



MODÉLISATION ET SIMULATION PAR ÉLÉMENTS FINIS
ME-373

RAPPORT D'ÉTUDE

CANETTE

GROUPE 18

TATIANA PINA CUNHA 342535

MICHELE POLI 342542

SEMESTRE DE PRINTEMPS 2024
ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Table des matières

1	But de l'étude	4
1.1	Objectifs	4
1.2	Type d'analyse	4
1.3	Méthodologie	4
2	Hypothèses Géométriques	5
2.1	Présentation de la géométrie	5
2.2	Système d'unités utilisé	5
2.3	Assemblage	6
2.4	Dimensions caractéristiques	6
2.5	Symétries du problème	6
2.5.1	Mécanique statique	6
2.5.2	Flambage élastique	7
2.6	Espace de modélisation géométrique	7
3	Hypothèses de comportements physiques	8
3.1	Descriptions des matériaux	8
3.1.1	Mécanique statique	8
3.1.2	Flambage élastique	8
3.2	Propriétés constitutives	8
3.3	Sections	8
3.4	Assignation des comportements	9
4	Hypothèses de chargements	10
4.1	Modèle de conditions limites	10
4.1.1	Mécanique statique	10
4.1.2	Flambage élastique	11
4.2	Conditions de symétrie	11
4.2.1	Mécanique statique	11
4.2.2	Flambage élastique	12
4.3	Modes de corps rigide	12
4.4	Systèmes de coordonnées	12
4.5	Distribution spatiale/temporelle	12
5	Hypothèses de discréétisation et maillage	13
5.1	Choix du type d'éléments finis	13
5.2	Méthode de maillage	13
5.3	Maillage initial	13
5.3.1	Mécanique statique	13
5.3.2	Flambage élastique	14
5.4	Maillage optimisé	14
5.4.1	Mécanique statique	15
5.4.2	Flambage élastique	15
6	Type de problème/Résolution	17

6.1	Type de problème résolu	17
6.1.1	Mécanique statique	17
6.1.2	Flambage élastique	17
6.2	Options de résolution	18
6.3	Résultats calculés	18
6.4	Non-linéarités	18
7	Étude de convergence de maillage	20
7.1	Critère	20
7.2	Présentation des différents maillages	21
7.2.1	Mécanique statique	21
7.2.2	Flambage élastique	23
7.3	Résultats du maillage initial	25
7.3.1	Mécanique statique	25
7.3.2	Flambage élastique	27
7.4	Résultats du maillage raffiné	28
7.4.1	Mécanique statique	28
7.4.2	Flambage élastique	29
7.5	Estimation d'erreur relative	31
7.5.1	Mécanique statique	31
7.5.2	Flambage élastique	32
7.6	Choix du maillage optimal	32
8	Résultats	33
8.1	Résultat 1	33
8.2	Résultat 2	34
9	Analyse et conclusions	37
9.1	Résumé des résultats calculés	37
9.2	Pertinence/précision des résultats ? Causes d'incertitude majeures ?	37
9.2.1	Mécanique statique	37
9.2.2	Flambage élastique	39
9.3	Critères et analyse	40
9.3.1	Mécanique statique	40
9.3.2	Flambage élastique	41
9.4	Conclusion	41
9.5	Recommandations	41
10	Annexes	42

Table des figures

1	Model 3D	5
2	Représentation des matériaux attribués	9
3	BC basée sur la méthode 3-2-1	10
4	BC en raison de la symétrie	10
5	Surface d'application de la pression	10
6	Surface d'application de la pression	11
7	Représentation du maillage numéro 0	14
8	Représentation du maillage initial pour le cas de flambage	14
9	Représentation du maillage numéro 4	15
10	Représentation du maillage optimisé pour le cas de flambage	16
11	Solution numérique et variation relative	21
12	Raprésentation du maillage numéro 0	22
13	Représenatation du maillage numéro 1	22
14	Représenatation du maillage numéro 2	22
15	Représenatation du maillage numéro 3	23
16	Représenatation du maillage numéro 4	23
17	Représenatation du maillage 0	24
18	Représenatation du maillage 1	24
19	Représenatation du maillage 2	24
20	Représenatation du maillage 3	25
21	Représenatation du maillage 4	25
22	Champ de déplacement maillage grossier	26
23	Champ de contrainte équivalente de Von Mises calculée maillage grossier	26
24	Courbure sur laquelle nous appliquerons un raffinement	27
25	Résultats pour la première et deuxième force critique	27
26	Résultats pour la troisième force critique	28
27	Champ de déplacement maillage fin	29
28	Champ de contrainte équivalente de Von Mises calculée maillage fin	29
29	Résultats pour la première et deuxième force critique	30
30	Résultats pour la troisième force critique	30
31	Graph de conergence	31
32	Graph de conergence de la force critique	32
33	Champ de contrainte équivalente de Von Mises calculée maillage ultime	33
34	Champ de déplacement maillage ultime	33
35	Champ de contrainte équivalente de Von Mises dans la zone d'intérêt calculée maillage ultime	34
36	Champ de déplacement dans la zone d'intérêt maillage ultime	34
37	Résultats pour la première et deuxième force critique	35
38	Résultats pour la troisième force critique	36
39	Valeur de σ_{zz} dans l'élément 5364 en MPa	38
40	Valeur de $\sigma_{\theta\theta}$ dans l'élément 5247 en MPa	38
41	Simulation avec un épaisseur modifié	38
42	Modèle réel	39
43	Images de l'expérience	40

1 But de l'étude

1.1 Objectifs

Dans ce rapport, nous analyserons une canette qui, après avoir été secouée, subira une pression interne supérieure à la pression atmosphérique. Nous comprendrons ainsi quelles sont les zones les plus exposées au risque de rupture et celles qui subiront les plus grandes déformations. À l'étape suivante, nous réaliserons une analyse de flambage pour déterminer s'il est possible de provoquer l'instabilité d'une canette vide sous le poids d'un adulte d'environ 80 Kg.

1.2 Type d'analyse

L'analyse de la pression interne est un type d'analyse mécanique statique, plus dans le détail une analyse de solides déformables sous charge, tandis que la deuxième, est une analyse de flambage élastique.

Nous utiliserons le logiciel Abaqus de Dassault Systèmes afin d'effectuer nos simulations par éléments finis.

1.3 Méthodologie

En nous basant sur le modèle 3D standard d'une canette, trouvé sur internet , nous avons pu identifier deux matériaux dont la canette est composée et extraire les valeurs du module de Young et du coefficient de Poisson, ainsi que la densité et tout ce dont nous avions besoin. Ces deux matériaux ont des propriétés assez similaires, mais pour rendre le modèle plus réaliste, nous avons décidé de les utiliser les deux.

Pour le cas de la pression interne, après avoir testé le cas où la pression de la boisson et la pression atmosphérique agissaient sur la canette, et le cas où seule la différence entre les deux agissait sur les parois internes, nous avons constaté que les résultats présentaient des différences négligeables ou nulles. Nous avons donc décidé de nous baser uniquement sur la deuxième expérience pour simplifier le problème. Parallèlement, pour l'analyse du flambage, nous avons défini la force appliquée comme une pression sur l'anneau du haut de la canette (voir section 4.1.2).

Nous nous sommes alors intéressés à la discréétisation de notre modèle, pour enfin définir le problème et le résoudre, puis discuter les résultats et évaluer la validité de nos hypothèses.

2 Hypothèses Géométriques

2.1 Présentation de la géométrie

Pour ce projet, nous nous sommes inspirés d'un modèle de une canette standard. Nous avons pris un modèle sur le web¹. Voici un rendu réalisé à l'aide de Fusion 360.



FIGURE 1 – Model 3D

Nous avons importé un fichier STEP et l'avons directement importé dans Abaqus pour le cas du flambage. Pour le cas statique, étant donné la symétrie miroir de la pièce, après avoir importé le modèle STEP dans Abaqus, nous l'avons divisé en deux à l'aide d'un plan de symétrie. De cette manière, nous avons pu réduire le temps de calcul.

2.2 Système d'unités utilisé

Le système d'unités utilisé est celui des millimètres-Newton-secondes. En utilisant les diapositives fournies dans le cours, nous pouvons ainsi exprimer les quantités comme indiquée dans le tableau ci-dessous :

1. Modèle extrait du site : <https://grabcad.com/>

Quantité	Unité de mesure
Longueur	mm
Masse	tonne
Température	°C
Densité	tonne/mm ³
Force	N
Temps	s
Vitesse	mm/s
Accélération	mm/s ²
Surface	mm ²
Volume	mm ³
Moment d'inertie	mm ⁴
Angle	rad
Vitesse angulaire	rad/s ²
Moment	Nmm
Module de Young	MPa
Pression	N/mm ² =MPa

TABLE 1 – Système d'unités millimètres, Newton et secondes

2.3 Assemblage

Notre assemblage est composé d'une seule pièce, car dans nos hypothèses, nous avons jugé inutile de modéliser la languette qui sert à ouvrir la canette.

2.4 Dimensions caractéristiques

Notre modèle est une coque d'une épaisseur de 0,22 millimètres. La canette a un diamètre extérieur de 66 mm et une hauteur de 114 mm. Après avoir assigné les sections et les matériaux au modèle dans Abaqus, en utilisant l'outil Tools → Query → Mass properties, nous obtenons une masse de $1,79 \cdot 10^{-5}$ tonnes (17.9g) et un volume de 6632.90mm^3 ($6.63290 \cdot 10^{-6}\text{m}^3$) pour l'ensemble de la canette. Ces valeurs semblent refléter la réalité, en tenant compte d'une certaine marge d'incertitude.

2.5 Symétries du problème

2.5.1 Mécanique statique

La canette présente une symétrie par rapport au plan yz . Par conséquent, pour accélérer les calculs effectués par Abaqus, nous avons divisé la canette en deux, en ne conservant qu'une moitié. Pour remédier à la suppression d'un demi-modèle, une condition limite (BC) supplémentaire est insérée dans la section.

Dans le cadre de ce projet, l'analyse vise à étudier la réponse structurelle de la boîte sous l'effet de la pression interne. La pression interne est maintenue constante à l'intérieur de la canette, tout comme la pression externe. Compte tenu de la symétrie du problème, nous pouvons donc analyser

seulement la moitié de la canette sans perdre d'informations pertinentes. Cette approche permet de simplifier le modèle et de réduire le temps de calcul, tout en conservant la précision des résultats.

2.5.2 Flambage élastique

Concernant le flambage, n'est pas possible d'utiliser la symétrie du cas statique : le fait de diviser en deux la canette pourrait modifier et/ou ignorer certaines modes propres et donc changer la force critique à partir de laquelle se produira le flambage. En introduisant une symétrie dans ce genre d'analyse on obtiendrait que les modes qui satisfont cette symétrie en oubliant les asymétriques. Par contre, la modélisation par coques continue d'être utilisée.

2.6 Espace de modélisation géométrique

Après avoir importé le modèle 3D dans Abaqus, la canette pleine de matière à l'intérieur a été transformé en une coque de 0,22 millimètre, vu la nature fine et courbée du matériau. Cela a été possible grâce à l'outil "Create Shell : From Solid" dans la section "Part". Par la suite, grâce à un plan de symétrie qui passe par le centre de la canette et qui coupe symétriquement l'encoche pour la capsule nous avons pu diviser la canette en deux parties (symétrie utilisé que pour l'analyse statique).

3 Hypothèses de comportements physiques

3.1 Descriptions des matériaux

Comme indiqué précédemment, la canette est composée de deux matériaux différents : l'aluminium 5182-H19 et l'aluminium 3104-H19.

L'aluminium 3104-H19 est un matériau isotrope, dont le module de Young est de $69 GPa$ et le coefficient de Poisson de 0,34.

L'aluminium 5182-H19 est aussi un matériau isotrope, dont le module de Young est de $69,6 GPa$ et le coefficient de Poisson de 0,33.

L'aluminium a une limite d'élasticité relativement basse, ce qui signifie qu'il ne peut pas supporter de grandes déformations élastiques avant de commencer à se déformer plastiquement.

L'aluminium est connu pour sa bonne ductilité, ce qui signifie qu'il peut subir d'importantes déformations plastiques avant de se fracturer. Il est donc idéal pour les processus d'usinage tels que l'extrusion et le laminage.

3.1.1 Mécanique statique

Toutes les déformations sont considérées comme linéaires. Les effets thermiques ne sont pas pris en compte.

3.1.2 Flambage élastique

Le but de une analyse de flambage est de déterminer la force de compression qui déclenche une instabilité élastique et qui conduit à l'effondrement. On reste donc dans le domaine élastique et dans un cadre linéaire des petites déformations.

3.2 Propriétés constitutives

Les propriétés constitutives des différentes composantes, comme décrit dans la section 3.1, sont consignées dans le tableau suivant² :

Matériaux	Densité [$\frac{g}{cm^3}$]	$E[GPa]$	ν
Aluminium 5182-H19	2.65	69.6	0.33
Aluminium 3104-H19	2.72	69	0.34

3.3 Sections

Comme mentionné précédemment, toutes les sections sont des coques d'une épaisseur de 0,22 millimètres.

2. Données pour l'aluminium 3104-H19 extraites du site : https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=aaaabe41a20a4ed2b48270f7f2ef1b2d

Données pour l'aluminium 5182-H19 extraites du site : <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9ef482b0015a483194bcraf3d53e2bf52&ckck=1>

3.4 Assignation des comportements

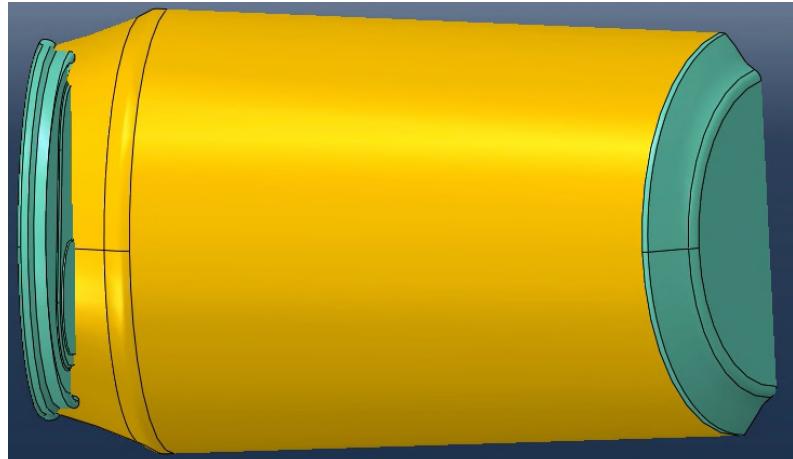


FIGURE 2 – Représentation des matériaux attribués

La figure ci-dessus permet de voir à quelles sections les différents matériaux ont été assigné. Les sections en jaune représentent l'aluminium 3104-H19 et celles en vert l'aluminium 5182-H19. L'assignation des comportements se fait dans la section "Property" d'Abaqus. En nous basant sur le tableau des propriétés de la section précédente, nous renseignons les différentes propriétés des matériaux dans la fenêtre "Edit Material" en sélectionnant "Elasticité-linéaire".

4 Hypothèses de chargements

4.1 Modèle de conditions limites

4.1.1 Mécanique statique

Le modèle comporte deux conditions limites. La première concerne la symétrie de la pièce (Figure 4). La deuxième est imposée sur le contour du fond, cette condition limite est basée sur la méthode 3-2-1. Les trois points de la Figure 3 ont été bloqués comme suit : le premier est bloqué dans les 3 déplacements pour empêcher toutes les translations, le deuxième dans les déplacements x et y pour empêcher 2 rotations et le dernier dans les déplacements par rapport à l'axe z pour empêcher la troisième rotation. Bien qu'elle n'ait pas de valeur physique réelle, cette condition aux limites est nécessaire pour donner à Abaqus un point de référence, sans lequel le risque d'erreurs augmenterait.

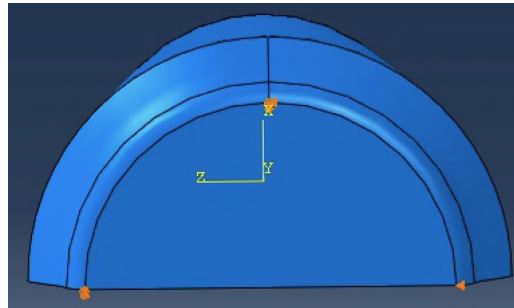


FIGURE 3 – BC basée sur la méthode 3-2-1

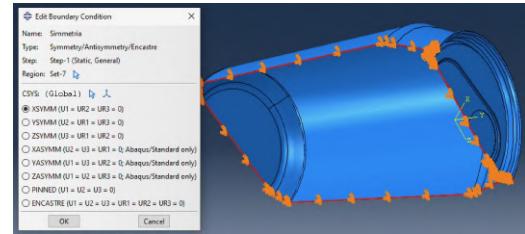


FIGURE 4 – BC en raison de la symétrie

Pour ce qui concerne la pression appliquée, il s'agit de la différence entre la pression atmosphérique et la pression à l'intérieur de la canette. Cette dernière n'ayant pas de valeur déterminée, en raison de facteurs tels que la température, le fait que la canette ait été secouée, etc., nous avons estimé une valeur d'environ 3 atm. En prenant la différence, nous obtenons une pression totale de 2 atm. Cette pression est appliquée partout à l'intérieur de la canette, c'est pourquoi, pour l'application, l'entièvre canette a été sélectionnée et la pression a été appliquée aux surfaces qui sont colorées en violet dans l'image suivante.

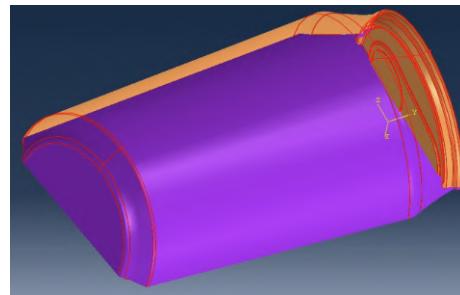


FIGURE 5 – Surface d'application de la pression

4.1.2 Flambage élastique

La symétrie dans le cas de flambage ne peut pas être utilisé car les modes asymétriques seraient oubliés.

Le cas de flambage va regarder comment la canette réagi sous un effort de compression, une force est donc appliquée sur le haut de la canette ; plus en détail sur la surface du bord extérieur qui est plus sur-élevée par rapport à la surface d'ouverture de la canette. On applique une force de 1N sur la surface mentionnée avant, qui est équivalent à une pression de 0.0179 MPa

$$p = \frac{F}{Surface} = \frac{1N}{55.84mm^2} = 0.0179 \frac{N}{mm^2} = 0.0179 MPa$$

ceci pour simplifier le calcul de la force critique qui sera donc équivalent au mode propre.

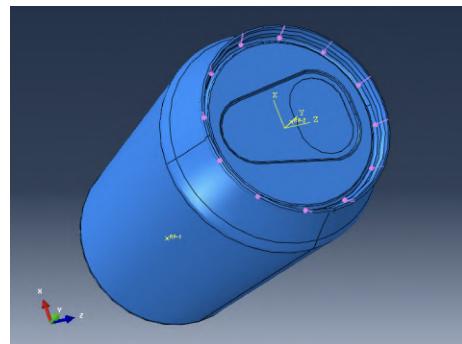


FIGURE 6 – Surface d'application de la pression

Le fond de la canette, au contraire, il est encastré puisque dans une situation réelle, par exemple quand on veut écrasée la canette en lui mettant un pied dessus, le fond ne vas pas bouger ni tourner. En essayant diffèrent conditions de bord il s'avère que plusieurs apportent le même résultat :

1. encastrement de la surface du fond
2. encastrement du point au milieu de la surface du fond, pour laisser libres les rotations et les déplacements sur le reste de la surface
3. encastrement de la surface supérieure ou du point au centre de la même, avec l'épinglèment de la surface du haut ou du point centrale de celle-ci. (épinglé : imposition d'un déplacement nul dans les directions non perpendiculaires à la normale de la surface du haut, ici x et z)

Nous avons enfin décider d'opter pour encastrer un point de la surface du font et laisser libre la surface du haut (option 2).

4.2 Conditions de symétrie

4.2.1 Mécanique statique

La canette étant divisée en deux, une condition limite a dû être insérée pour en tenir compte. Nous avons donc appliqué une condition prédéfinie dans Abaqus (XSYMM) sur la face de coupe qui interdit les déplacements en x et les rotations par rapport aux axes y et z, comme le montre la Figure 4.

4.2.2 Flambage élastique

Aucune symétrie est utilisée dans l'analyse de flambage : il y a le risque de perdre des modes propres. L'analyse est donc effectuée sur l'ensemble de la canette en la considérant une coque.

4.3 Modes de corps rigide

Physiquement, c'est quand un corps subi une translation ou une rotation globale sans se déformée, puisque il manque de conditions limites. Mathématiquement se vérifie quand la matrice K de rigidité devient singulière et non inversible et le système ne peut plus être résolu.

Un corps sans déplacements imposés possède six modes de corps rigide : 3 translations et 3 rotations, le logiciel les détecte en plus du nombre de modes flexibles demandé : leur fréquence est nulle. Pour les supprimer, durant l'analyse statique, la méthode 3-2-1 permet de imposer des conditions initiales et les chargements nécessaires pour éviter ce problème.

Pendant l'analyse de flambage, l'encastrement du fond est suffisant pour éviter ses modes.

4.4 Systèmes de coordonnées

Nous avons utilisée un système de coordonnées cartésiennes pour l'application de toutes les forces et conditions limites. Cependant, un système de coordonnées cylindriques a été créé et utilisé pour une meilleure compréhension des données lues.

4.5 Distribution spatiale/temporelle

Tout les analyses dans ce rapport sont des cas statiques et ne dépendent pas du temps. Le temps n'a donc aucune influence sur les chargements imposées ainsi que dans les conditions de bord. En fait, ce n'est pas nécessaire d'imposer des conditions initiales.

Pour le cas statique les pressions externes et internes sont appliquées radialement sur les parois latérales et axialement sur les surfaces supérieures et inférieures.

Pour le flambage le chargement est appliqué normale à la surface.

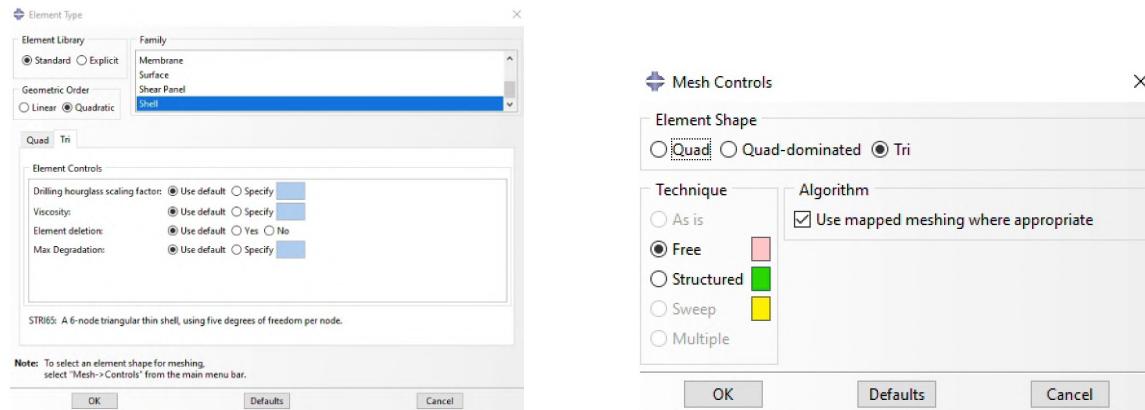
5 Hypothèses de discréétisation et maillage

5.1 Choix du type d'éléments finis

Nous avons choisi une structure en coque, c'est pourquoi nous avons sélectionné des éléments finis de cette nature. Nous avons opté pour des éléments triangulaires quadratiques pour les deux cas étudiés, car ces éléments sont les plus appropriés pour la géométrie de la canette, en raison des formes courbées du haut (chanfreins et arrondis) ainsi que pour la nature circulaire du fond et du haut. Nous avons utilisé des fonctions de forme quadratiques dans tous les éléments pour obtenir une convergence plus rapide avec une intégration exacte.

5.2 Méthode de maillage

Nous utilisons un algorithme de maillage 3D qui propage le maillage 2D sur la coque. Nous utilisons un algorithme libre parce que le plus adapté aux éléments tétraédriques qu'on a choisi. Voici les options détaillées que nous avons choisies pour notre maillage :



5.3 Maillage initial

5.3.1 Mécanique statique

Un maillage initiale triangulaire quadratique avec une taille globale de 3 mm, composée par 3908 éléments, 7817 noeuds et 23451 degrés de liberté a été utilisée comme premier maillage, ceci pour réduire le temps et le ressources de calcul pendant le différents essayes.

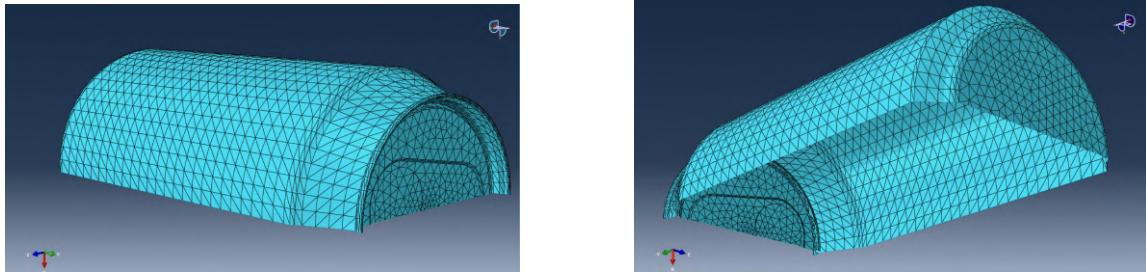


FIGURE 7 – Représentation du maillage numéro 0

5.3.2 Flambage élastique

Un maillage initiale triangulaire quadratique avec une taille de 3 mm, composée par 8014 éléments et 16030 nœuds a été utilisée comme premier maillage, ceci pour réduire le temps et le ressources de calcul pendant le différents essayes qui ont amené au choix des bonnes conditions limites.

Ce maillage est simpliste et sert comme point de départ pour développer un maillage qui s'adapte mieux à la géométrie courbé du haut et du fond de la canette, bien que le maillage n'ait pas l'air trop mal : pas de discontinuités et le maillage est cohérente avec les options de maillage choisies. Tous les nœuds ont trois degrés de liberté (à l'exception de ceux qui sont soumis à des conditions limites).

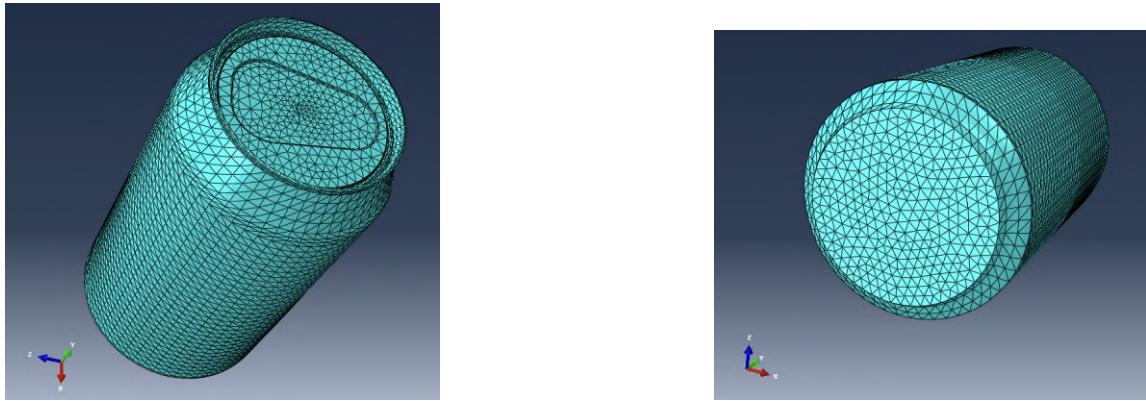


FIGURE 8 – Représentation du maillage initial pour le cas de flambage

5.4 Maillage optimisé

À la suite des sections précédentes, nous avons identifié les zones à raffiner. Nous présentons ici le maillages raffinés.

5.4.1 Mécanique statique

Après avoir testé une maille globale de 3 mm, nous avons identifié les zones qui semblaient les plus sollicitées et celles qui présentaient le plus grand déplacement. Il s'est avéré que le déplacement le plus important se situait au fond de la canette et que les contraintes les plus importantes se trouvaient sur le bord du fond de la canette. C'est pourquoi il nous a semblé intéressant d'affiner cette zone à une maille de 1 mm.

Un maillage finale triangulaire quadratique avec une taille globale de 2 mm et une taille locale de 1 mm, composée par 19096 éléments, 38193 noeuds et 114579 degrés de liberté a été utilisée comme dernière maillage. Tous les éléments sont du type STRI56.

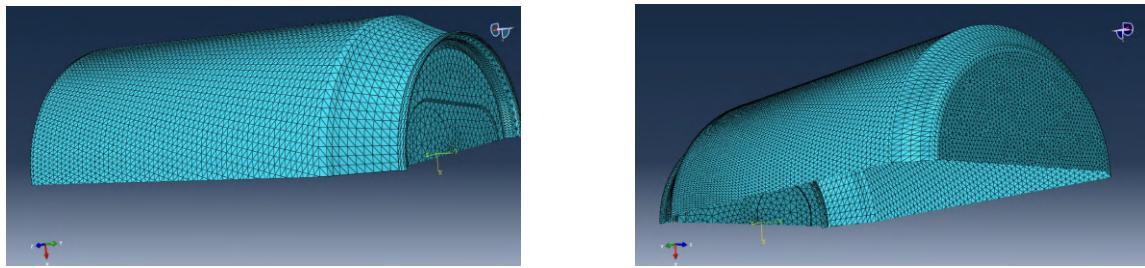


FIGURE 9 – Représentation du maillage numéro 4

5.4.2 Flambage élastique

Le taille globale du maillage optimisé est de 2mm avec un raffinement locale de 0.8mm sur les tous les chanfreins du haut de la canette ainsi que aux endroits particulièrement courbés de la surface latérale. Raffiné les chanfreins permets d'avoir des éléments qui décrivent et suivent mieux la surface.

Le maillage raffiné est entièrement fait par des éléments quadratiques triangulaires, le maillage complet est formé par 102500 noeuds et 51248. Avec ce raffinement on a presque rejoins le maillage global fait par des éléments de 1mm.

Le maillage globale de 2 mm a été choisi parce qu'en essayant de raffiné le maillage globalement c'est le première taille qui diffère du maillage précédent d'environ 1%. Localement, on est descendu jusqu'à un maillage satisfaisant à niveau de nombre d'éléments, d'erreur relative et qui ne prenait une puissance de calcul raisonnable.

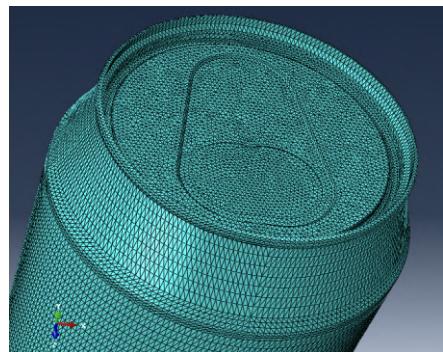
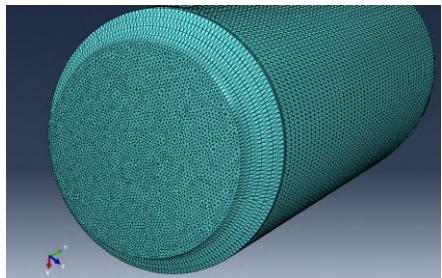


FIGURE 10 – Représentation du maillage optimisé pour le cas de flambage

6 Type de problème/Résolution

6.1 Type de problème résolu

6.1.1 Mécanique statique

Une analyse statique linéaire est réalisée dans notre système. La forme forte du problème peut être définie par :

$$\nabla \sigma = f$$

En utilisant les éléments finis, cette équation différentielle peut être approximée par le système d'équations pour un problème linéaire statique :

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{r}$$

où \mathbf{q} est le champ de déplacements. Pour ensuite trouver la solution approchée \mathbf{u}^h , on peut utiliser l'équation suivante $\forall x \in \delta\Omega_u$:

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \mathbf{H}(\mathbf{x})\mathbf{q} = \hat{\mathbf{u}}$$

La matrice de rigidité \mathbf{K} peut être calculée comme suit :

$$\mathbf{K} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} d\Omega$$

et \mathbf{r} avec la formule suivante :

$$\mathbf{r} = \int_{\Omega} \mathbf{H}^T \mathbf{f} d\Omega + \int_{\delta\Omega_{\sigma}} \mathbf{H}^T \mathbf{t} d(\delta\Omega)$$

La matrice \mathbf{K} , connue comme la matrice de rigidité du système, et le vecteur de force \mathbf{r} , qui incorpore les contributions des tractions de surface et des forces du corps, sont des éléments clés. On peut aussi définir \mathbf{B} comme étant égal à $\nabla \mathbf{H}$. En sélectionnant un ensemble fini de fonctions de base pour construire une approximation faible, nous avons converti le problème d'équation différentielle algébrique en un système d'équations linéaires. Ainsi, tous les termes de \mathbf{K} et \mathbf{r} sont constants, ce qui justifie l'appellation "problème statique linéaire". Puisque le déplacement est une combinaison linéaire de fonctions définies sur Ω , appliquer les conditions limites exactes de déplacement, $\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{u}}$, n'est pas simple, sauf pour un déplacement nul imposé. L'intégration des matrices et du vecteur de force sur un domaine quelconque peut devenir extrêmement complexe, nécessitant ainsi l'utilisation de méthodes d'intégration numérique.

6.1.2 Flambage élastique

En se plaçant dans le cadre linéaire des petites perturbations, nous voulons calculer la force de compression critique qui déclenche une instabilité.

L'état initiale définit la matrice initiale \mathbf{K}^0 , ici nous sommes dans un cas sans pré-chargement. En appliquant une charge λQ on crée des déformations qui vont changer la rigidité apparente du corps, mathématiquement ça se traduit dans une changement de la matrice de rigidité géométrique $\lambda \mathbf{K}^g$. L'instabilité se vérifie lors que la matrice de rigidité totale devient singulière.

C'est une problème au valeurs propres, il faut donc résoudre :

$$(\mathbf{K}^0 + \lambda \mathbf{K}^g) \mathbf{U} = \mathbf{0}$$

Avec λ les valeurs propres et \mathbf{U} les respectives modes propre de flambage. λ peut être interprété comme un multiplicateur de force : cet à dire le facteur pour lequel \mathbf{Q} dont être multiplié pour atteindre la force critique de flambage, donc l'instabilité.

$$\mathbf{F} = \mathbf{P} + \lambda \mathbf{Q}$$

Ici $\mathbf{P} = \mathbf{0}$, puisque il n'y a aucun chargement. La force critique est donc :

$$\mathbf{F} = \lambda \mathbf{Q}$$

La charge critique est très touché par les imperfections géométriques, ainsi il faut prendre en compte un large facteur de sécurité (au moins de 2).

6.2 Options de résolution

En ayant fait la supposition de déplacements statiques dans tous les cas de charge, on a pas de régime transitoire et donc pas d'option de résolution.

6.3 Résultats calculés

Les grandeurs intéressantes pour l'étude sont :

- Pour l'étude statique : contrainte maximale avec le critère de contrainte équivalent de Von Mises et le déplacement maximale
- Pour le flambage élastique : 3 premiers valeurs propre/multiplicateurs de force λ (normalement on est intéressé que au premier mode dans le cas de flambage. Cependant en raison de la grande sensibilité de cette simulation on est intéressé de voir si il y a une proximité entre les modes).

6.4 Non-linéarités

Aucune non linéarité est présente dans cet étude.

Dans le cadre de la simulation par éléments finis d'une canette soumise à une pression interne, nous pouvons considérer le problème comme linéaire pour les raisons suivantes :

1. **Linéarité géométrique** : Les déformations induites par la pression interne sont suffisamment faibles pour ne pas modifier de manière significative la géométrie originale de la canette. Par conséquent, les équations d'équilibre linéaires sont valables.
2. **Comportement linéaire du matériau** : Le matériau de la canette se comporte de manière élastiquement linéaire, selon la loi de Hooke.
3. **Absence de contacts non linéaires** : Il n'y a pas d'interactions de contact pertinentes qui pourraient introduire des complexités non linéaires dans le modèle.
4. **Charges linéaires** : La pression interne appliquée est constante et ne varie pas en fonction du temps ou de la déformation.

Ces facteurs confirment que le problème peut être traité à l'aide d'une formulation linéaire, ce qui simplifie l'analyse et garantit que les résultats obtenus sont précis et fiables dans le régime considéré.

Les trois premières considérations s'appliquent également au flambage. En outre, les problèmes aux valeurs propres sont linéaires. Les modes propres \mathbf{U} ne représentent pas une amplitude réelle; on peut donc pas considérer leur amplitude quantitativement, parce que \mathbf{U} est déterminer à un facteur de multiplication près.

7 Étude de convergence de maillage

7.1 Critère

Le but c'est de trouver le compromis entre coût de calcul et précision des résultats (puisque le coût de calcul pour résoudre le système linéaire est de l'ordre de $\mathcal{O}(N^3)$).

Il est donc indispensable d'étudier la convergence des résultats obtenus afin de garantir que les solutions trouvées, les choix de maillage et de design prises aboutissent à des résultats indépendants de la taille du maillage. Avec une analyse de convergence on veut s'assurer que la solution numérique tend vers la solution exacte. L'objectif d'une analyse de convergence est donc de déterminer si la solution numérique S se rapproche de la solution exacte. Un modèle approximatif est dit convergent si la solution numérique S tend vers la solution exacte \tilde{S} lorsque la taille caractéristique des éléments (h) tend vers 0 et l'ordre p des fonctions de base (p) tend vers l'infini. La convergence est atteinte lorsque la formulation numérique est à la fois stable et consistante.

Pour l'étude de convergence on se sert de une méthode qui utilise le maillage précédent comme référence pour calculer la variation relative comme suit :

S est la solution numérique, h le maillage et VR la variation relative

$$\text{VR}_i = \frac{\|S(h_i) - S(h_{i-1})\|}{\|S(h_{i-1})\|}$$

Le principe de cette méthode è celui de commencer par une maillage grossier et le raffiner de manier significative, à chaque itération la variation relative est calculé et en analysant son évolution on arrive à choisir le meilleur maillage : il est suffisamment fin quand l'erreur relative est en dessous dans seuil prédefini qui dépend des exigences du problème (facteur de sécurité, exigences...).

Cette méthode est supporté par une graphe de convergence qui montre visuellement la convergence, qui assure la qualité du maillage.

Dans cette étude on va comparer et analyser la variation relative du déplacement maximum et la contrainte au sens de Von Mises pour le cas statique et pour le cas de flambage sera analysé la force critique.

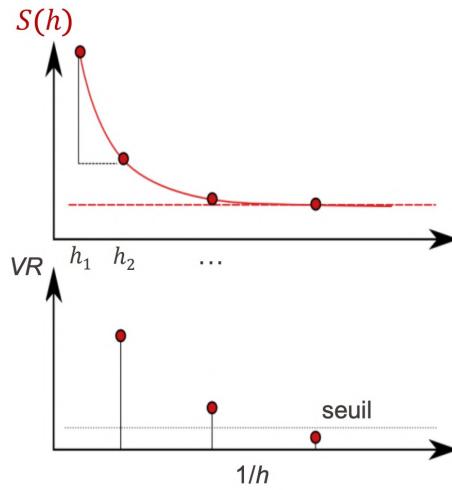


FIGURE 11 – Solution numérique et variation relative

7.2 Présentation des différents maillages

7.2.1 Mécanique statique

Le tableau suivant présente les différentes maillages utilisées pour l'analyse de convergence. On commence par le maillage grossier et on va de plus en plus raffinée, au moyen d'un maillage local, avec le but de trouver le maillage optimisée.

no. Maillage	Taille globale h	Taille locale h_{loc}	no. noeuds
0	3	3	7817
1	2	2	16059
2	2	1.5	22829
3	2	1.25	29589
4	2	1	38193

TABLE 2 – Description des différents maillages

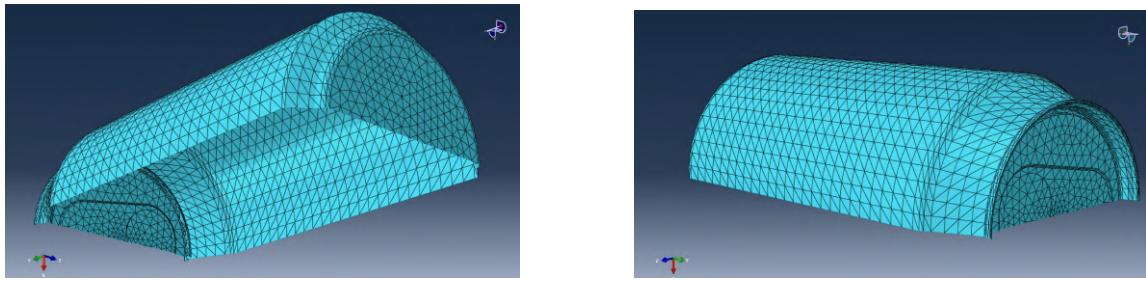


FIGURE 12 – Raprésentation du maillage numéro 0

Voici le maillage utilisé comme point de départ.

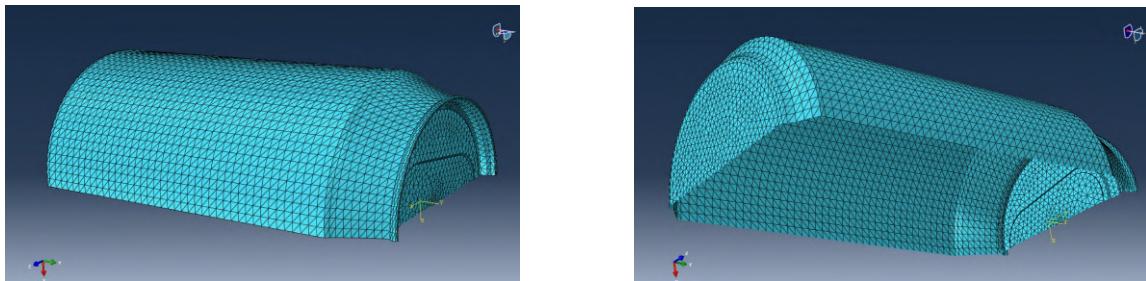


FIGURE 13 – Représentation du maillage numéro 1

La taille globale a été réduite de 3 à 2 mm.

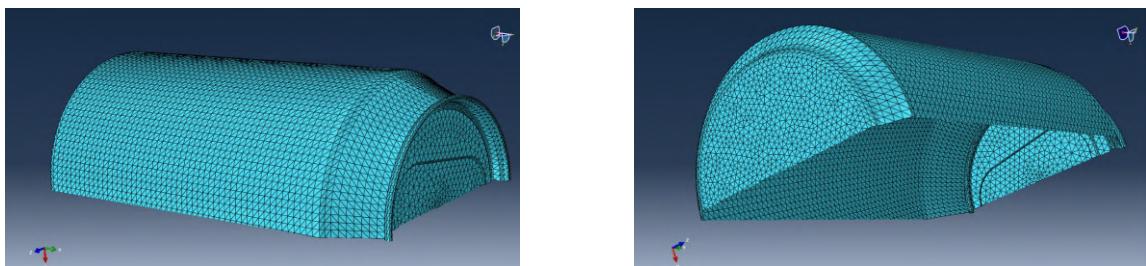


FIGURE 14 – Représentation du maillage numéro 2

Un raffinement local de la taille de la base de 2 à 1,5 mm a été appliqué.

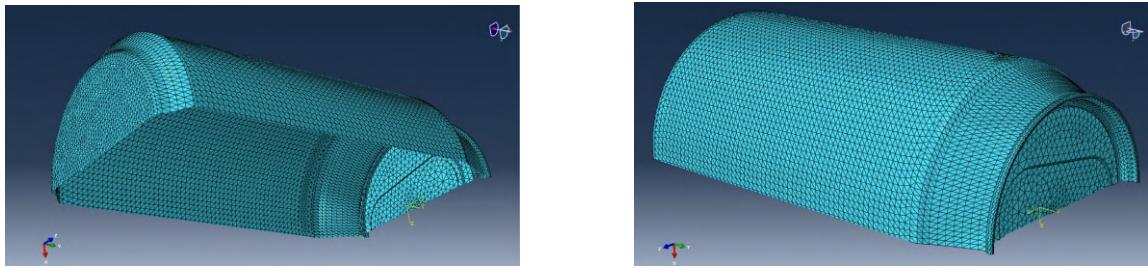


FIGURE 15 – Représentation du maillage numéro 3

Le raffinement de base a atteint 1,25 mm.

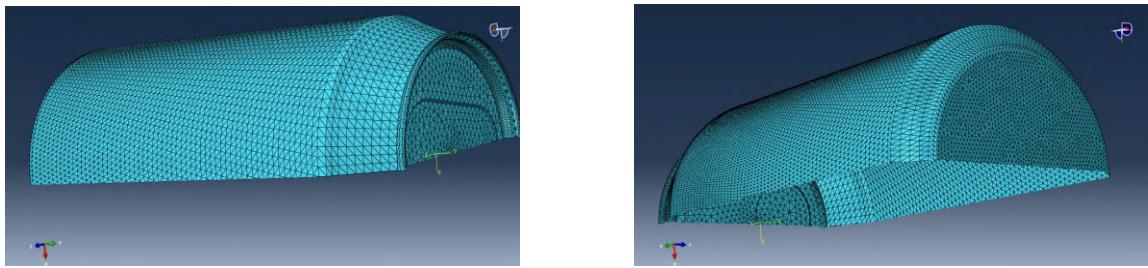


FIGURE 16 – Représentation du maillage numéro 4

Le raffinement de la base a atteint 1 mm.

7.2.2 Flambage élastique

Comme précédemment voici un tableau récapitulatif des différents maillages :

no. Maillage	Taille globale h	Taille locale h_{loc}	no. noeuds
0	3	3	16030
1	2	2	35058
2	2	1.25	51302
3	2	1	67570
4	2	0.8	92652

TABLE 3 – Description des différents maillages

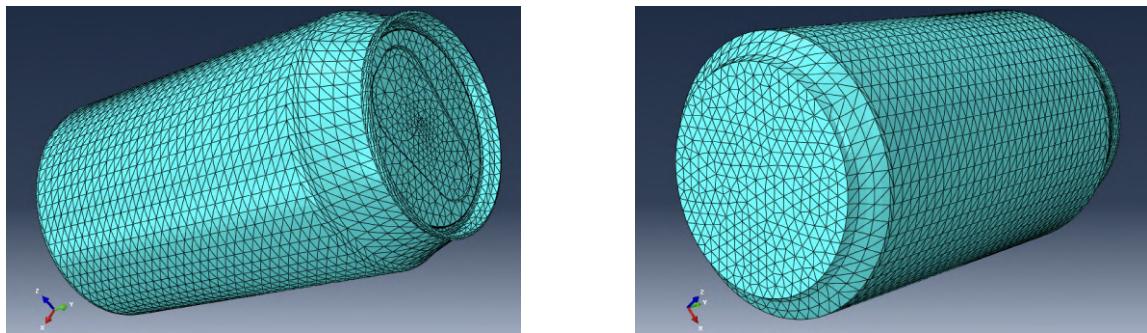


FIGURE 17 – Représentation du maillage 0

Voici le maillage utilisé comme point de départ.

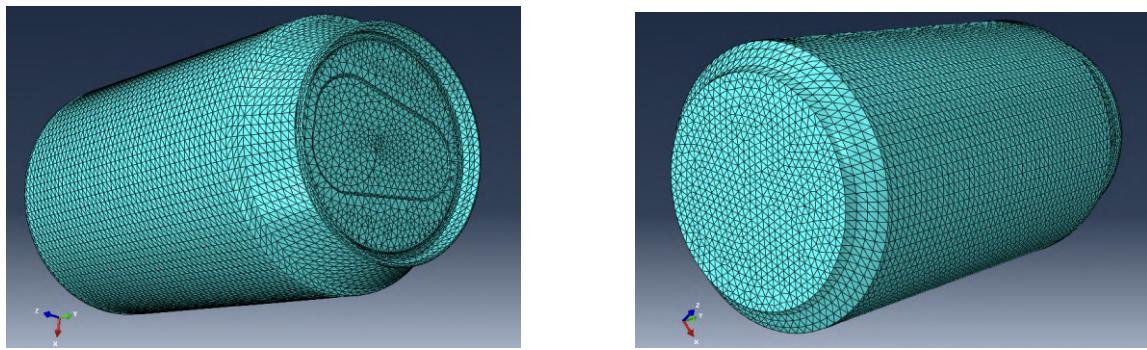


FIGURE 18 – Représentation du maillage 1

La taille globale a été réduite de 3 à 2 mm.

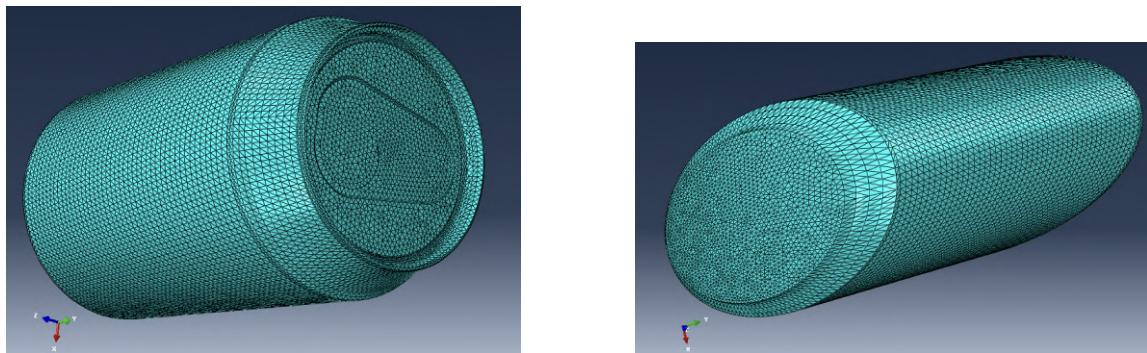


FIGURE 19 – Représentation du maillage 2

Un raffinement local de 1,25 mm a été appliqué.

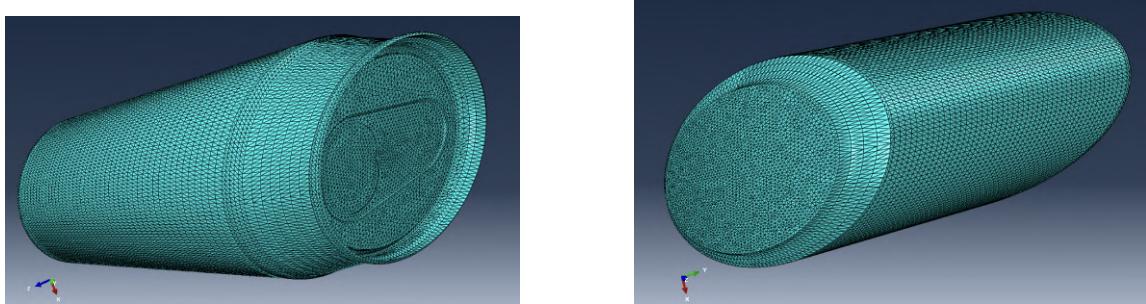


FIGURE 20 – Représentation du maillage 3

Le raffinement a atteint 1 mm.

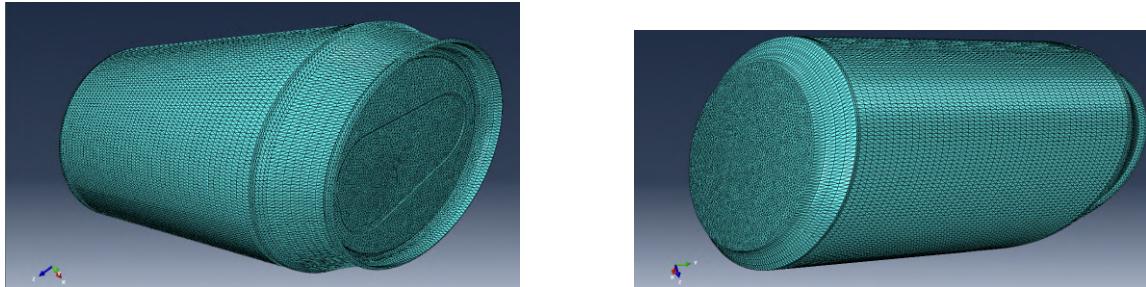


FIGURE 21 – Représentation du maillage 4

Le raffinement a atteint 0.8 mm.

7.3 Résultats du maillage initial

L'objectif de cette étude est de réaliser une approximation rapide des déplacements et des contraintes équivalentes de Von Mises en élasticité linéaire, ainsi que la force critique en flambage. L'algorithme utilise un maillage grossier généré automatiquement. Les éléments sélectionnés sont quadratiques triangulaires, intègres avec intégration exacte.

7.3.1 Mécanique statique

Comme mentionné plus haut, ce maillage comporte 7817 noeuds et 3908 éléments triangulaires. Avec ce premier maillage, nous avons obtenu les résultats suivants :

- Un déplacement maximal de 2.325 mm à la base de la canette.
- Une contrainte de Von Mises maximale de 1783 MPa sur le contour de la base.

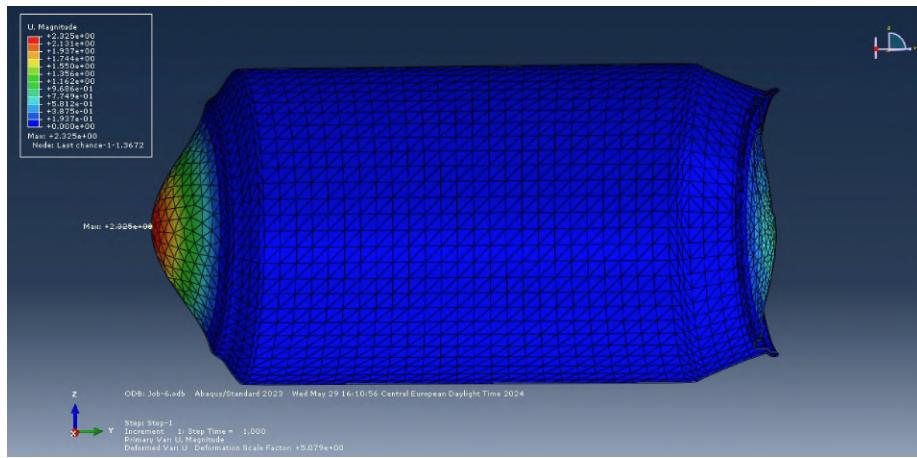


FIGURE 22 – Champ de déplacement maillage grossier

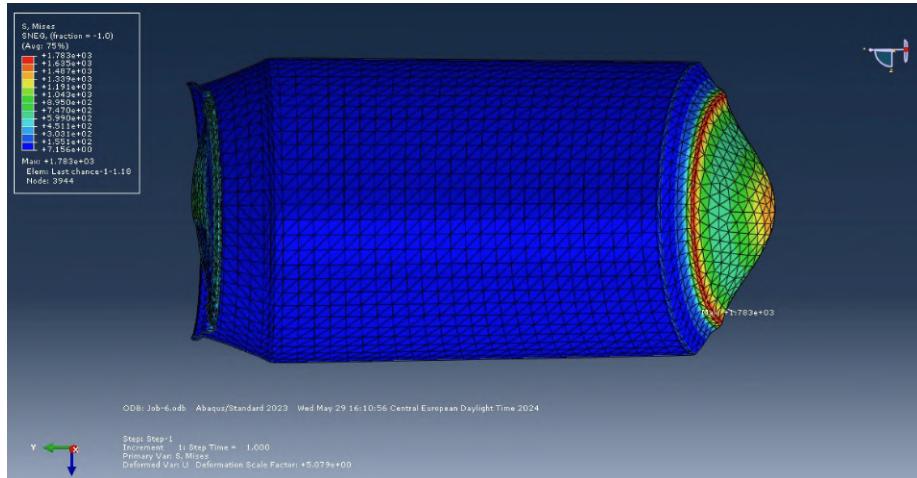


FIGURE 23 – Champ de contrainte équivalente de Von Mises calculée maillage grossier

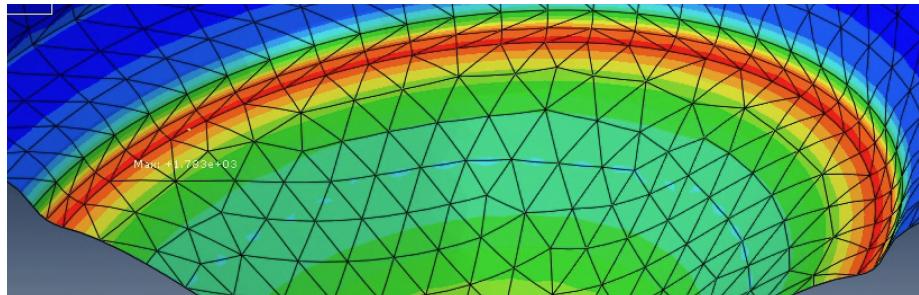


FIGURE 24 – Courbure sur laquelle nous appliquerons un raffinement

On constate une forte variation de contrainte sur le contour de la base. Un raffinement du maillage dans cette zone sera donc nécessaire pour identifier d'éventuels concentrateurs de contraintes. Ce raffinement permettra également d'obtenir des mailles plus petites sur la base, ce qui augmentera la précision à l'endroit où le déplacement est le plus important.

7.3.2 Flambage élastique

Avec le maillage initiale mentionné dans la section 5.3.2, nous avons un maillage quadratique triangulaire de 3mm et 16030 noeuds (intégration exacte). Le but de ce maillage est d'avoir une idée de la première valeur propre et donc de la force critique correspondante, ici le deux sont équivalentes étant donné que on impose une force de 1N (4.1.2 pour une explication plus détaillé).

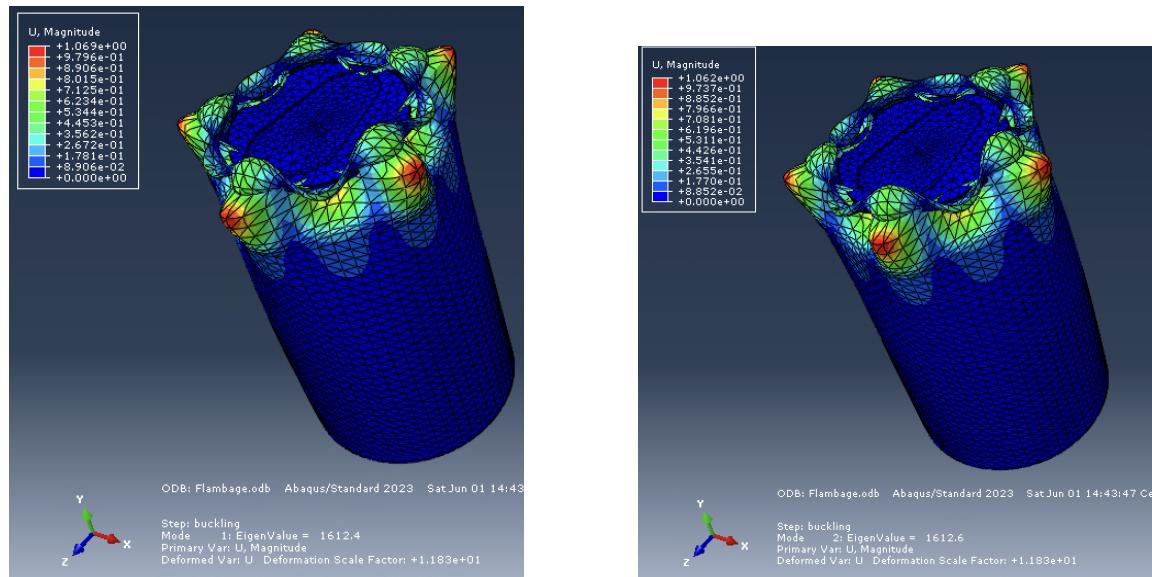


FIGURE 25 – Résultats pour la première et deuxième force critique

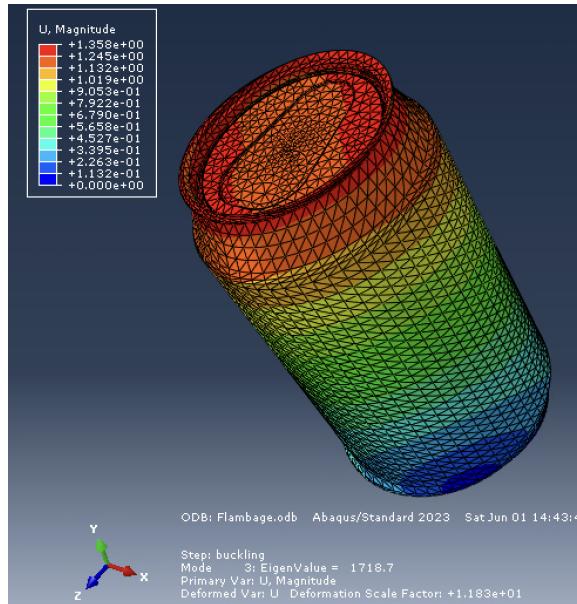


FIGURE 26 – Résultats pour la troisième force critique

Dans le tableau ci-dessous sont résumés les premières trois forces critiques.

	première P_{cr}	deuxième P_{cr}	troisième P_{cr}
[N]	1612.4	1612.6	1718.7

Les résultats montrent un champs de déplacement, toutefois la valeur affiché ne doit pas être prise en compte quantitativement puisque comme expliqué au point 6.4 le déplacement est déterminé à un facteur près. Par ailleurs, la déformation montré dans la figure est qu'une aperçu de ce qui pourrait être la toute première déformation, c'est pour cette raison qu'on voit pas la déformation typique du flambage : un effondrement de la structure.
D'après la figure il faudra raffiner surtout le rebord de la canette.

7.4 Résultats du maillage raffiné

Dans cette partie, nous utilisons le maillage raffiné.

7.4.1 Mécanique statique

En revanche, lors du maillage final, nous obtenons les résultats suivants :

- Un déplacement maximal de 2.321 mm à la base de la canette.
- Une contrainte de Von Mises maximale de 1777 MPa sur le contour de la base.

Un changement du 0.17% pour le déplacement maximal à la base de la canette et du 0.33% pour la contrainte maximale de Von Mises sur le contour de la base.

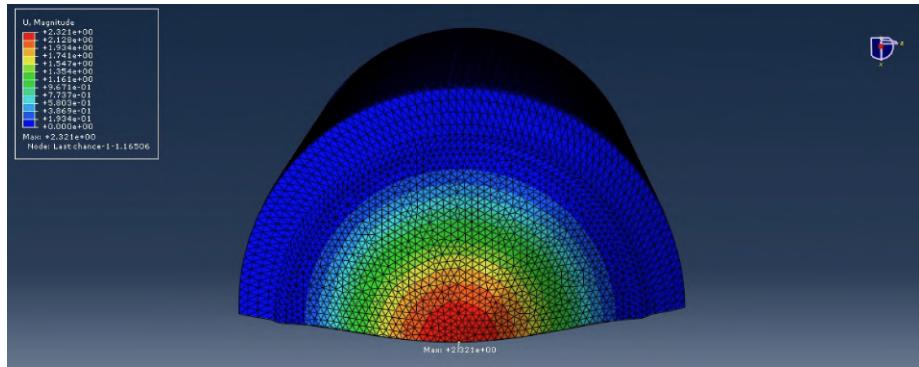


FIGURE 27 – Champ de déplacement maillage fin

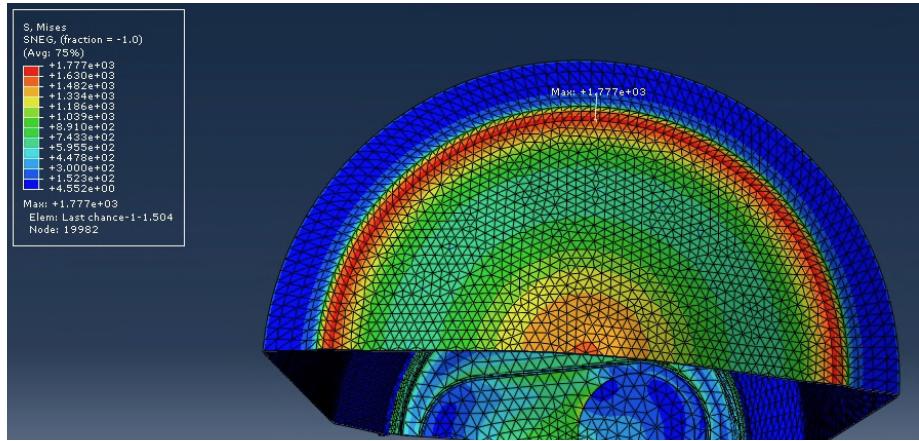


FIGURE 28 – Champ de contrainte équivalente de Von Mises calculée maillage fin

7.4.2 Flambage élastique

Avec un maillage raffiné de taille globale de 2mm et un taille locale de 0.8m, nous obtenons les trois forces critiques résumées dans le tableau ci-dessous.

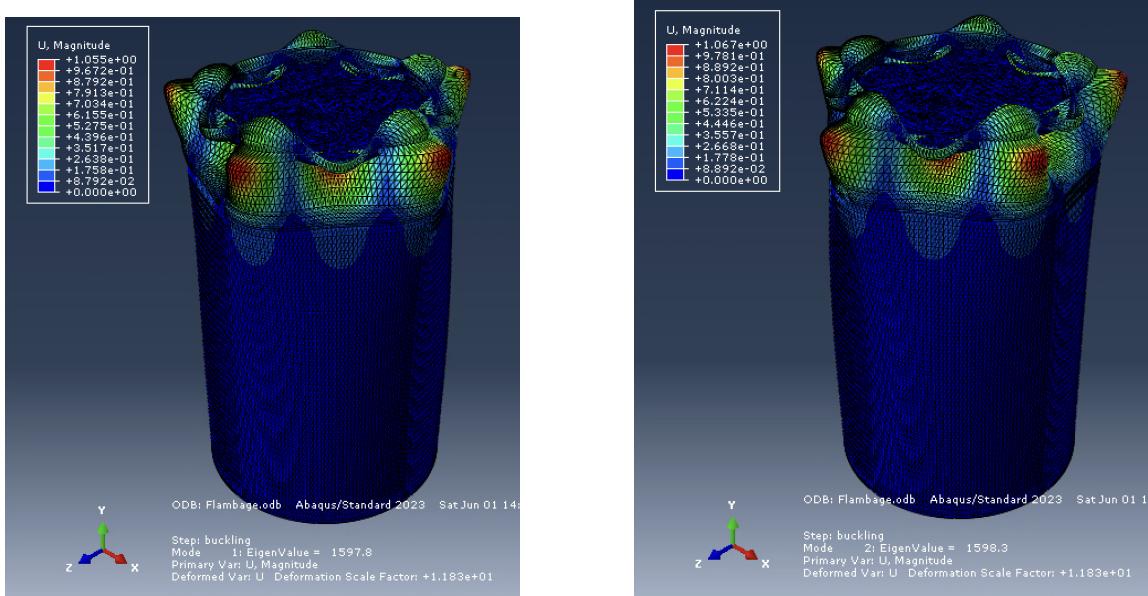


FIGURE 29 – Résultats pour la première et deuxième force critique

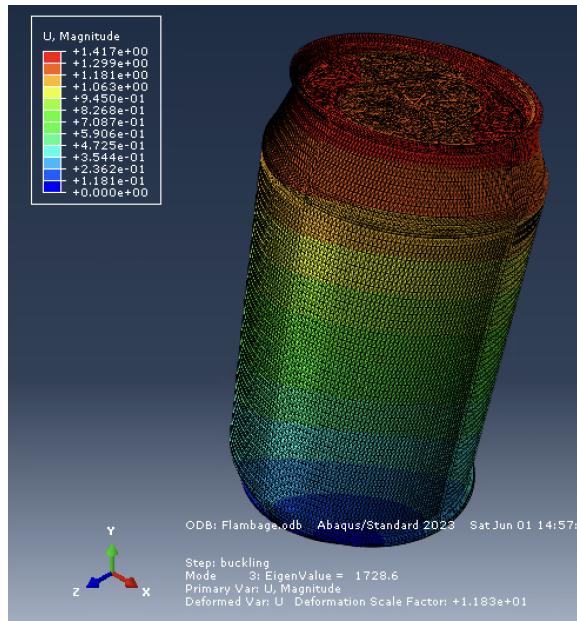


FIGURE 30 – Résultats pour la troisième force critique

	première P_{cr}	deuxième P_{cr}	troisième P_{cr}
[N]	1597.8	1598.3	1728.6

Par rapport au maillage initial il y a eu un changement du 0.9% sur la première force critique.

7.5 Estimation d'erreur relative

7.5.1 Mécanique statique

Le tableau suivant donne un aperçu des données.

Maillage	h	hlocal	# noeuds	#dof	log(#dof^3)	Contrainte max	Ecart relatif incrémental	Depl. Max	Ecart relatif incrémental 2
0	3	3	7817	23451	13.1	1783		2.3250	
1	2	2	16059	48177	14.0	1779	0.22%	2.3230	0.09%
2	2	1.5	22829	68487	14.5	1776	0.04%	2.3220	0.04%
3	2	1.25	29589	88767	14.8	1776	0.00%	2.3220	0.00%
4	2	1	38193	114579	15.2	1777	0.06%	2.3210	0.04%

Ce tableau montre le numéro de maillage, avec des informations sur les dimensions prises en compte, le nombre de nœuds, le nombre de degrés de liberté, la contrainte et le déplacement maximal. En outre, les erreurs incrémentales sont indiquées pour les différentes contraintes et déplacements, ils sont calculés à l'aide des formules suivantes :

$$VR \text{ } contrainte = \frac{|contrainte(i) - contrainte(i - 1)|}{contrainte(i - 1)}$$

$$VR \text{ } deplacement = \frac{|déplacement(i) - déplacement(i - 1)|}{déplacement(i - 1)}$$

Les graphiques ci-dessous montrent la convergence des données :

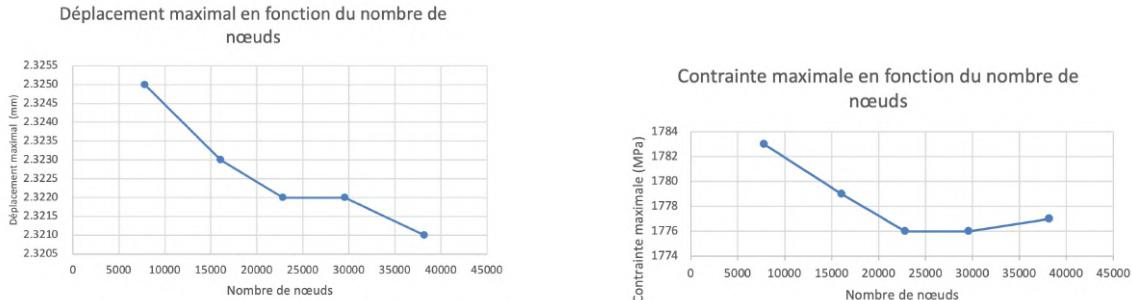


FIGURE 31 – Graph de convergence

7.5.2 Flambage élastique

Maillage	<i>h</i>	<i>h</i> local	# noeuds	#dof	log(#dof^3)	Force critique	Ecart relatif incrémental
0	3	3	16030	48090	14.0	1612.4	
1	2	2	35058	105174	15.1	1595.3	1.06%
2	2	1.25	51302	153906	15.6	1595.2	0.06%
3	2	1	67570	202710	15.9	1597.3	0.13%
4	2	0.8	92562	277686	16.3	1597.8	0.03%

Comme dans la section précédent on retrouve ici le même tableau illustrant les informations sur les maillages utilisés. De plus, la variation relative de la Force critique est calculée comme suit :

$$VR P_{cr} = \frac{|P_{cr}(i) - P_{cr}(i-1)|}{P_{cr}(i-1)}$$

De suite les graphes qui montrent la convergence de l'analyse d'éléments finis.

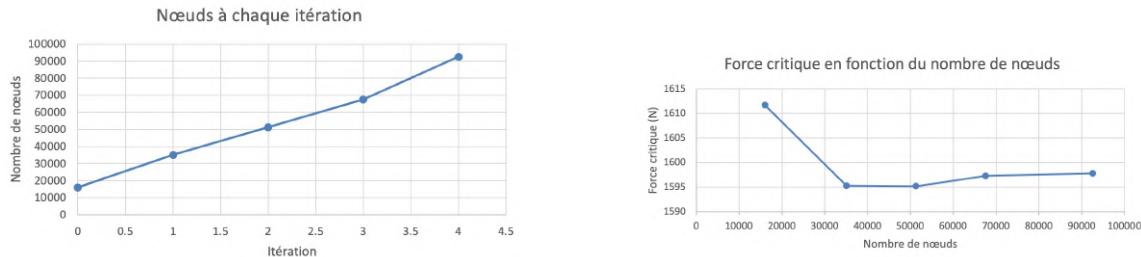


FIGURE 32 – Graph de convergence de la force critique

7.6 Choix du maillage optimal

Après une évaluation minutieuse des différents maillages, nous avons opté pour des éléments quadratiques triangulaires avec une taille globale de 2 mm, un raffinement local de 1.5 mm pour l'analyse statique et un raffinement local de 1.25 mm pour le flambage élastique.

Comme le montrent les graphiques de convergence, les différences entre les valeurs sont très faibles et les données convergent rapidement. Les erreurs relatives sont bien en dessous de 0.5% pour tous les derniers maillages, ce qui est une marge assez précise pour les exigences de notre cas d'étude.

Pourtant, nous estimons qu'il n'est pas nécessaire de raffiner davantage le maillage car cela n'améliore pas les résultats et les coûts de calculs sont plus élevés.

8 Résultats

8.1 Résultat 1

Ces cas de charge a pour but d'étudier le comportement statique de notre canette.

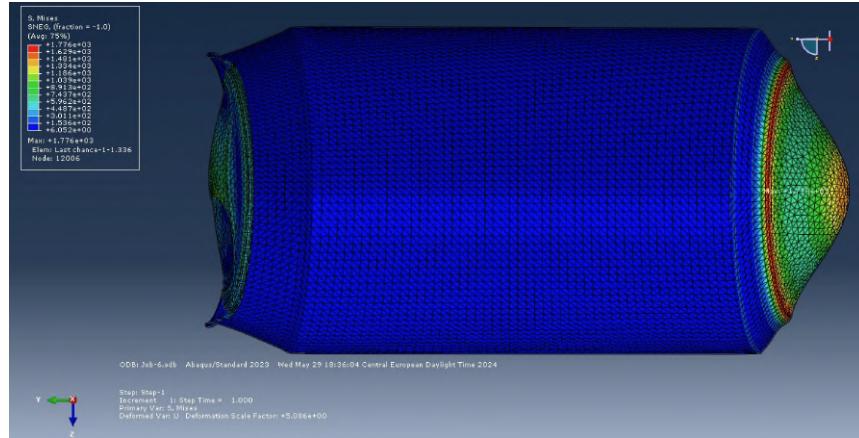


FIGURE 33 – Champ de contrainte équivalente de Von Mises calculée maillage ultime

Sur cette simulation, nous notons que les contraintes se concentrent principalement sur le fond puis sur le bord de la canette, de manière symétrique par rapport à l'axe de symétrie.

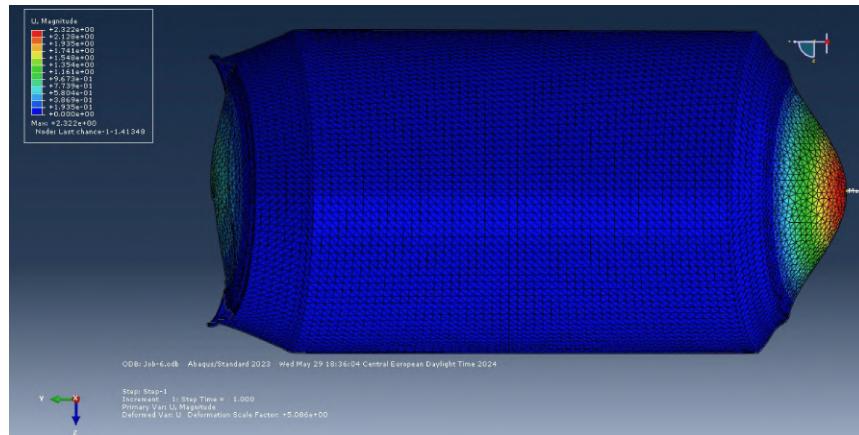


FIGURE 34 – Champ de déplacement maillage ultime

Les déplacements les plus importants se situent sur le fond et sur le couvercle de la canette. La composante principale du déplacement est celle qui suit l'axe z. En revanche, nous notons que le déplacement radial est minime et négligeable.

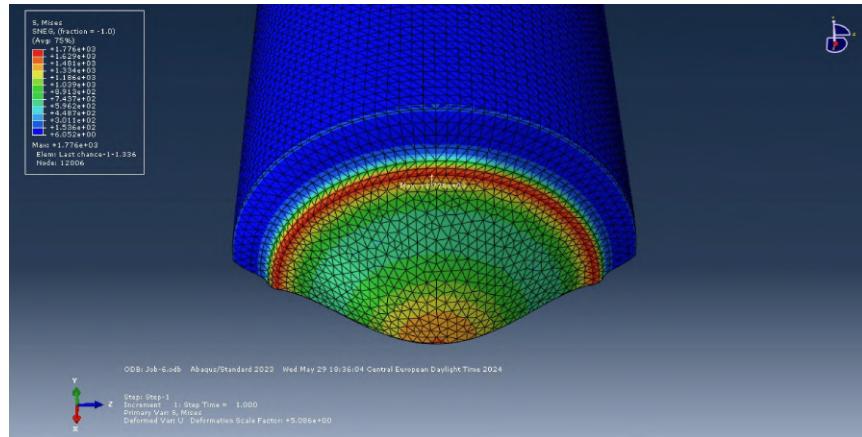


FIGURE 35 – Champ de contrainte équivalente de Von Mises dans la zone d'intérêt calculée maillage ultime

Nous notons que la contrainte maximale se produit là où la condition limite de déplacement nul a été imposée dans les trois directions.

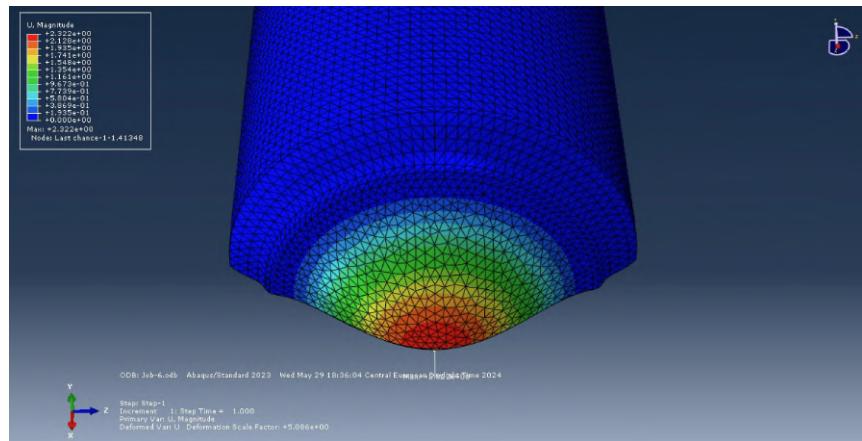


FIGURE 36 – Champ de déplacement dans la zone d'intérêt maillage ultime

Le centre du fond de la boîte est l'endroit où le déplacement est le plus important.

8.2 Résultat 2

L'analyse de flambage a pour but d'établir la charge critique où se produit une instabilité qui provoque l'effondrement de la structure, on veut donc savoir quelle est la force nécessaire pour produire cet évènement. La valeur d'intérêt dans ce cas est le multiplicateur de force qui, ici, est équivalent à la force critique P_{cr} . Le déplacement représenté dans les images n'est que une paramètre déterminé à un facteur multiplicatif près (la valeur exacte est calculé en le multipliant par une

constante) qu'il faut pas analysé quantitativement.

Ce qu'on voit dans l'image ne représente pas le déplacement et l'état final de la canette, mais plutôt le tout premier déplacement qui se produit lors du déclenchement de l'instabilité. En rouge le déplacement maximale et en bleu le minimal.

Un maillage optimal d'éléments quadratiques triangulaires de taille globale 2mm et taille local 1.25mm a été utilisé.

Les résultat du maillage optimal ce résument dans ce tableau ci-dessous.

	première P_{cr}	deuxième P_{cr}	troisième P_{cr}
[N]	1595.2	1596.1	1722.1

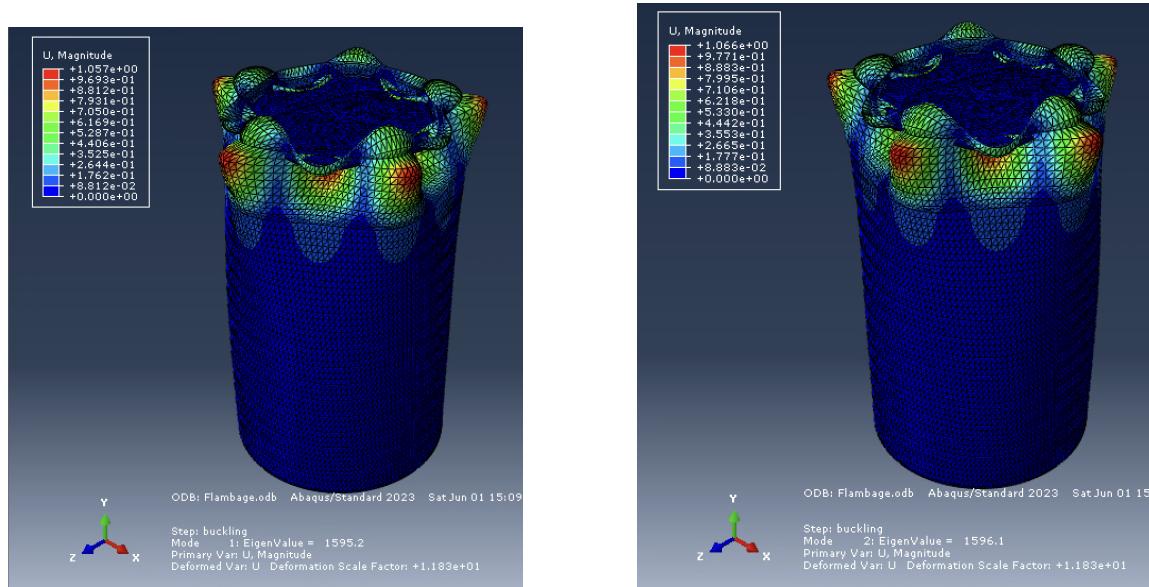


FIGURE 37 – Résultats pour la première et deuxième force critique

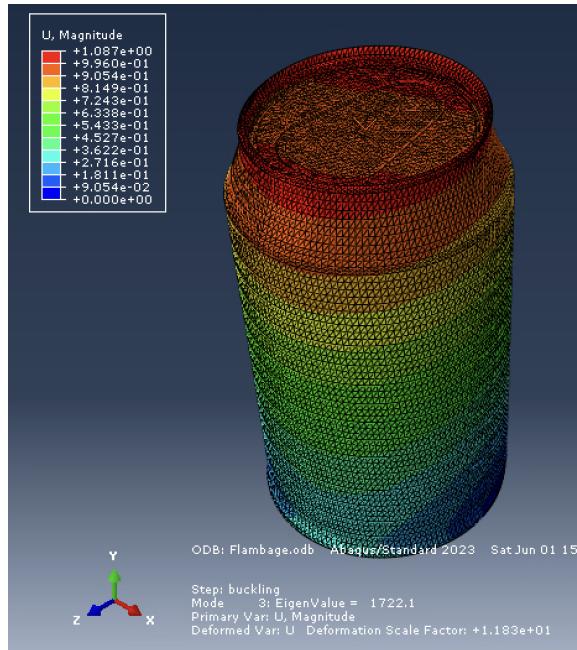


FIGURE 38 – Résultats pour la troisième force critique

Un système de coordonnées cartésiennes a été utilisé, ainsi que une intégration exacte pour chaque élément. Selon la simulation, la canette va s'écraser dans l'axe de la hauteur qui correspondant à l'axe y.

Par rapport au maillage raffiné l'erreur relative est du 0.16% et du 1.06% par rapport au maillage initial

Vu la taille de l'erreur par rapport au maillage raffiné nous considérons inutile de utiliser plus des ressources de calcul pour combler cette différence.

9 Analyse et conclusions

9.1 Résumé des résultats calculés

- Pour le cas statique, la contrainte maximale est de 1,77 GPa et se situe sur fond de la canette, dans ce même endroit on trouve également le déplacement le plus important de 2.32 mm selon l'axe z.
- Dans le cas de flambage, la force critique qui déclenche l'instabilité selon la simulation est de 1595.2 (premier facteur multiplicatif).

9.2 Pertinence/précision des résultats ? Causes d'incertitude majeures ?

9.2.1 Mécanique statique

Dans un premier temps, l'obtention d'un déplacement maximal de 2,32 mm, basé sur l'expérience quotidienne, a semblé être un résultat raisonnable. Cependant, la contrainte plus élevée obtenue dans la canette semblait plutôt exagérée. Nous avons donc essayé d'utiliser les équations de la mécanique des structures pour confirmer ce que la simulation montrait. En utilisant les coordonnées cylindriques, nous pouvons exprimer les contraintes appliquées aux côtés de la canette comme suit :

$$2\sigma_{\theta\theta}(R_e - R_i) = \int_0^{\pi} R_i P_i \cos(\theta) d\theta = 2R_i P_i$$

$$2R\pi(R_i - R_e)\sigma_{zz} = R^2\pi P_i$$

où R_i est le rayon intérieur de la canette, R_e le rayon extérieur, R le rayon moyen et P_i la pression interne résultante. En utilisant $R_e = 0.033m$, $R_i = 0.03278m$, $P_i = 2 \cdot 10^5 Pa$ nous obtenons les résultats suivants : $\sigma_{\theta\theta} = 30 MPa$ et $\sigma_{zz} = 15 MPa$. En utilisant un système de coordonnées cylindriques pour lire les données, nous avons pu confirmer la précision de notre modèle.

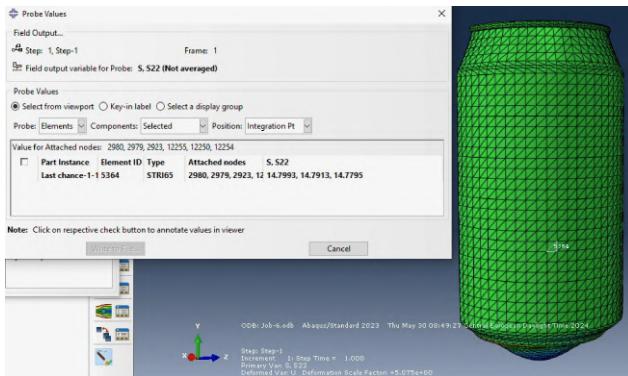


FIGURE 39 – Valeur de σ_{zz} dans l’élément 5364 en MPa

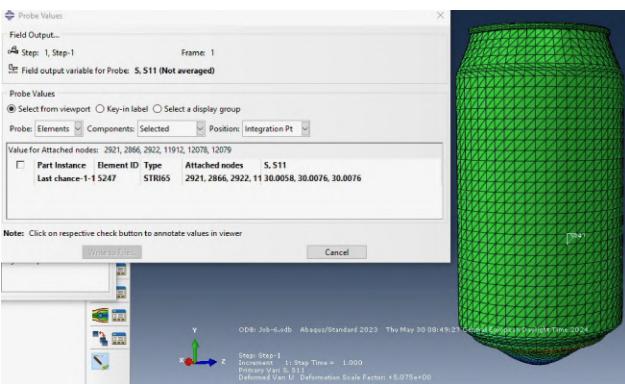


FIGURE 40 – Valeur de $\sigma_{\theta\theta}$ dans l’élément 5247 en MPa

On s’est donc interrogés sur les raisons de ces tensions importantes et, après avoir effectué des recherches, on a découvert qu’une couche supplémentaire peut être ajoutée au fond et au couvercle pour augmenter l’épaisseur de la feuille d’aluminium de 0,22 mm à 0,28 mm.

Après ces constatations, on a refait une simulation avec les nouvelles épaisseurs et nous avons constaté que la contrainte maximale était presque divisée par deux, comme le montre la figure à côté.

De plus, nous avons constaté que le modèle utilisé ne reflétait pas entièrement la réalité, car la géométrie du fond différait légèrement de la réalité. Il faudrait donc refaire une autre étude avec une géométrie modifiée pour voir les différences.

FIGURE 41 – Simulation avec un épaisseur modifié

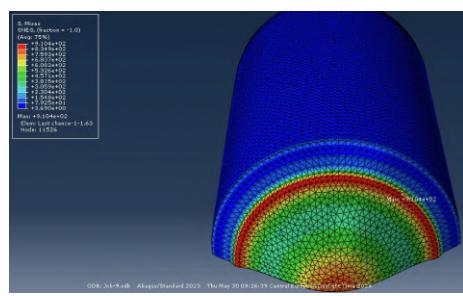




FIGURE 42 – Modèle réel

9.2.2 Flambage élastique

Selon les simulations il faudra un poids d'environ 160Kg (force critique 1595.2N) pour que la canette flambe, ce qui est étonnant par rapport à la réalité : une personne de 80Kg, soit 800N de force, devrait réussir à déclencher l'instabilité. Nous avons pourtant effectuée une expérience afin d'obtenir une estimation grossière de la charge critique.

Nous nous sommes équipés d'une canette (pas de Coca Cola mais avec une géométrie similaire) et on a progressivement ajouter des poids sur le bord supérieur de la canette (là où on pose les lèvres). Par faute de poids supplémentaires on a pu monter précisément jusqu'à 45kg : la canette tenait encore. En mettant 20 Kg et en appuyant légèrement avec le pied le poids critique est atteint. Nous estimons un poids critique d'environ 60-80 équivalent à 600-800N de force.

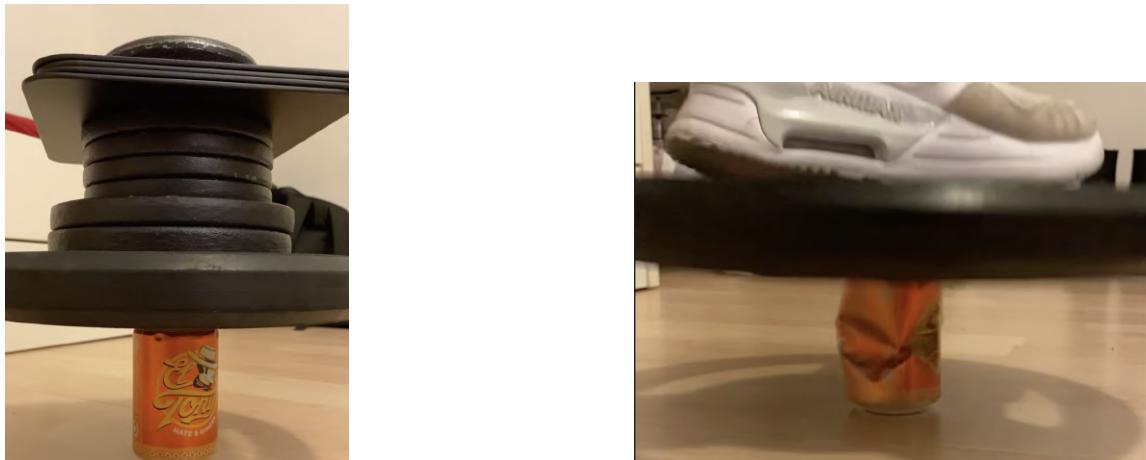


FIGURE 43 – Images de l’expérience

Les résultats de la simulation ne sont donc pas cohérents avec la réalité. Après une remise en question de la simulation et plusieurs essais de différentes conditions de bord, nous avons retenu que la façon de procéder à la simulation était la plus correcte.

Suite à des recherches, nous avons compris que les simulations en flambage sont très sensibles à la géométrie de la pièce et que sûrement la valeur critique d’au moins un facteur 2.

De plus les trois valeurs de force critique sont particulièrement proches entre eux, il est pourtant difficile de savoir quelle sera effectivement la valeur de force critique qui va déclencher l’instabilité. Il est donc difficile d’évaluer exactement les erreurs, aussi parce que la Formule d’Euler pour les poutres n’est pas valable, la formule s’applique généralement aux poutres élancées et il ne semble pas possible de l’exploiter. La pression critique σ_{cr} pour le flambage d’un cylindre mince peut être exprimée comme :

$$\sigma_{cr} = \frac{Et}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{D}{t} \right) \approx 2825.648 \cdot 10^3 MPa$$

$$P_{cr} = \sigma_{cr} \times A = 2825.648 \cdot 10^3 MPa \cdot 55.84 mm^2 \approx 1.58 \cdot 10^8 N$$

Qui n’est pas cohérent avec l’expérience réel, en ce cas le diamètre de la canette est que la moitié de sa longueur : elle peut pas être approximée comme une poutre élancée.

9.3 Critères et analyse

9.3.1 Mécanique statique

Après les modifications d’épaisseur, nous avons obtenu des résultats plus réalistes, la contrainte ne dépassant pas 350MPa sur l’ensemble de la canette à l’exception du fond. Elle ne dépasse donc pas la résistance à la traction d’environ 395MPa du matériaux et le déplacement maximal pris

en compte est de 1,142mm. Cependant, d'après notre analyse, le fond de la canette entre dans le domaine plastique. Une modification de la géométrie ou de l'épaisseur de la canette est donc nécessaire.

9.3.2 Flambage élastique

La simulation surévalue les résultats, il faudra donc en tenir compte pendant les analyse. La vrai force critique de flambage est situé environ à la moitié du résultat trouvé. Pour en être sur il faudra faire des expériences plus précises.

L'instabilité de flambage va se vérifier avec une écrasement par plasticité du matériaux, la résistance à la traction ultime est de 420M MPa donc il est nécessaire une force de environ 23452 N pour casser la canette.

9.4 Conclusion

Avec l'analyse d'élément finis effectué sur la canette nous pouvons maintenant répondre au question qu'on c'est posé dans notre cas de charge.

Dans le cas statique, comme indiqué dans les sections précédentes, les contraintes maximales dépassent la limite élastique du matériau. Il est donc nécessaire de modifier la géométrie du fond de la canette pour une meilleure répartition des forces.

Pour ce qui concerne le cas de flambage, la simulation prédis le flambage à 1595.2 N se qui est bien supérieur à la force qui peu être fait par le poids d'une personne de 80Kg (800N) se qui n'est pas réaliste par rapport aux expériences. Toutefois en considérons un facteur de sécurité de 2 la canette flamberait à 797.6, donc la force faite par le poids d'une personne de 80Kg qui est plus réaliste.

De plus, les forces critiques prévues par la simulation sont vraiment proches, il est donc difficile de prévoir avec certitude lequel déclenchera le flambage en premier, en raison de la grande sensibilité structurelle du phénomène.

9.5 Recommandations

Comme mentionné dans la section 9.3, nous estimons qu'un changement de géométrie du modèle utilisé dans cette étude ou de matériau est nécessaire. Une augmentation de l'épaisseur ou l'utilisation d'un matériau plus résistant à l'usure est requise. Cependant, nous pouvons confirmer que les côtés de la canette maintiennent le matériau sans problème, avec un facteur de sécurité de 1.1.

Une entreprise qui fabrique des canettes pourrait ne pas accorder une grande importance au flambage, étant donné que dans la vie quotidienne, elles ne seront pas soumises aux charges discutées dans ce rapport. Cependant, pendant le transport, les canettes situées au fond sont soumises à des forces de compression, mais en étant attachées, elles supportent (probablement) mieux le poids.

10 Annexes