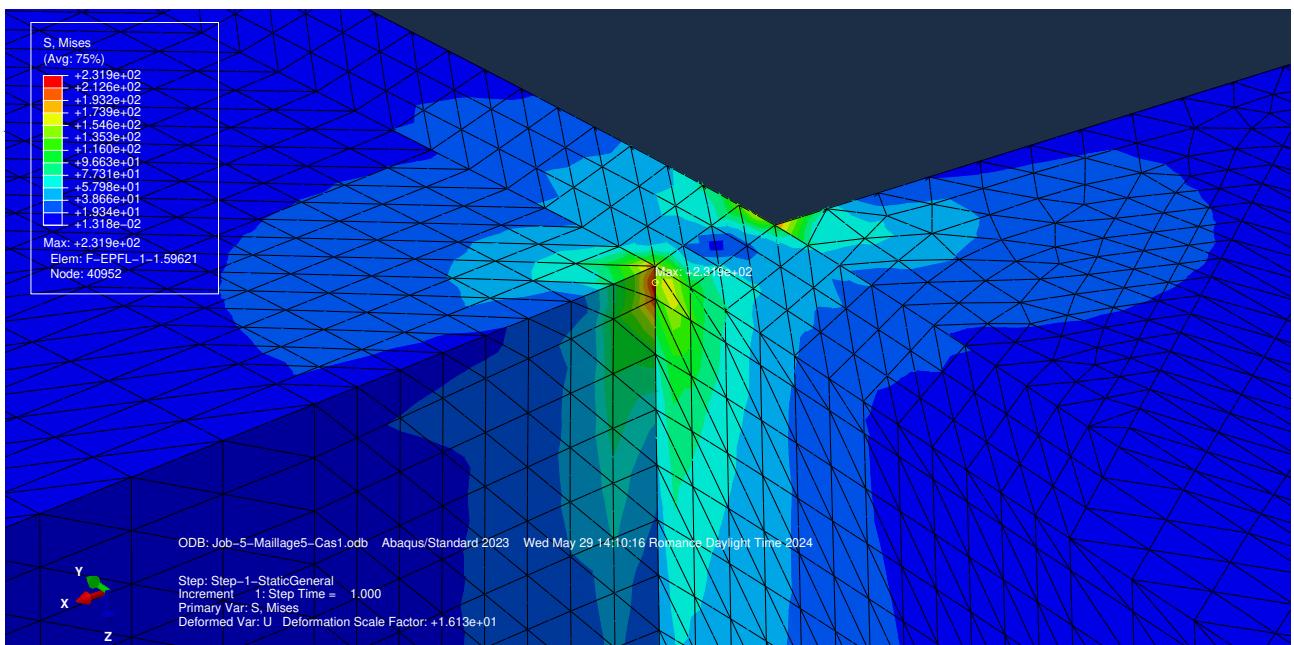


FIGURE 7.19 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°5 pour le premier cas de charge (coin 4)

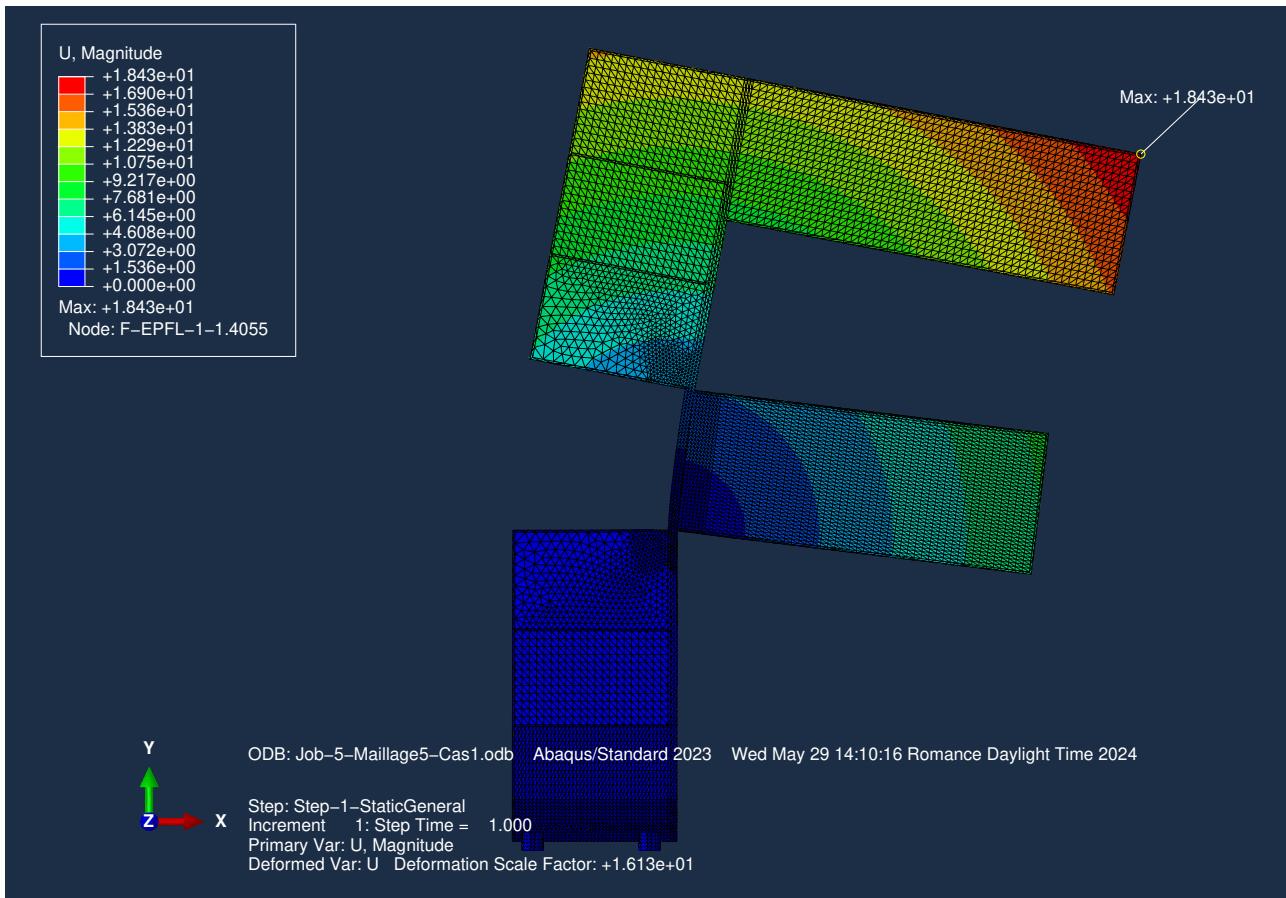


FIGURE 7.20 – Déplacement maximal avec le maillage n°5 pour le premier cas de charge.

7.4.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)

Pour notre deuxième cas de charge avec notre maillage raffiné, nous obtenons une contrainte de Von-Mises au point P de 10.26MPa. Avec le maillage non-raffiné, cette contrainte était de 6.68MPa. L'évolution est donc plus faible que l'étude du premier cas de charge. De même, le déplacement maximal au sein de la pièce est de 4.196mm tandis qu'avec le maillage grossier, ce déplacement était de 3.672mm.

Concernant la contrainte maximale au sein de la pièce, le concentrateur de contrainte a doublé entre le maillage grossier et le maillage final avec une valeur de près de 50MPa sur le même coin qu'avec le maillage grossier.

ID	h_{global}	h_{local}	# noeuds	# éléments	Warnings	$S_{c2}@P$	$S_{max,c2}$	$U_{max,c2}$
	[mm]	[mm]	-	-	%	[MPa]	[MPa]	[mm]
5	20	10	241059	131057	0.63	10.26	49.96	4.496

TABLE 7.7 – Résultats pour le maillage n°5 pour le deuxième cas de charge.

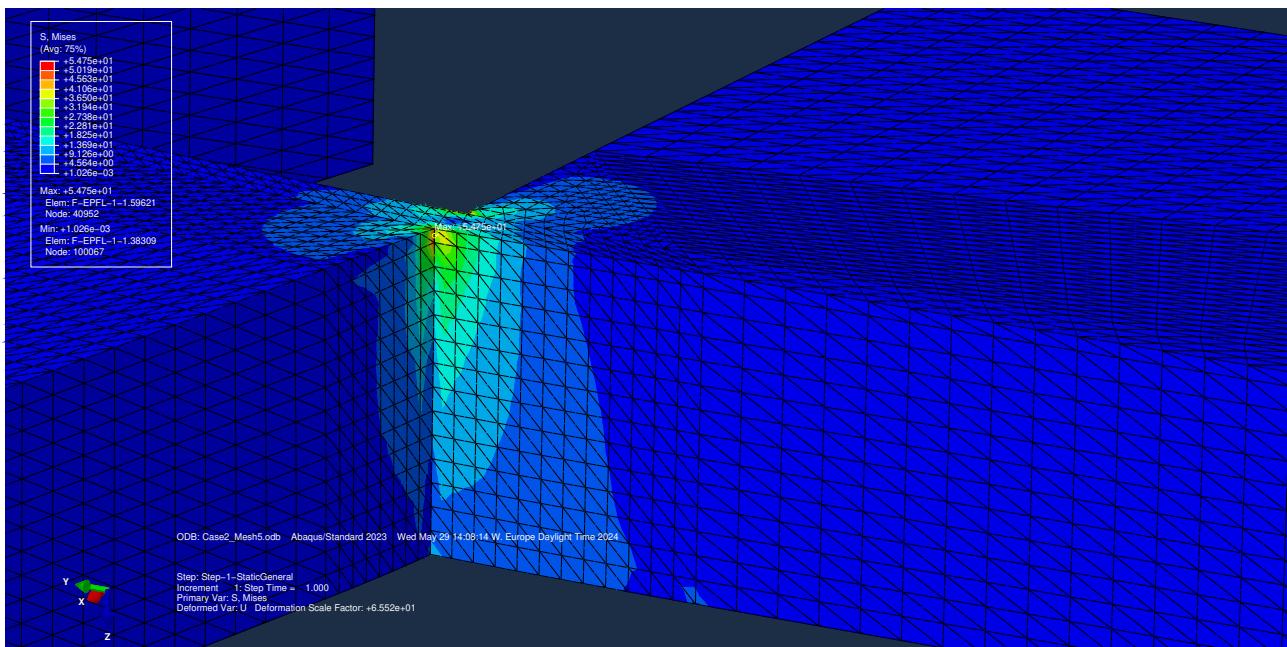


FIGURE 7.21 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°5 pour le deuxième cas de charge (coin 4).

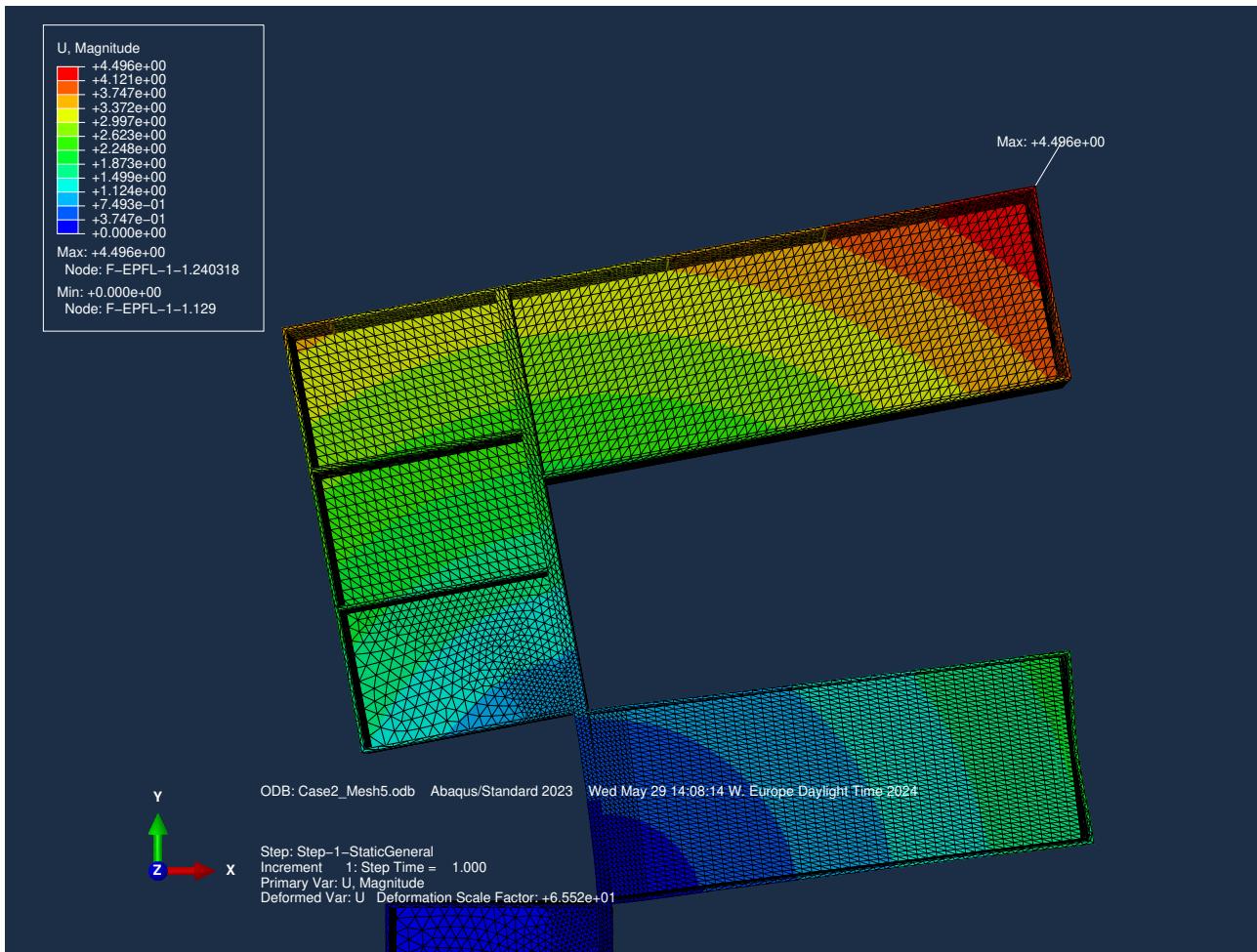


FIGURE 7.22 – Déplacement maximal avec le maillage n°5 pour le deuxième cas de charge.

7.4.3 Flambage (cas 3)

Nous sommes intéressés par la convergence de la première valeur propre positive de flambage. Celle-ci converge à 97.338MPa, le premier maillage donnait une valeur propre de 156.38MPa.

L'allure du premier mode propre de flambage reste identique selon les maillages et est présentée ci-dessous.

ID	h_{global}	h_{local}	# noeuds	# éléments	Warnings	λ_c
	[mm]	[mm]	-	-	%	[MPa]
5	20	10	241059	131057	0.63	97.338

TABLE 7.8 – Résultats pour le maillage n°5 en cas de flambage.

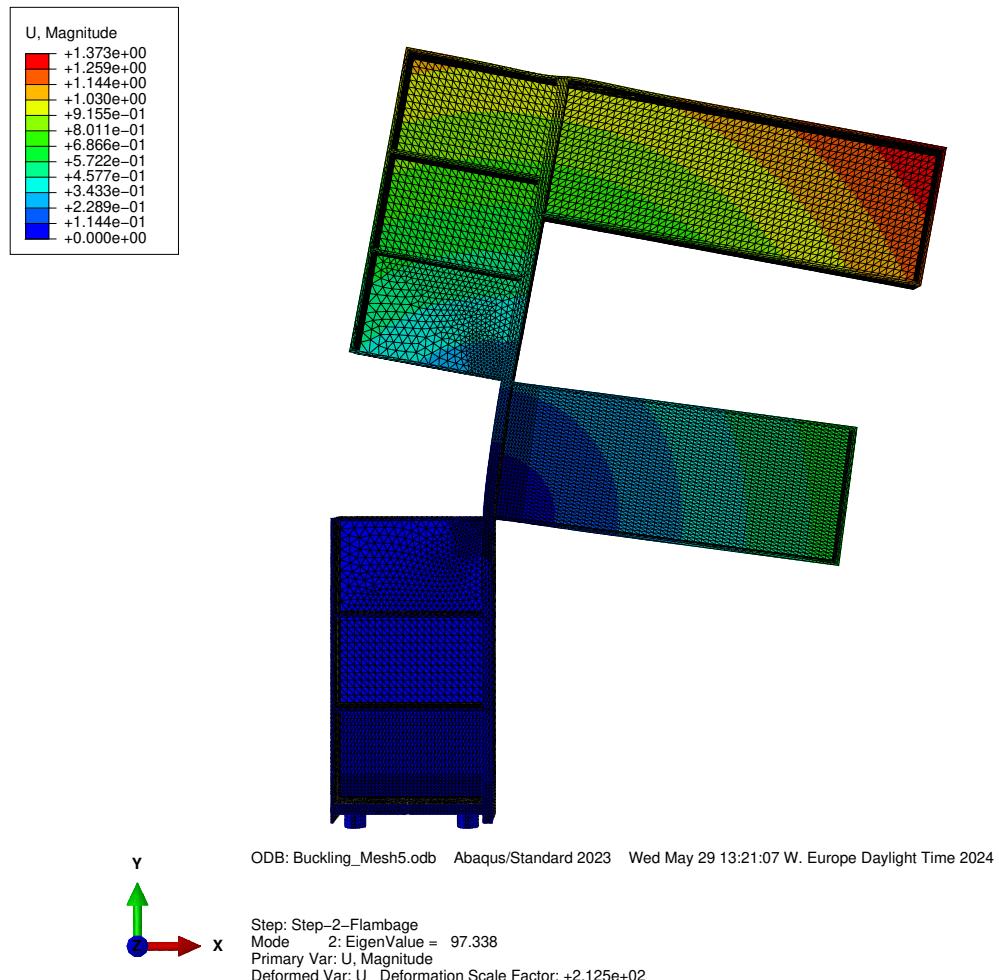


FIGURE 7.23 – Allure du mode propre correspondant à la première valeur propre positive avec le maillage final n°5.

7.5 Estimation d'erreur relative

Suivant la méthode décrite dans la section 7.1, nous présentons les résultats de convergence pour les quantités d'intérêts selon les trois cas de charge.

7.5.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)

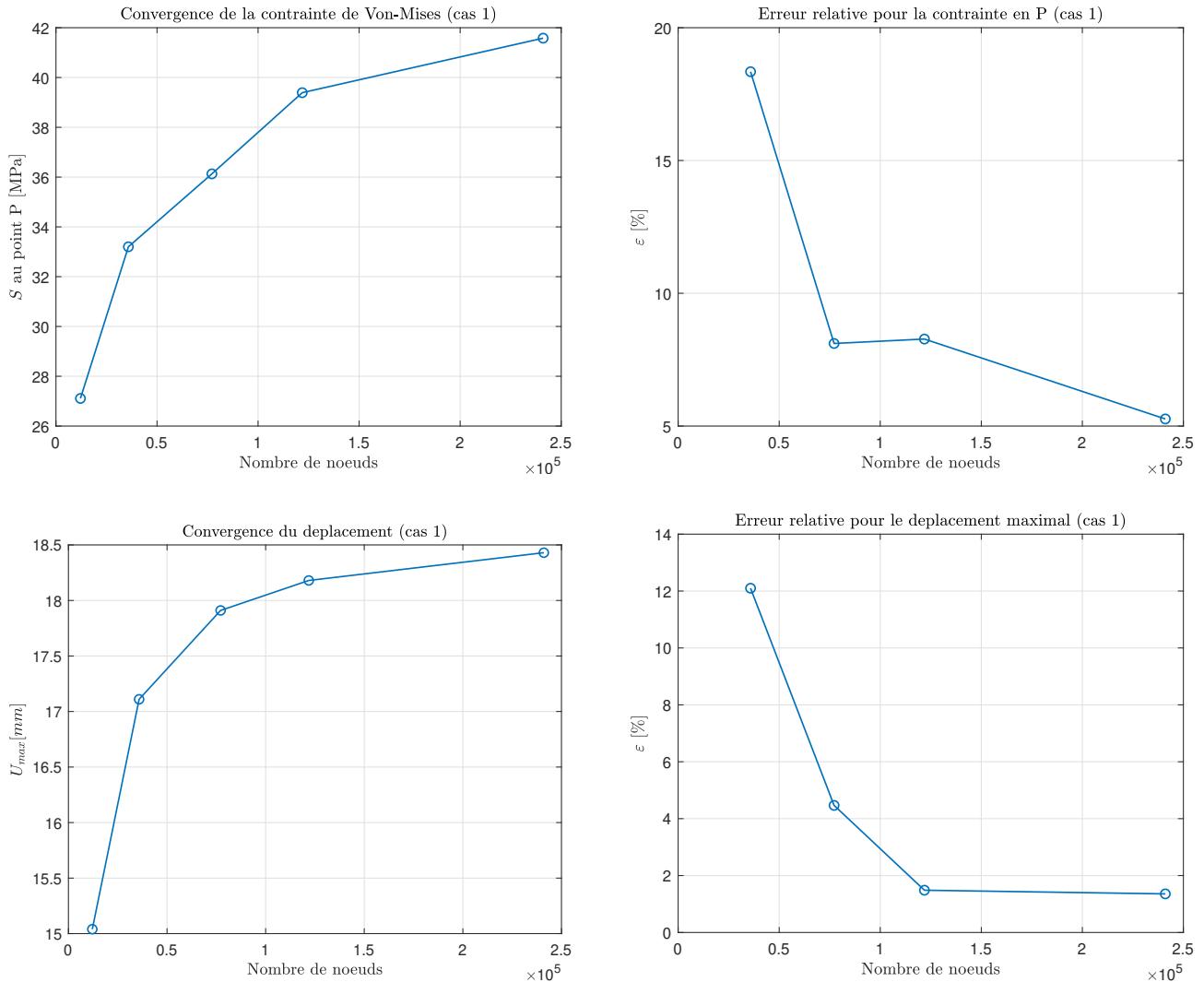


FIGURE 7.24 – Étude de convergence pour le premier cas de charge : contrainte de Von-Mises et déplacement.

7.5.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)

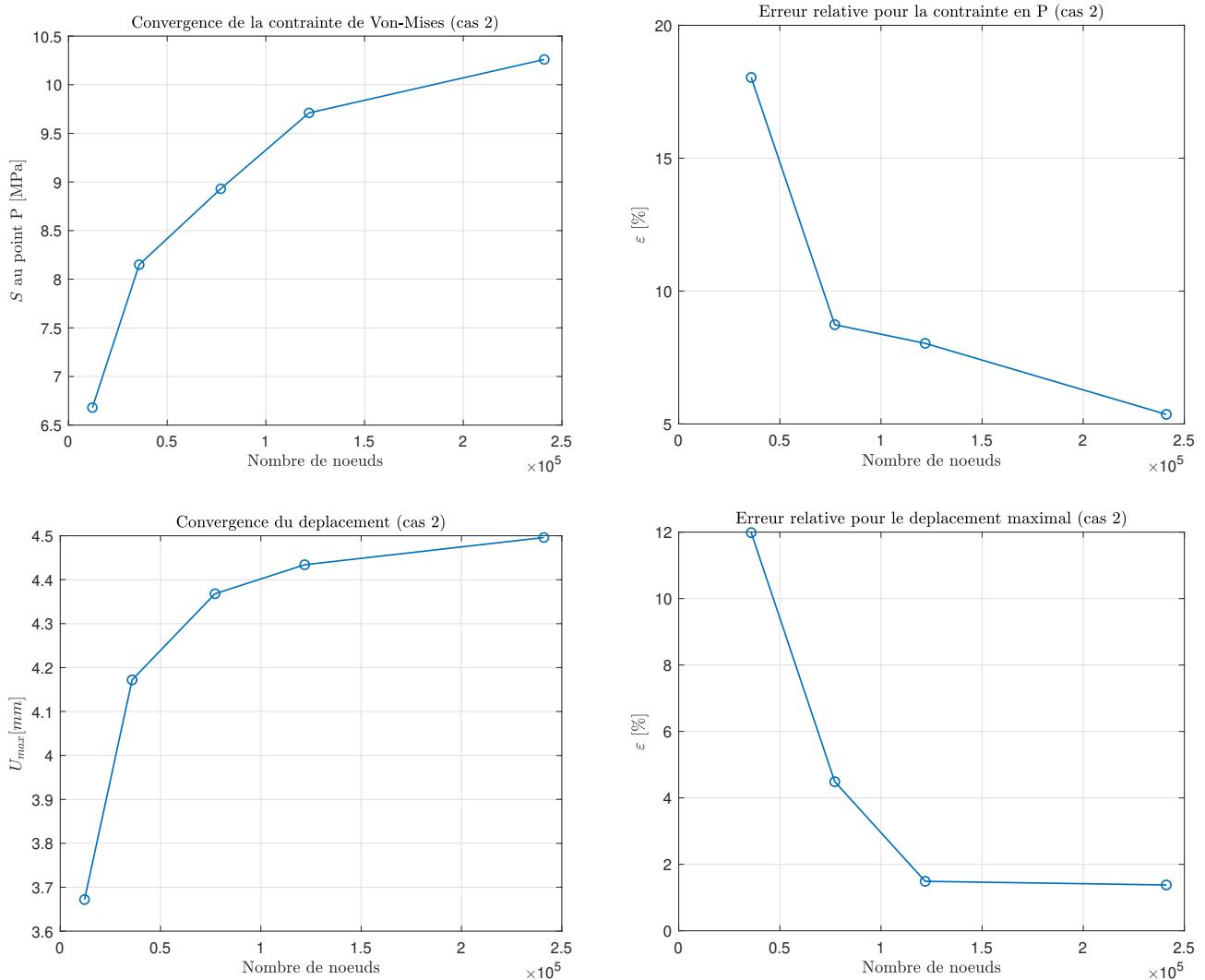


FIGURE 7.25 – Étude de convergence pour le deuxième cas de charge : contrainte de Von-Mises et déplacement.

Nous constatons que le maillage n°3 [$h_{global} = 30\text{mm}$ et $h_{local} = 20\text{mm}$] est le premier à montrer une convergence pour les déplacements de la structure selon les deux cas de charge statiques.

Il faut toutefois continuer le raffinement du maillage et arriver au maillage n°5 [$h_{global} = 20\text{mm}$ et $h_{local} = 10\text{mm}$] pour obtenir une convergence de toutes nos quantités : contrainte de Von-Mises et déplacement maximal dans la structure, selon les deux cas de charge statiques.

7.5.3 Flambage (cas 3)

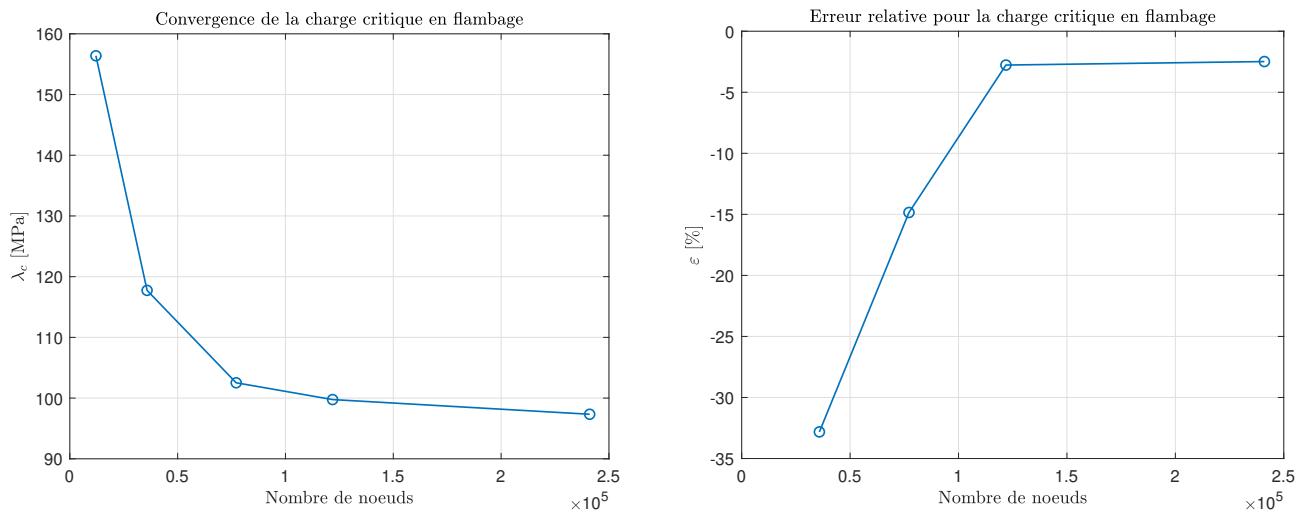


FIGURE 7.26 – Étude de convergence pour la charge critique en flambage.

Nous remarquons une convergence également au niveau de la charge critique en flambage. Comme illustré par le graphique de la figure 7.26, l'erreur relative passe en dessous du seuil que nous avions défini précédemment avec le raffinement successif des différents maillages.

7.6 Choix du maillage optimal

Après avoir effectué la convergence des maillages, nous choisissons le maillage n°5 comme le plus adéquat pour notre analyse.

La version académique d'Abaqus ne nous autorise pas à utiliser des maillages avec plus de 250'000 noeuds. Il aurait été intéressant de raffiner le maillage pour avoir une étude rigoureuse de convergence de la contrainte de Von-Mises. Néanmoins, notre dernier maillage est satisfaisant en ce qui concerne la convergence du déplacement, puisque qu'il existe peu de différences entre nos derniers maillages.

8 Résultats

Nous présentons dans les tables 8.9, 8.10 et 8.11 les résultats des différents maillages avec la convergence de l'erreur relative pour chaque cas de charge. Les cases vertes représentent les maillages avec lesquels l'erreur est passée en dessous du seuil d'erreur relative de 7.5%.

8.1 Résultat 1 - Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse

ID	h_{global}	h_{local}	# noeuds	# éléments	Warning	$S_{c1}@P$	$\varepsilon_{S_{c1}}$	$U_{max,c1}$	$\varepsilon_{U_{max,c1}}$
	[mm]	[mm]	-	-	%	[MPa]	%	[mm]	%
1	100	50	12111	6232	61.81	27.107	-	15.04	-
2	50	25	35834	18582	30.00	33.197	18.35	17.11	12.1
3	30	20	77155	40326	2.81	36.133	8.13	17.91	4.47
4	25	15	121859	64082	1.19	39.39	8.27	18.18	1.49
5	20	10	241059	131057	0.63	41.57	5.27	18.43	1.36

TABLE 8.9 – Convergence de la solution pour le premier cas de charge.

8.2 Résultat 2 - Force distribuée sur les faces latérales

ID	h_{global}	h_{local}	# noeuds	# éléments	Warning	$S_{c2}@P$	$\varepsilon_{S_{c2}}$	$U_{max,c2}$	$\varepsilon_{U_{max,c2}}$
	[mm]	[mm]	-	-	%	[MPa]	%	[mm]	%
1	100	50	12111	6232	61.81	6.68	-	3.672	-
2	50	25	35834	18582	30.00	8.15	18	4.172	11.98
3	30	20	77155	40326	2.81	8.93	8.74	4.368	4.49
4	25	15	121859	64082	1.19	9.71	8.1	4.434	1.49
5	20	10	241059	131057	0.63	10.26	5.36	4.496	1.38

TABLE 8.10 – Convergence de la solution pour le deuxième cas de charge.

8.3 Résultat 3 - Flambage

ID	h_{global}	h_{local}	# noeuds	# éléments	Warning	λ_c	ε_{λ_c}
	[mm]	[mm]	-	-	%	[MPa]	%
1	100	50	12111	6232	61.81	156.38	-
2	50	25	35834	18582	30.00	117.74	-32.82
3	30	20	77155	40326	2.81	102.52	-14.85
4	25	15	121859	64082	1.19	99.756	-2.77
5	20	10	241059	131057	0.63	97.338	-2.48

TABLE 8.11 – Convergence de la solution pour la charge critique en flambage.

9 Analyse et conclusion

9.1 Résumé des résultats obtenus

Analyse	Maillage	# de noeuds	$S@P$	U_{max}	λ_c
		-	[MPa]	[mm]	[MPa]
Cas 1	n°5	241059	41.57	18.43	-
Cas 2	n°5	241059	10.26	4.50	-
Cas 3 (flambage)	n°5	241059	-	-	97.34

TABLE 9.12 – Résumé des résultats finaux de notre analyse pour les trois cas de charge étudiés.

9.2 Pertinence et précision des résultats

Nous considérons que nos erreurs relatives obtenues sont acceptables. Le seuil de 7.5% a été pris légèrement supérieur au seuil conventionnel de 5% car notre structure ne présente pas autant d'exigences ou de marge de sécurité qu'une structure non-décorative.

Dans nos simulations, nous avons noté la présence de discontinuités des contraintes au niveau des coins et des concentrateurs de contraintes. Plus particulièrement, ces discontinuités apparaissent à l'interface entre deux matériaux : l'aluminium du support central du *F* et l'aluminium des tôles du reste du *F*. La présence d'arêtes vives dans ces zones encouragent la formation de concentrateurs de contraintes. Ce problème pourrait être contourné en modélisant les soudures du *F*, mais celles-ci ajouteraient une discontinuité supplémentaire de matériau.

9.3 Critères et analyse

Matériaux	R_m	$R_{p0.2}$
	[MPa]	[MPa]
EN AW-5083 (AlMg4,5Mn0.7) H111 [4]	275	125
EN AW-6082 (AlSi1MgMn) T651 [5]	310	260

TABLE 9.13 – Résistance (contrainte à la rupture) R_m et limite d'élasticité $R_{p0.2}$

Les contraintes de Von-Mises obtenues pour les cas 1 et 2 au point *P* sont bien en dessous des limites d'élasticité et des contraintes à rupture des deux aluminiums qui composent la structure du *F*. Ainsi, les cas de charge statiques présentés ne représentent pas de danger pour la structure.

Concernant le flambage, la valeur de charge critique trouvée après convergence est de 97.338MPa. Cette charge est conséquente puisqu'elle s'applique sur une surface faible. Le flambage représente une instabilité particulière qui arrive moins fréquemment qu'une déformation plastique simple.

9.4 Conclusion

Le *F* représente une structure à géométrie particulière. L'analyse des comportements en réponse à divers cas de charge permet de mieux comprendre les zones de concentration de contraintes ainsi que les modes de déformation.

Vu que nous sommes dans un cadre de simulation, il est toujours pertinent d'avoir du recul par rapport aux résultats obtenus. Nous pouvons bien affirmer que le *F* est une structure stable, étant donné qu'elle est soumise quotidiennement à divers types de charges.

9.5 Recommandations

Il serait intéressant d'étudier le comportement de la simulation en prenant en compte les soudures entre les tôles et comparer le résultat final à notre modèle afin de valider notre hypothèse de négliger les soudures. Nous pouvons également étudier d'autres cas de charges dynamiques dans la structure, telles que des vibrations, des impacts, ou des charges cycliques. Ces analyses supplémentaires contribueraient à une compréhension plus complète de la réponse de la structure, assurant ainsi qu'elle reste sûre dans des conditions variées ou imprévues.

10 Remerciements

Nous tenons à remercier l'entreprise METAL-SYSTEM à Echandens qui nous a fourni les plans 2D, matériaux, ainsi que des documents 3D pour pouvoir mener à bien cette étude.

11 Annexes

11.1 Force distribuée sur la partie supérieure et la traverse (cas 1)

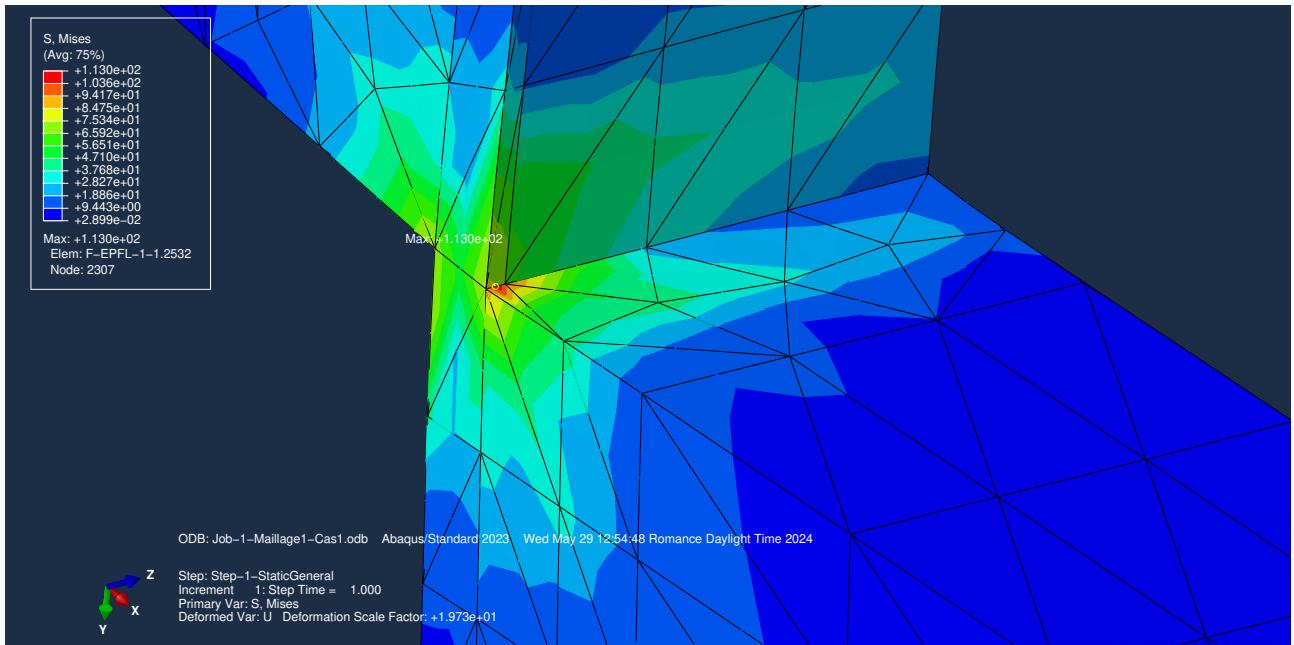


FIGURE 11.27 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°1 pour le premier cas de charge (coin 4).

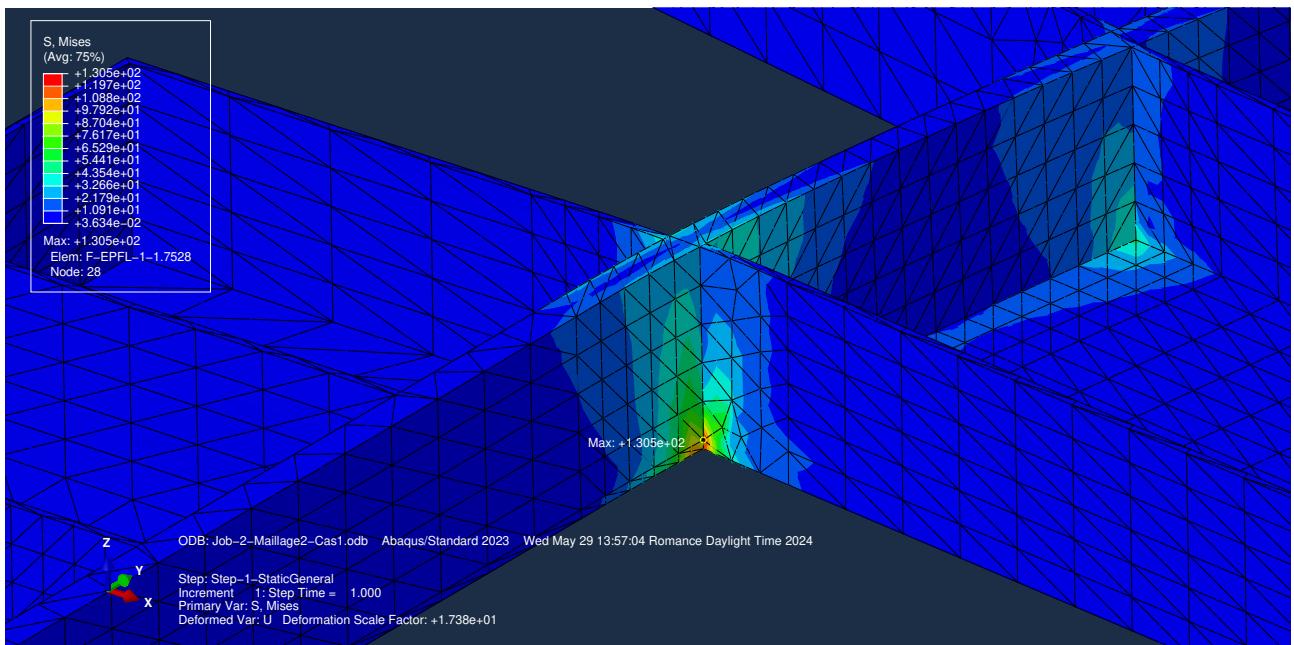


FIGURE 11.28 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°2 pour le premier cas de charge (coin 4).

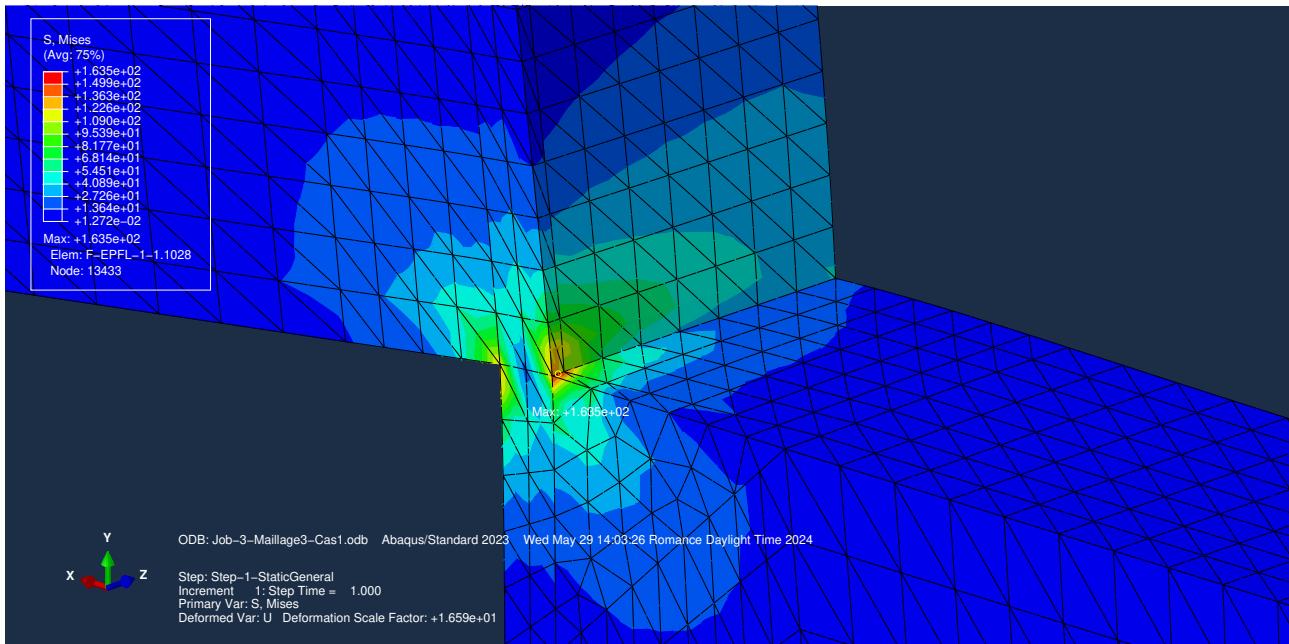


FIGURE 11.29 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°3 pour le premier cas de charge (coin 3).

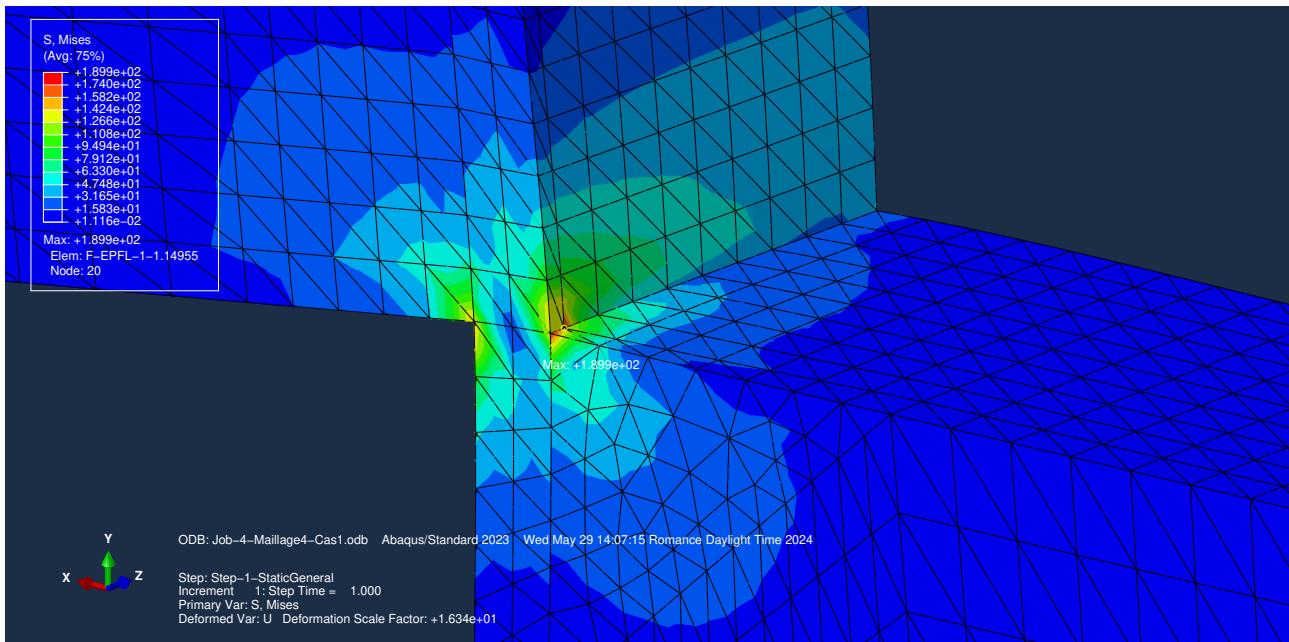


FIGURE 11.30 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°4 pour le premier cas de charge (coin 3).

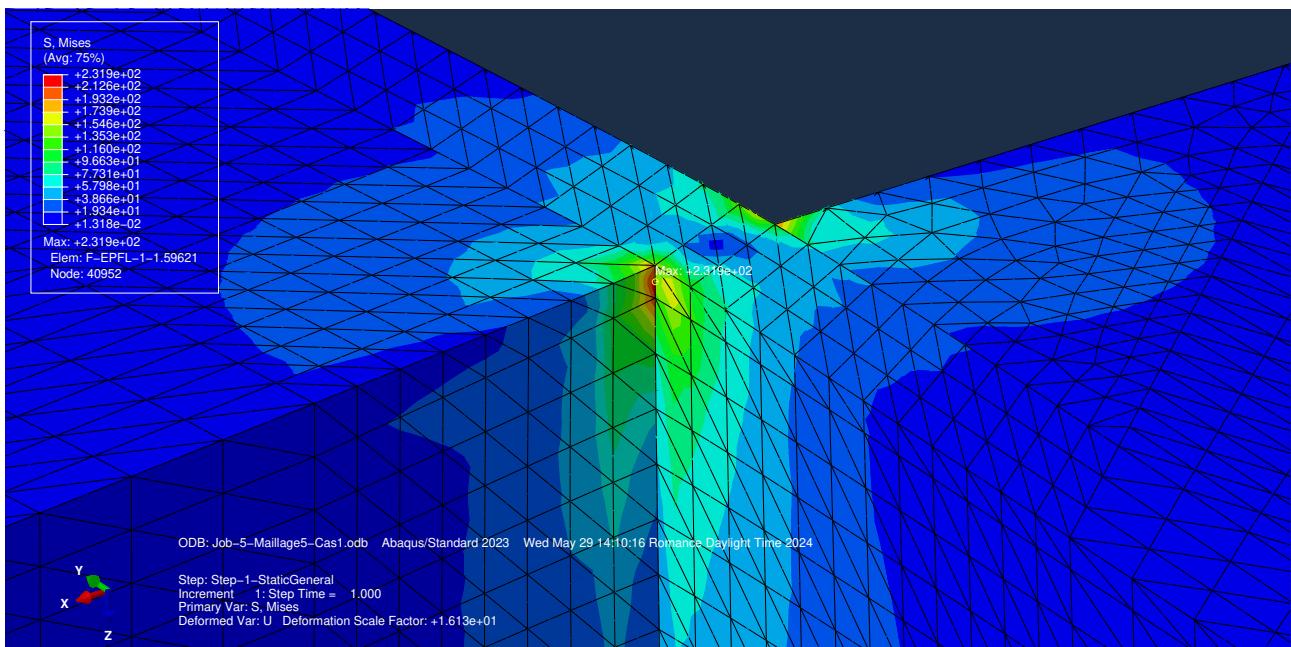


FIGURE 11.31 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°5 pour le premier cas de charge (coin 4).

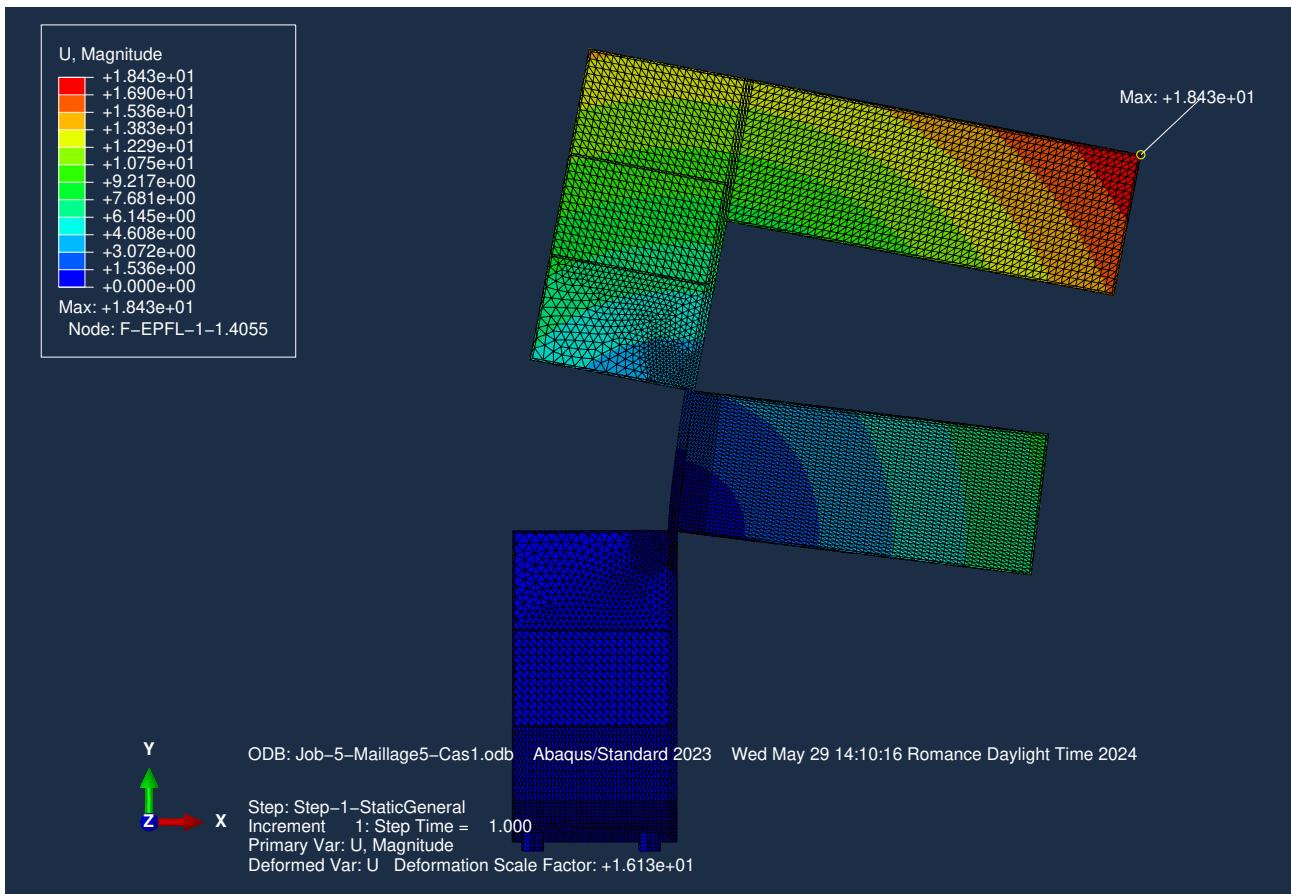


FIGURE 11.32 – Déplacement maximal avec le maillage n°5 pour le premier cas de charge.

11.2 Force distribuée sur les faces latérales (cas 2)

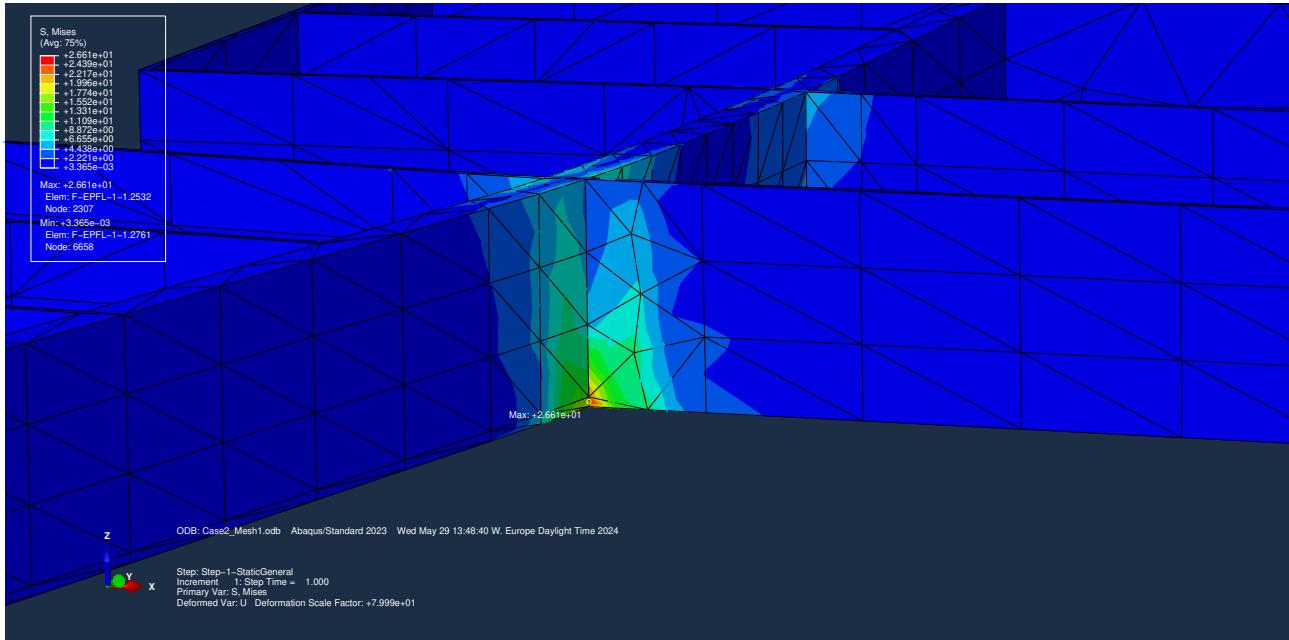


FIGURE 11.33 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°1 pour le deuxième cas de charge (coin 4).

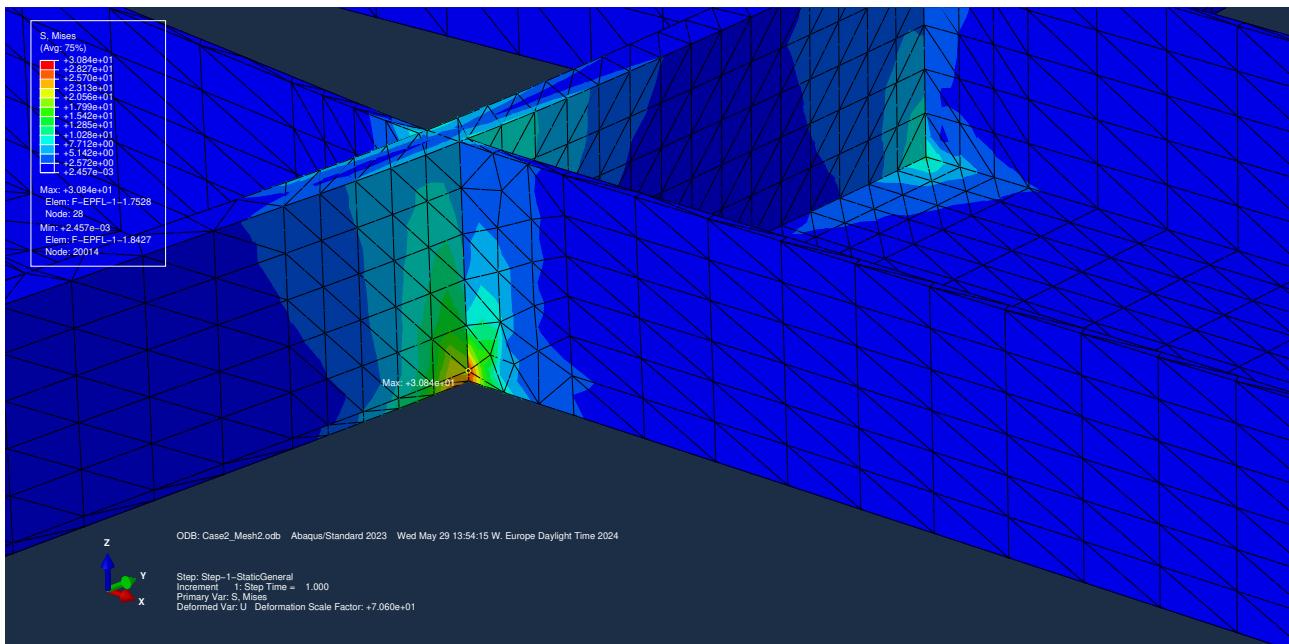


FIGURE 11.34 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°2 pour le deuxième cas de charge (coin 4).

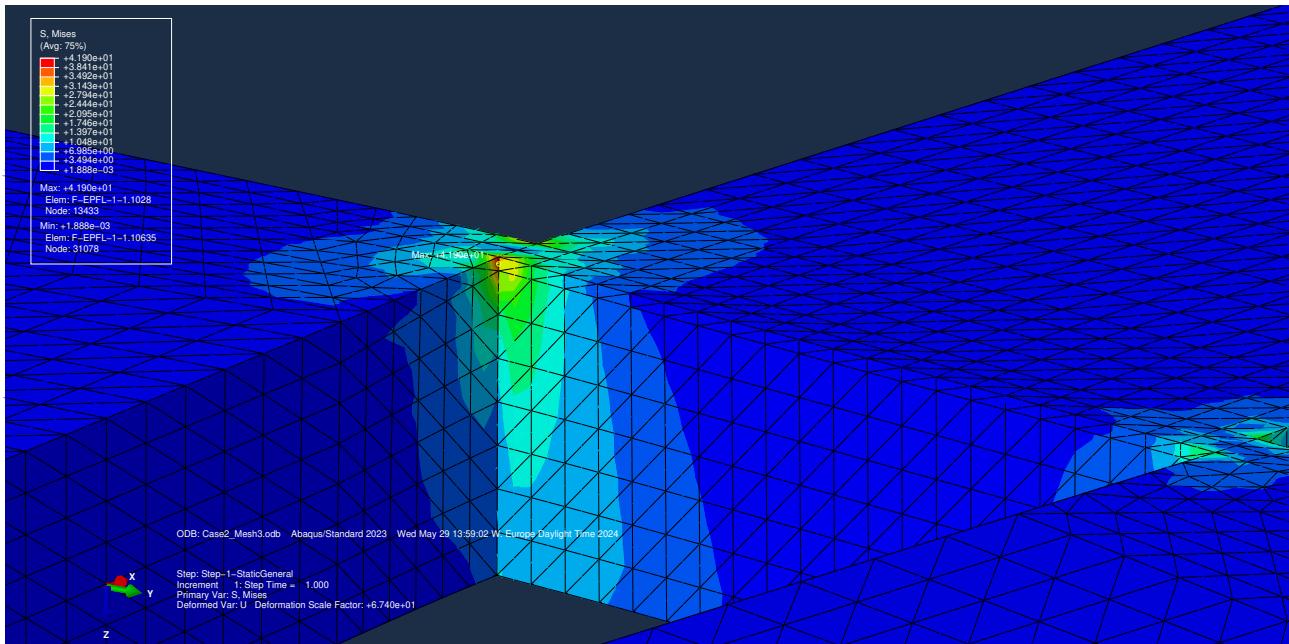


FIGURE 11.35 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°3 pour le deuxième cas de charge (coin 2).

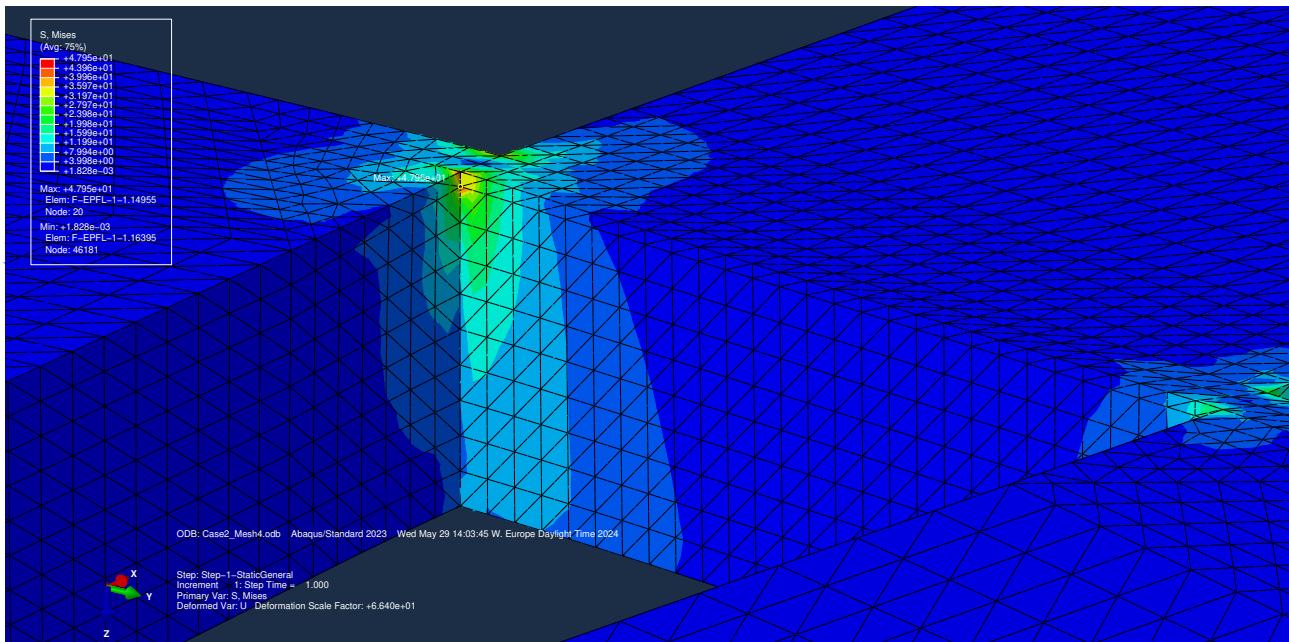


FIGURE 11.36 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°4 pour le deuxième cas de charge (coin 2).

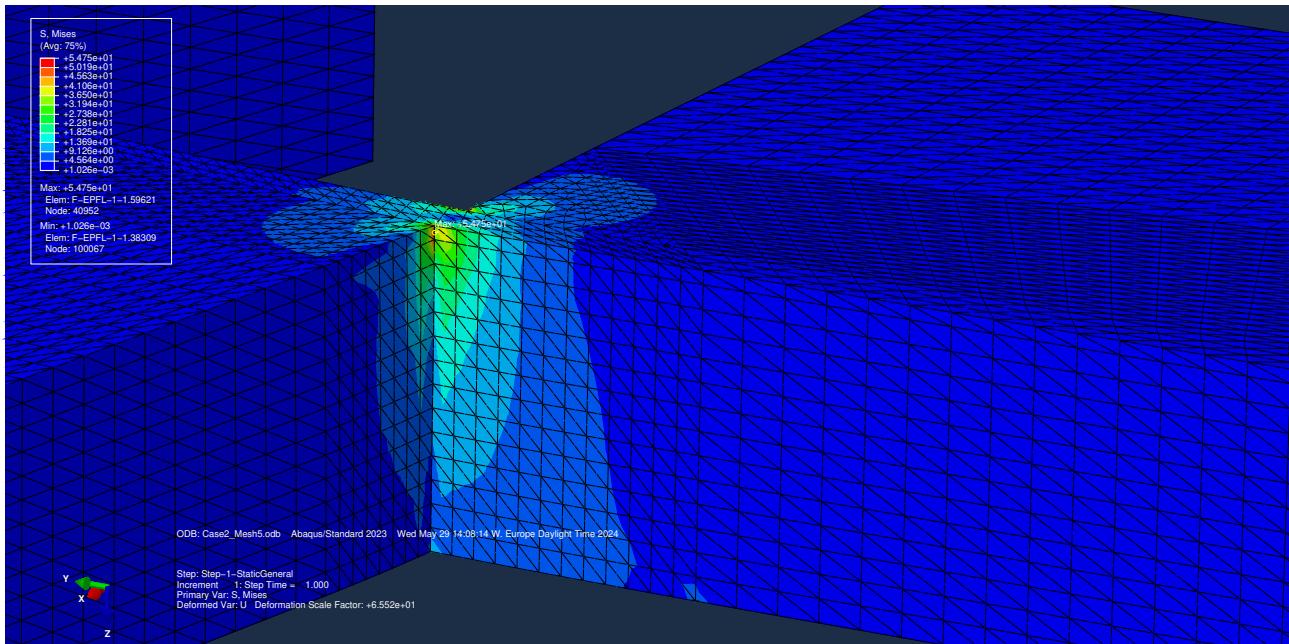


FIGURE 11.37 – Contrainte de Von-Mises avec le maillage n°5 pour le deuxième cas de charge (coin 4).

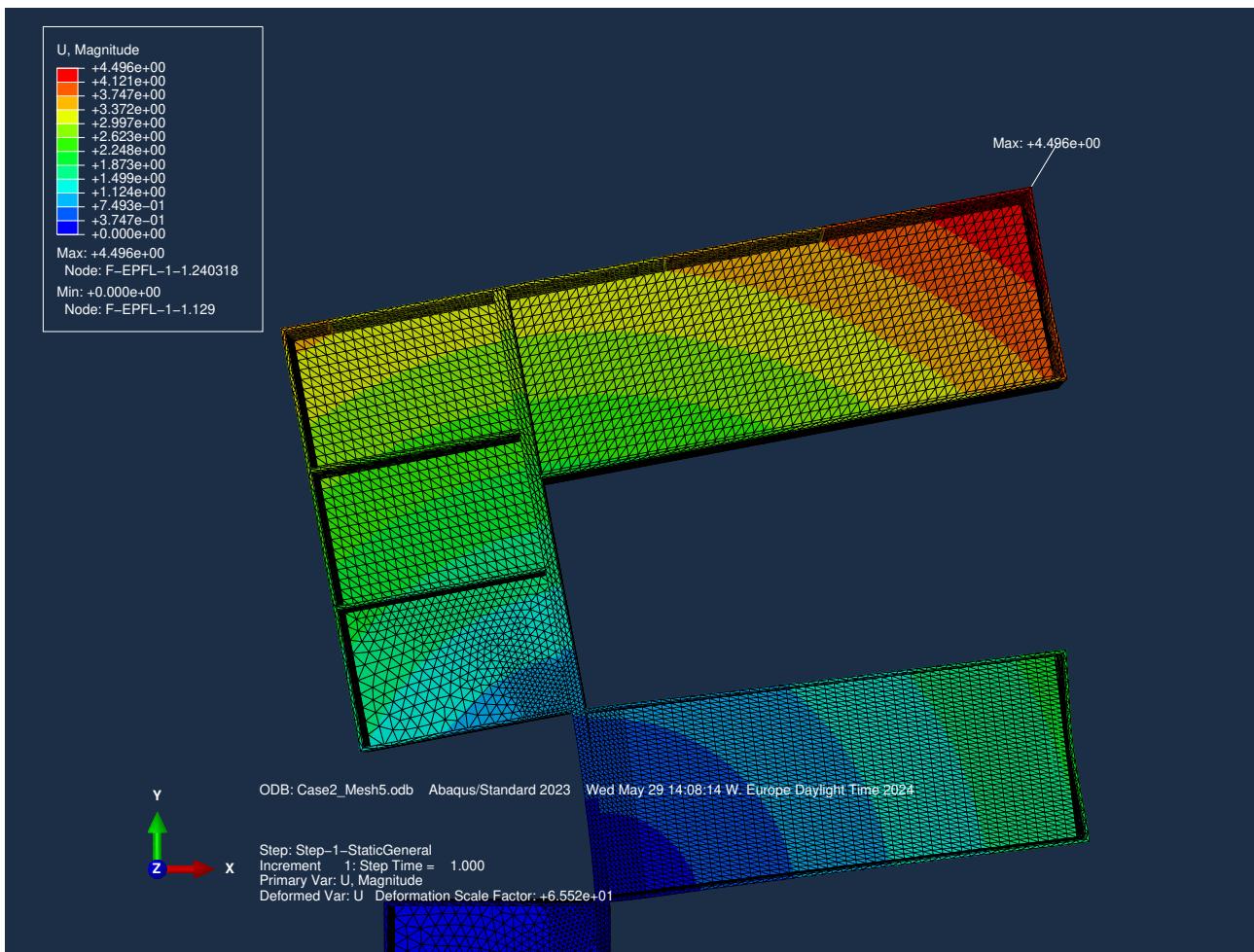


FIGURE 11.38 – Déplacement maximal avec le maillage n°5 pour le deuxième cas de charge.

11.3 Flambage (cas 3)

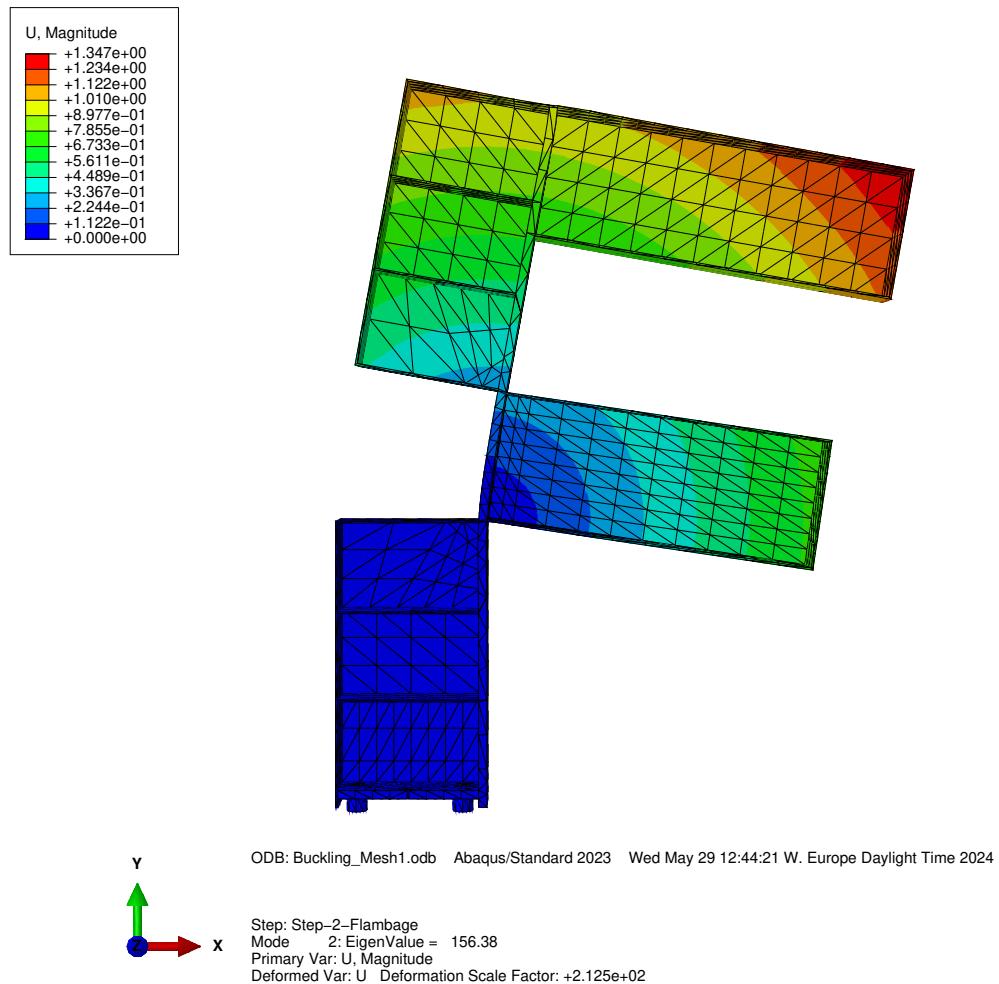


FIGURE 11.39 – Allure du mode propre correspondant à la première valeur propre positive avec le maillage n°1.

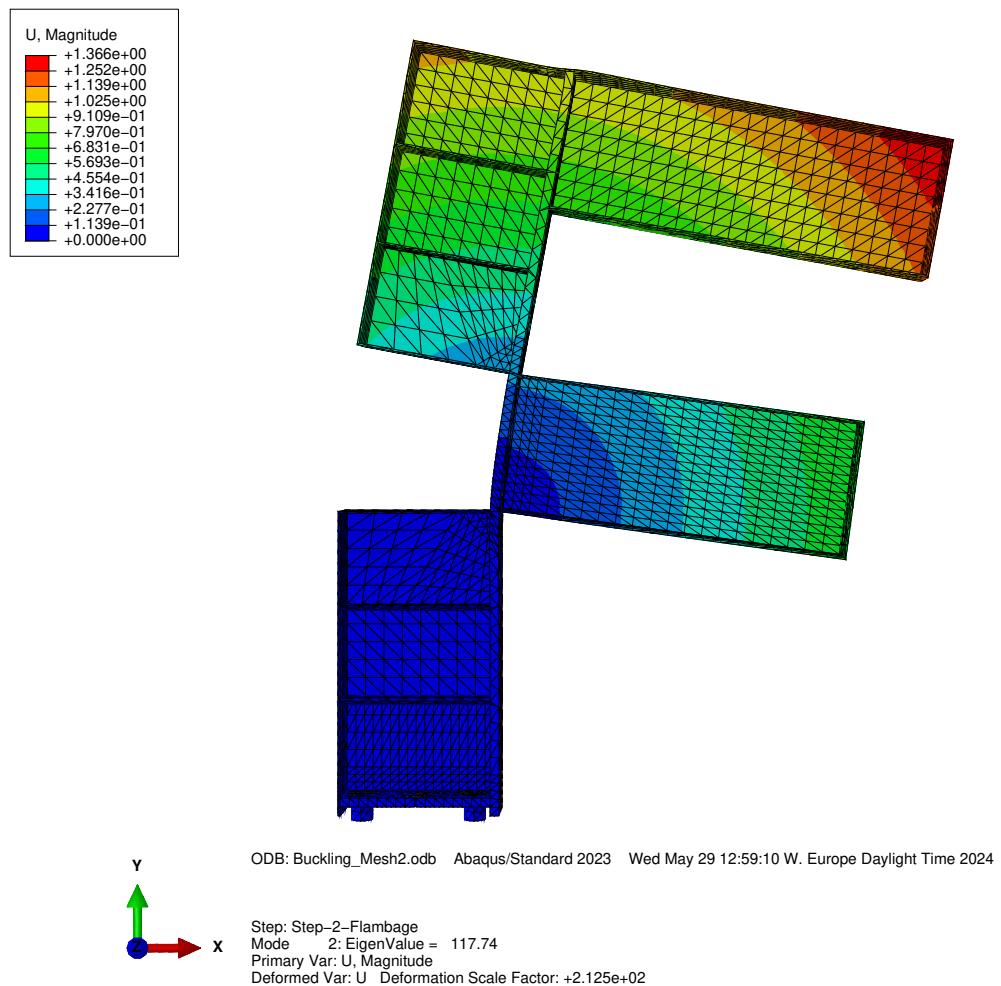


FIGURE 11.40 – Allure du mode propre correspondant à la première valeur propre positive avec le maillage n°2.

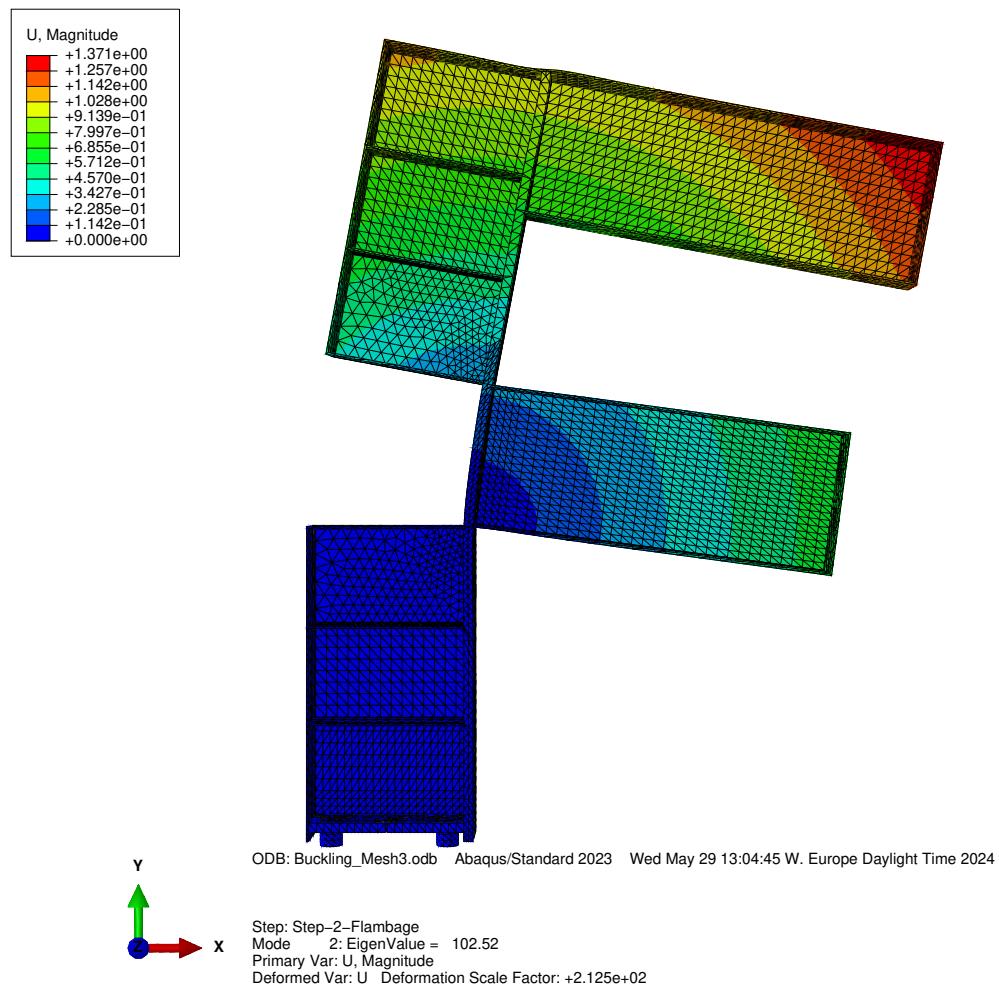


FIGURE 11.41 – Allure du mode propre correspondant à la première valeur propre positive avec le maillage n°3.

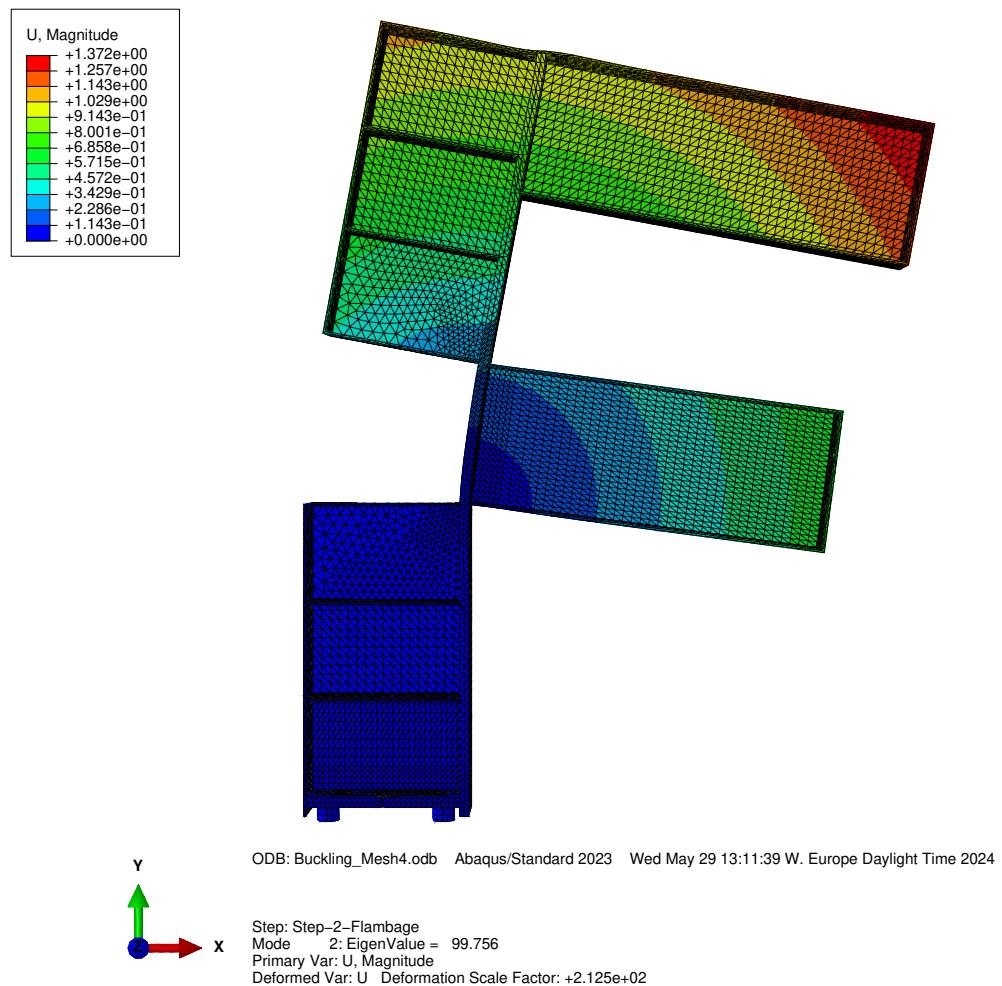


FIGURE 11.42 – Allure du mode propre correspondant à la première valeur propre positive avec le maillage n°4.

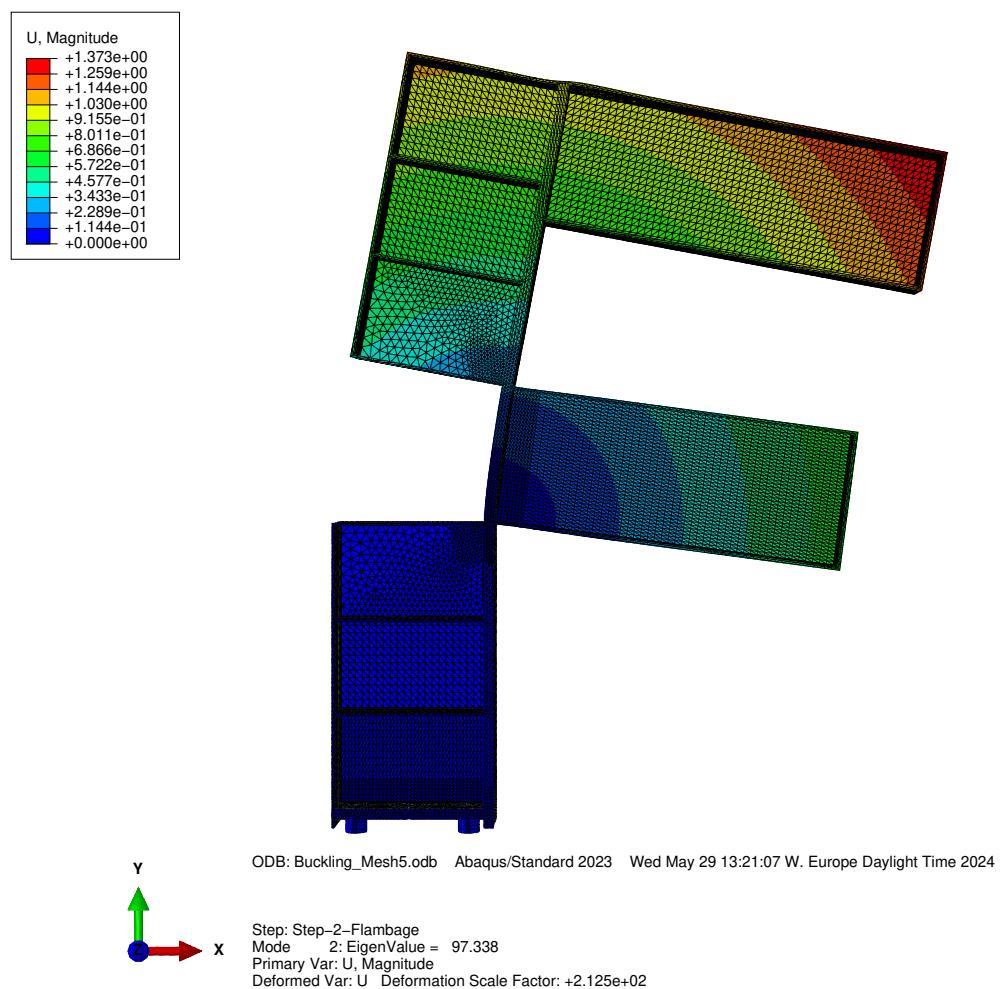


FIGURE 11.43 – Allure du mode propre correspondant à la première valeur propre positive avec le maillage n°5.

Références

- [1] EPFL, *Identité - Présentation*. adresse : <https://www.epfl.ch/about/overview/fr/identite/> (cf. p. 3).
- [2] METAL-SYSTEM, *Logo géant - EPFL Ecublens*. adresse : <https://www.metalsystem.ch/signaletique/logogeant-epflecublens> (cf. p. 3).
- [3] WIKIPÉDIA, *Caractère (typographie) - Parties de la lettre*. adresse : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Caract%C3%A8re_\(typographie\)#Parties_de_la_lettre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Caract%C3%A8re_(typographie)#Parties_de_la_lettre) (cf. p. 3).
- [4] EN AW-5083 (3.3547), kloeckner metals. adresse : <https://facts.kloeckner.de/werkstoffe/aluminium/3-3547/> (cf. p. 4, 30).
- [5] EN AW-6082 (3.2315), kloeckner metals. adresse : <https://facts.kloeckner.de/werkstoffe/aluminium/3-2315/> (cf. p. 4, 30).
- [6] AGEPOLY, *Comité de Direction*. adresse : <https://agepoly.ch/wp-content/uploads/2023/09/comiteLogo-min-scaled.jpg> (cf. p. 7).
- [7] K. FEWSTER et J. POTVIN, « Maximum forces and joint stability implications during in-line arm pushes, » *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, t. 16, n° 3, p. 314-325, 2015. doi : 10.1080/1463922X.2014.984012. eprint : <https://doi.org/10.1080/1463922X.2014.984012> (cf. p. 9, 10).