

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA 1



INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALES

Département : Construction Aéronautique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention d'un diplôme de master en aéronautique

Option : Structure Aéronautique

THEME

Analyse modale et étude des fréquences propres des réservoirs de carburant pour moteur-fusée

Réalisé par :

Mr. Mellouk Islem Hafedh

Dirigé par :

Mr. Abada Omar

Mr. Abdallah Elhirtsi Ahmed



Promotion

2024/2025

Remerciements

الحمد لله أولاً وأخيراً، الشكر لله عز وجل الذي له الفضل الأول علينا، فهو الذي سهل لنا كل خطوة، وأعاننا على الصبر والمثابرة حتى نهاية هذا العمل.

Ainsi, je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude à monsieur Abada Omar, mon encadrant principal, pour son accompagnement exceptionnel tout au long de ce travail. Sa disponibilité, sa patience, sa rigueur scientifique et sa bienveillance m'ont profondément marqué. À chaque étape, il a su me guider avec clarté, m'orienter avec justesse, et surtout, me motiver dans les moments de doute.

Il ne s'est jamais contenté de jouer un rôle formel d'encadrement, mais s'est véritablement investi dans le suivi de ce mémoire, en prenant le temps d'expliquer les concepts les plus complexes, de corriger avec précision chaque détail, et de m'encourager à viser l'excellence. Il a toujours su allier exigence académique et soutien humain, et je lui dois une grande partie de l'évolution que j'ai pu accomplir à travers ce projet.

Je n'oublierai jamais la qualité de ses remarques, la pertinence de ses conseils, ni la passion qu'il transmet à travers sa manière d'encadrer. Grâce à lui, ce travail a pris une direction claire, cohérente et rigoureuse, et c'est avec un profond respect que je lui dis merci. Son impact dépasse largement le cadre de ce mémoire, et je garderai toujours une reconnaissance particulière envers lui pour la confiance qu'il m'a accordée et les valeurs qu'il m'a transmises.

Je remercie également du fond du cœur monsieur Abdellah Elhirtsi Ahmed, mon co-encadrant, pour son rôle déterminant dans la réalisation de ce travail. Il a su m'accompagner avec constance et efficacité, en apportant non seulement un soutien technique de grande qualité, mais aussi une aide morale précieuse.

Toujours à l'écoute, il m'a orienté avec précision dans mes choix méthodologiques et m'a permis de surmonter plusieurs obstacles, en particulier dans la phase de modélisation et de simulation. Ses remarques pertinentes et ses conseils éclairés m'ont aidé à affiner mes idées et à structurer mes résultats de manière claire et rigoureuse.

Son implication, sa gentillesse, et son professionnalisme ont rendu cette expérience de recherche à la fois enrichissante et agréable. Je le remercie sincèrement pour sa disponibilité constante, sa capacité à rendre les choses simples même dans les moments les plus complexes, et pour l'atmosphère de confiance qu'il a su créer tout au long du projet.

Enfin, j'adresse mes remerciements à l'ensemble des membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail. Leur présence et leurs remarques enrichissantes ont apporté une réelle valeur ajoutée à ce mémoire. Je suis très reconnaissant pour le temps qu'ils ont accordé à la lecture, à l'analyse et à la discussion de mon travail.

À toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à l'avancement de ce mémoire, je tiens à dire merci. Ce projet est aussi le fruit de leurs soutiens, de leurs conseils et de leur encouragement constant.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers à mon cœur, ceux qui ont été présents dans les moments de doute, de fatigue et de solitude.

À ceux dont l'amour, le soutien et la bienveillance m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout.

À moi-même, en premier lieu, pour les efforts fournis, la patience endurée, les sacrifices consentis et la persévérance dans les moments les plus difficiles. Merci à moi-même pour ne pas avoir abandonné.

À ma chère mère, la lumière de ma vie, pour son amour inconditionnel, ses prières silencieuses et son soutien indéfectible.

À mon père, mon repère, mon exemple de force et de sagesse, pour sa présence rassurante et ses précieux conseils.

À mon frère, mes grands-parents et ma tante, qui ont été pour moi un véritable pilier dans ce chemin. Leur soutien, leur tendresse et leur amour m'ont donné la force d'avancer. Je vous aime profondément.

À la personne chère à mon cœur, compagne de route et de vie, un soutien moral et une source constante de motivation et d'encouragement. Les noms ne sont pas cités, mais la trace reste gravée dans le cœur, inoubliable.

À mes amis et camarades d'université, pour leur compagnie, leur entraide, les fous rires partagés et le soutien mutuel dans les moments de stress.

À toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, dans la réalisation de ce mémoire que ce soit par une explication, un conseil, une idée ou même une parole bienveillante.

Et enfin, à vous qui prenez la peine de lire ce mémoire, merci infiniment pour votre temps, votre attention et votre intérêt pour ce travail.

Résumé

ملخص:

في هذه الدراسة، تم تحليل نوعين من خزانات وقود الصواريخ: خزان أسطواني وآخر كروي، بالإضافة إلى مقطع جناح يحتوي على خزان مدمج.

، بهدف دراسة تأثير عدة عوامل ANSYS وCOMSOL تم إجراء التحليل الاهتزازي (التحليل المنوال) باستخدام برنامجي مثل الشكل، المادة، والسماكة على الترددات الطبيعية وقد أظهرت النتائج أن بعض العوامل تؤثر بشكل كبير على الترددات، بينما للبعض الآخر تأثير محدود. كما تم تسجيل توافق جيد بين نتائج البرنامجين.

. الكلمات المفتاحية:

التحليل الترددي، الاهتزاز، طريقة العناصر المحددة، صاروخ

Résumé:

Dans cette étude, nous avons analysé deux types de réservoirs de fusée : un réservoir cylindrique, un réservoir sphérique, ainsi qu'un profil d'aile comportant un réservoir intégré.

L'analyse modale a été réalisée à l'aide des logiciels ANSYS et COMSOL, afin d'évaluer l'effet de plusieurs paramètres (forme, matériau, épaisseur, etc.) sur les fréquences propres.

Les résultats ont révélé que certains facteurs influencent fortement les fréquences, tandis que d'autres ont un impact limité. Une bonne concordance a été observée entre les résultats des deux logiciels.

Mots Clés :

Analyse modale , Vibration , Etude par élément fini , Fusée.

Abstract:

In this study, two types of rocket fuel tanks were analyzed: a cylindrical tank, a spherical tank, and a wing profile containing an integrated tank.

Modal analysis was performed using ANSYS and COMSOL to evaluate the impact of various parameters (shape, material, thickness, etc.) on the natural frequencies.

The results showed that some factors have a significant influence on the frequencies, while others have a limited effect. A good agreement was observed between the results from both software tools.

Keywords:

Modal analysis, Vibration, Finite element method, Rocket.

Liste des symboles

| | |
|---------------|--|
| K | La raideur |
| m | La masse |
| f | La fréquence |
| T | Période propre |
| E | Module de young |
| W_n | La pulsation |
| ρ | Masse volumique |
| $u(t)$ | Le vecteur des déplacements nodaux en fonction du temps |
| $\ddot{u}(t)$ | L'accélération nodale |
| ζ | Taux d'amortissement |
| Φ | Vecteur des forme propre |
| ω | Pulsation propre |
| ν | Coefficient de Poisson |
| L | Longueur |
| A | Aire |
| Det | Déterminant |
| e | Épaisseur |
| D | Diamètre |
| Hz | Hertz |
| c | Coefficient d'amortissement visqueux |
| Gpa | Gigapascal |
| σ | contraine |
| s_{11} | Déformation dans la direction 1 due a une contraine σ_1 |
| s_{12} | Déformation dans la direction 1 due a une contraine σ_2 |
| S | Section Transversale |
| I | Moment d'inertie |
| a_n | Coefficient modal |
| ε | Déformation |
| γ | Déformation en Cisaillement |
| τ | Contrainte de cisaillement |
| G | Module de cisaillement |

Sommaire

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Introduction générale | 17 |
| Chapitre 1 : Vibrations mécaniques et analyse modale | 20 |
| 1.1 Introduction..... | 21 |
| 1.2 Vibration..... | 22 |
| 1.2.1 Définition | 22 |
| 1.2.2 Importance de la vibration dans l'ingénierie aérospatiale | 23 |
| 1.2.3 Classification des types de vibration | 23 |
| 1.2.4 Lien avec l'analyse modale | 25 |
| 1.2.5 Principaux indicateurs vibratoires | 25 |
| 1.3 Analyse modale..... | 30 |
| 1.3.1 Définition de l'analyse modale..... | 30 |
| 1.3.2 Objectifs et intérêt de l'analyse modale en ingénierie | 31 |
| 1.3.3 Les méthodes d'analyse modale : expérimentale, numérique et analytique | 32 |
| 1.3.4 Paramètres modaux essentiels | 39 |
| 1.3.5 Conditions aux limites et influence sur les modes propres | 40 |
| 1.4 Conclusion | 41 |
| Chapitre 2 : Étude des Réservoirs dans les Systèmes Aérospatiaux..... | 44 |
| 2.1 Introduction | 45 |
| 2.2 Les types de réservoirs | 46 |
| 2.2.1 Réservoirs cylindriques..... | 46 |
| 2.2.2 Réservoir sphérique | 49 |
| 2.2.3 Réservoirs ellipsoïdaux ou ovoïdes | 52 |
| 2.2.4 Réservoir conique | 53 |
| 2.3 Les matériaux utilisés dans la fabrication des réservoirs | 54 |
| 2.3.1 L'aluminium..... | 55 |
| 2.3.2 L'acier inoxydable | 56 |
| 2.3.3 Les matériaux composites | 57 |
| 2.3 Étude des réservoirs pour avion..... | 59 |
| 2.3.1 Configurations typiques des réservoirs (réservoirs dans les ailes, fuselage, etc.).... | 59 |
| 2.4 Étude des réservoirs pour fusée | 61 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.4.1 | Environnement extrême de fonctionnement | 62 |
| 2.4.2 | Réservoirs pour carburants liquides..... | 62 |
| 2.4.3 | Réservoirs pour carburants solides | 63 |
| 2.5 | Conclusion | 64 |
| Chapitre 3 : Etude Théorique | | 66 |
| 3.1 | Introduction..... | 67 |
| 3.2 | Méthodes de calcul des modes propres et des fréquences naturelles..... | 68 |
| 3.2.1 | Théorie de base de l'analyse modale | 68 |
| 3.2. | Résolution du problème propre (problème aux valeurs propres)..... | 68 |
| 3.2.3 | Construction des matrices de masse et de rigidité | 69 |
| 3.2.4 | Méthodes numériques de résolution | 70 |
| 3.2.5 | Importance des conditions aux limites..... | 70 |
| 3.2.6 | Influence des paramètres physiques | 70 |
| 3.3 | Exemple numérique : Cas d'un réservoir cylindrique de fusée en aluminium..... | 70 |
| 3.4 | Exemple numérique : étude d'un profil d'aile (envergure = 10000 mm, corde = 2000 mm) | 73 |
| 3.5 | Conclusion | 75 |
| Chapitre 4 : Simulation numérique et outils logiciels | | 76 |
| 4.1 | Introduction..... | 77 |
| 4.2 | Logiciels utilisés | 78 |
| 4.2.1 | SolidWorks : Conception et modélisation géométrique | 78 |
| 4.2.2 | ANSYS Workbench..... | 79 |
| 4.2.3 | COMSOL Multiphysics | 81 |
| 4.3 | Les Étapes de la simulation | 82 |
| 4.3.2 | Simulation avec ANSYS..... | 84 |
| 4.3.3 | Simulation avec COMSOL | 90 |
| 4.4 | Conclusion | 94 |
| Chapitre 5 : Résultats et commentaires | | 95 |
| 5.1 | Introduction..... | 96 |
| 5.2 | Cas d'un réservoir de carburant cylindrique..... | 96 |
| 5.2.1 | Influence du matériau sur le comportement modal du réservoir cylindrique | 97 |
| 5.2.2 | Effet de la Masse | 102 |
| 5.2.3 | Effet de l'épaisseur | 105 |
| 5.2.4 | Effet des taux de remplissage sur les fréquences naturelles | 106 |

| | |
|--|------------|
| 5.3 Analyse modale du réservoir sphérique de carburant | 107 |
| 5.3.1 Influence du matériau sur le comportement modal du réservoir sphérique | 108 |
| 5.3.3 Effet de l'épaisseur | 113 |
| 5.3.4 Effet des taux de remplissage sur les fréquences naturelles | 114 |
| 5.4 Analyse modale du profil d'aile..... | 115 |
| 5.4.1 Influence du matériau sur le comportement modal de profil d'aile | 116 |
| 5.4.2 Effet de la Température de l'altitude | 121 |
| 5.4.3 Effet de la Masse | 122 |
| 5.4.4 Effet de l'épaisseur | 123 |
| 5.4.5 Effet des taux de remplissage sur les fréquences naturelles | 125 |
| 5.4.6 Effet de l'angle dièdre sur les fréquences naturelles | 126 |
| 5.4.7 Effet de la répartition du remplissage des réservoirs dans l'aile | 130 |
| 5.4.8 Effet de l'inversion de la répartition du remplissage | 131 |
| 5.4.9 Influence du profil NACA sur les fréquences propres | 132 |
| 5.5 Conclusion | 133 |
| Conclusion générale..... | 136 |
| Bibliographie | 139 |

Liste des Figures

| | |
|---|-------------------------------------|
| Figure 1.1 Schéma simplifié d'un système vibratoire masse-ressort-amortisseur | 22 |
| Figure 1.2 Exemple d'un signal de vibration périodique | 24 |
| Figure 1.3 Exemple d'un signal de vibration aléatoire..... | 24 |
| Figure 1.4 Représentation schématique d'une vibration libre d'un système | 26 |
| Figure 1.6 Effet de la variation du rapport d'amortissement sur un système du second ordre | 28 |
| Figure 1.7 Conversion de l'accélération en vitesse, déplacement par intégrations | 28 |
| Figure 1.8 Phénomène de résonance dans un système vibratoire | 29 |
| Figure 1.9 Période propre d'un système oscillant | 30 |
| Figure 1.10 Type d'équipement utilisé pour l'analyse modale expérimentale | 35 |
| Figure 1.11 Essai d'analyse modale..... | 35 |
| Figure 1.12 Exemple aléatoire d'une analyse modale numérique | 37 |
| Figure 1.13 Exemples de formes modales analytiques pour des structures simples | 39 |
| Figure 2.1 Réservoir externe de la navette spatiale américaine | 48 |
| Figure 2.2 Schéma d'un réservoir externe..... | 48 |
| Figure 2.3 Un réservoir cylindrique d'avion | 49 |
| Figure 2.4 Un grand réservoir de stockage pour l'hydrogène liquide comme carburant de fusée de lancement au 39B au Centre spatial Kennedy | Error! Bookmark not defined. |
| Figure 2.5 un réservoir cryogénique sphérique entièrement composite sans doublure..... | 51 |
| Figure 2.6 Réservoir elliptique en acier inoxydable de 5000 litres pour aviation | 53 |
| Figure 2.7 Réservoir conique imprimé 3D en test | 54 |
| Figure 2.8 Réservoir cryogénique multiple en carbone pour applications hydrogène aéronautique | 58 |
| Figure 2.9 Réservoirs de déchets en matériaux composites avancés pour Boeing. | 58 |
| Figure 2.10 Réservoir spatial en composite | 59 |
| Figure 2.11 Réservoir d'aile Boeing 737-800..... | 60 |
| Figure 2.12 Réservoir de fuselage | 60 |
| Figure 2.13 Réservoirs De Carburant Externes à L'aile Du Jet Militaire | 61 |

| | |
|--|-----|
| Figure 2.14 Réservoir cryogénique d'hydrogène | 63 |
| Figure 2.15 Schéma pédagogique d'un moteur à ergol solide | 64 |
| Figure 3.1 Réservoir cylindrique..... | 71 |
| Figure 3.2 Profil d'aile | 73 |
| Figure 4.1 Espace de travail vide dans SolidWorks au lancement du projet | 78 |
| Figure 4.2 Espace de travail vide dans ANSYS au lancement du projet..... | 79 |
| Figure 4.3 Espace de travail vide dans COMSOL au lancement du projet | 81 |
| Figure 4.4 Esquisse initiale du réservoir sur SolidWorks (avant révolution) | 82 |
| Figure 4.5 Vue du réservoir généré par révolution du profil sur SolidWorks | 82 |
| Figure 4.6 Schéma de projet ANSYS | 83 |
| Figure 4.7 Données matériaux ANSYS | 84 |
| Figure 4.8 La génération du maillage | 84 |
| Figure 4.9 Définition de la température appliquée sur le réservoir..... | 85 |
| Figure 4.10 La résolution de l'analyse thermique stationnaire | 85 |
| Figure 4.11 Application du support fixe sur le réservoir | 86 |
| Figure 4.12 Insertion de la température du corps importé dans l'analyse structurelle..... | 87 |
| Figure 4.13 La résolution de l'analyse structurelle | 87 |
| Figure 4.14 Analyse modale | 88 |
| Figure 4.15 Cas de remplissage | 88 |
| Figure 4.16 Schéma de projet COMSOL | 89 |
| Figure 4.17 Ajouter le matériau sur COMSOL | 90 |
| Figure 4.18 Fixer les extrémités du réservoir sur COMSOL | 90 |
| Figure 4.19 Ajouter la température dans COMSOL | 91 |
| Figure 4.20 Couplage thermique-mécanique | 91 |
| Figure 4.21 Maillage dans COMSOL | 92 |
| Figure 4.22 Calcul Fréquence propre dans COMSOL | 92 |
| Figure 5.1 Réservoir de carburant cylindrique | 96 |
| Figure 5.2 Influence du matériau | 101 |
| Figure 5.3 Effet de la température du carburant | 102 |
| Figure 5.4 Influence de l'épaisseur sur les fréquences naturelles du réservoir cylindrique .. | 103 |
| Figure 5.5 Influence du taux de remplissage sur les fréquences naturelles du réservoir cylindrique | 106 |
| Figure 5.6 Le réservoir de carburant sphérique | 107 |
| Figure 5.7 Influence du matériau sur le comportement modal du réservoir Sphérique | 111 |

| | |
|--|-------------------------------------|
| Figure 5.8 Effet de la Température (carburant) | 112 |
| Figure 5.9 Influence de l'épaisseur de la paroi sur les fréquences naturelles du réservoir sphérique | 113 |
| Figure 5.10 Influence du taux de remplissage sur les fréquences naturelles du réservoir sphérique | 114 |
| Figure 5.11 Le profil d'aile | 115 |
| Figure 5.12 Influence du matériau sur le comportement modal de profil d'aile | 120 |
| Figure 5.13 Effet de la Température de l'altitude | 121 |
| Figure 5.14 Effet de la Température (carburant) | 122 |
| Figure 5.15 Influence de l'épaisseur sur les fréquences naturelles du profil d'aile | 123 |
| Figure 5.16 Influence de l'épaisseur sur les fréquences naturelles du profil d'aile 5000 mm | 124 |
| Figure 5.17 Influence du taux de remplissage sur les fréquences naturelles du profil d'aile | 125 |
| Figure 5.18 Angle dièdre 10° | 126 |
| Figure 5.19 influence Influence de l'angle dièdre positif sur les fréquences naturelles | 127 |
| Figure 5.20 Influence de l'angle dièdre négatif sur les fréquences naturelles | 128 |
| Figure 5.21 Effet de la répartition du remplissage | Error! Bookmark not defined. |
| Figure 5.22 Effet de l'inversion de la répartition du remplissage | Error! Bookmark not defined. |
| Figure 5.23 Influence du profil NACA | 131 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|-------------------------------------|
| Tableau 3.1 Fréquences naturelles calculées – Six premiers modes | 74 |
| Tableau 5.1 Convergence du maillage | 96 |
| Tableau 5.2 : Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du réservoir de carburant cylindrique | 99 |
| Tableau 5.3 Comparaison des fréquences naturelles des six premiers modes via ANSYS et COMSOL matériau acier inoxydable | 99 |
| Tableau 5.4 Couche et orientation | 100 |
| Tableau 5.5 : Comparaison des fréquences naturelles des six premiers modes à 20°C via ANSYS et COMSOL..... | Error! Bookmark not defined. |
| Tableau 5.6 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du l'oxygène liquide à 20°C | Error! Bookmark not defined. |
| Tableau 5.7 : Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du gaz cryogénique (-253 °C). | 102 |
| Tableau 5.8 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du réservoir sphérique de carburant | Error! Bookmark not defined. |
| Tableau 5.9 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du matériau Acier inoxydable | Error! Bookmark not defined. |
| Tableau 5.10 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du Époxy Carbone Tissé | 110 |
| Tableau 5.11 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du profil d'aile matériau Alliage d'aluminium | 118 |
| Tableau 5.12 Comparaison des fréquences naturelles des six premiers modes via ANSYS et COMSOL Matériau Acier inoxydable | 119 |
| Tableau 5.13 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du Époxy Carbone Tissé..... | 119 |

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'évolution constante des technologies spatiales, portée par l'ambition de conquérir de nouvelles frontières au-delà de la Terre, a entraîné une transformation profonde des exigences imposées aux systèmes de propulsion et à leurs composants. Que ce soit dans les missions d'exploration planétaire, les lancements de satellites ou les vols habités, la fiabilité des lanceurs repose en grande partie sur la performance des composants structuraux qu'ils embarquent. Parmi ces composants, les réservoirs de carburant liquide occupent une place stratégique, car ils assurent le stockage sécurisé et l'alimentation continue des moteurs en carburant à haute énergie.

Dans les lanceurs modernes, ces réservoirs ne sont pas de simples contenants : ils doivent résister à des contraintes extrêmes tout en conservant une masse minimale. Pendant les phases critiques du lancement, ils subissent de fortes accélérations, des variations de pression, des charges mécaniques importantes, et surtout des sollicitations dynamiques vibratoires complexes. Ces vibrations, souvent imprévisibles et multidirectionnelles, peuvent provenir de sources internes comme le fonctionnement du moteur ou de sources externes telles que les turbulences aérodynamiques ou les interactions aéroserveoélastiques.

Dans ce contexte, la compréhension du comportement vibratoire des réservoirs devient une priorité stratégique. Une structure qui entre en vibration à une fréquence correspondant à l'une de ses fréquences propres peut subir un phénomène de résonance, provoquant une amplification rapide des amplitudes de déplacement, ce qui peut endommager les soudures, déformer les parois, ou provoquer des fissures. Ces risques sont amplifiés par la présence de carburants liquides, qui peuvent eux-mêmes interagir dynamiquement avec les parois internes, générant des effets dits de slosh (mouvement du liquide) et créant un couplage fluide-structure difficile à modéliser. L'analyse modale s'impose donc comme un outil fondamental pour évaluer la réponse dynamique des réservoirs et détecter les modes de vibration susceptibles d'être excités en service. Cette analyse permet d'identifier les fréquences naturelles de vibration d'une structure ainsi que les formes modales associées. Ces caractéristiques sont propres à chaque configuration géométrique, matériau et condition aux limites, et elles constituent un point de départ essentiel pour toute étude de stabilité ou de résistance dynamique.

Introduction générale

L'importance de cette approche ne se limite pas à la prédiction des phénomènes vibratoires. En effet, l'analyse modale permet aussi de guider la conception structurelle, en fournissant des indications précises sur les zones sensibles, les rigidités locales à renforcer, ou les modifications géométriques à envisager pour éviter les fréquences critiques. Elle contribue également à la validation des prototypes, à la calibration des essais expérimentaux, et à l'amélioration des performances globales du système propulsif.

Grâce à l'évolution des outils de simulation numérique, en particulier les logiciels basés sur la méthode des éléments finis (FEM), il est désormais possible de réaliser des analyses modales complexes sur des structures réelles, en tenant compte de la géométrie détaillée, des matériaux composites, des effets de contact, et même des interactions thermomécaniques et fluides-structures. Cette capacité de modélisation numérique ouvre la voie à une ingénierie prédictive, capable d'anticiper les comportements critiques avant même la fabrication des prototypes.

Par ailleurs, cette approche s'intègre pleinement dans une démarche de conception multicritère, où l'ingénieur doit jongler entre plusieurs objectifs souvent contradictoires : réduire la masse sans sacrifier la rigidité, garantir la sécurité sans surdimensionner inutilement, et respecter les contraintes budgétaires et calendaires du projet. L'analyse modale devient alors un outil d'aide à la décision, aussi bien dans la phase de conception que dans les phases de test, de validation ou d'optimisation. Il est également important de souligner que la maîtrise des phénomènes vibratoires ne concerne pas uniquement les structures métalliques, mais aussi les structures composites, de plus en plus utilisées dans le spatial en raison de leur légèreté et de leur résistance spécifique élevée. Ces matériaux introduisent cependant de nouvelles complexités : anisotropie, couplage entre directions, modes de rupture particuliers... autant d'éléments qui renforcent la nécessité d'une analyse modale rigoureuse.

En résumé, l'étude du comportement vibratoire des réservoirs de carburant s'inscrit au cœur des problématiques modernes de la conception spatiale. Elle permet d'assurer une meilleure fiabilité structurelle, de réduire les risques de défaillance, d'optimiser les performances dynamiques, et d'intégrer de manière intelligente les exigences vibratoires dans les cycles de développement. L'analyse modale, par son approche systématique et ses outils puissants, représente ainsi un pilier incontournable dans l'architecture des lanceurs de nouvelle génération.

Introduction générale

Le présent mémoire vise à étudier en détail le comportement vibratoire des réservoirs de carburant destinés aux systèmes de propulsion spatiale. L'objectif principal est de déterminer les fréquences naturelles et d'analyser les modes propres associés à différentes configurations géométriques, matériaux et conditions limites. Plusieurs cas d'étude variés et complémentaires ont été explorés, allant au-delà des simples variations de matériaux ou de formes, afin de couvrir un large spectre de scénarios représentatifs des environnements réels. Cette approche approfondie, combinée à des outils de simulation numérique avancés, permet de modéliser avec précision les phénomènes vibratoires et de contribuer ainsi à la conception de réservoirs plus fiables, plus sûrs et mieux adaptés aux exigences extrêmes du domaine spatial.

Afin de structurer cette étude de manière logique et progressive, ce mémoire est organisé en plusieurs chapitres complémentaires. Le premier chapitre est consacré aux principes fondamentaux des vibrations mécaniques et à la notion de modes propres, permettant de poser les bases théoriques nécessaires à la compréhension du comportement dynamique des structures.

Le deuxième chapitre présente une analyse des différents types de réservoirs de carburant utilisés dans les systèmes spatiaux, en justifiant les choix géométriques retenus dans cette étude à travers des considérations techniques, fonctionnelles et structurelles.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation mathématique, où sont développées les équations fondamentales régissant les vibrations libres, ainsi que l'approche utilisée pour formuler le problème modale. Ce cadre mathématique constitue une étape clé pour la mise en œuvre des simulations numériques. Le quatrième chapitre, quant à lui, s'attarde sur la partie simulation, en décrivant les outils logiciels utilisés – notamment les environnements FEM – et en expliquant la méthodologie adoptée pour la modélisation et la résolution numérique du problème.

Le cinquième chapitre est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus, avec une attention particulière portée à l'influence des différents paramètres étudiés sur les fréquences naturelles et les modes propres des réservoirs. Enfin, le travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les principaux enseignements de l'étude, met en évidence les contributions apportées, et propose des perspectives pour des recherches futures dans ce domaine stratégique.

Chapitre 1

Vibrations mécaniques et analyse modale

1.1 Introduction

Les phénomènes vibratoires occupent une place centrale dans l'étude du comportement dynamique des structures mécaniques. Qu'il s'agisse d'une poutre, d'un réservoir, d'une aile d'avion ou d'un composant microscopique, toute structure matérielle est susceptible de vibrer lorsqu'elle est soumise à une excitation extérieure ou lorsqu'elle est perturbée de son état d'équilibre. Ces vibrations, bien qu'inévitables dans la plupart des systèmes réels, peuvent avoir des effets significatifs sur la performance, la fiabilité et la sécurité des structures.

Une mauvaise prise en compte des vibrations peut mener à des phénomènes destructeurs tels que la résonance, l'usure prématurée, ou même la rupture d'éléments critiques. Ainsi, la compréhension du comportement vibratoire est un préalable incontournable à toute démarche de conception, d'optimisation ou de validation dans le domaine de l'ingénierie mécanique.

Dans ce contexte, l'analyse modale s'impose comme une approche fondamentale permettant de caractériser le comportement dynamique d'une structure. Elle repose sur l'identification des modes propres (ou formes modales) et de leurs fréquences naturelles associées. Ces modes sont des états particuliers de vibration dans lesquels la structure oscille sans déformation de forme relative, et ils sont intrinsèquement liés à la géométrie, aux propriétés mécaniques (rigidité, masse) et aux conditions aux limites du système.

Ce premier chapitre vise donc à poser les fondements théoriques nécessaires à l'étude des vibrations mécaniques et à l'analyse modale. Il présentera successivement :

- les différents types de vibrations (libres, forcées, amorties),
- les modèles simplifiés de systèmes à un et plusieurs degrés de liberté (DDL),
- la notion de fréquences naturelles et de modes propres,
- ainsi qu'une introduction au concept d'amortissement.

L'ensemble de ces notions constituera la base indispensable pour aborder, dans les chapitres suivants, la modélisation mathématique, la simulation numérique, et l'analyse des résultats appliqués aux réservoirs de carburant pour applications spatiales.

1.2 Vibration

1.2.1 Définition

La vibration est définie comme un mouvement oscillatoire d'un corps ou d'un point autour d'une position d'équilibre. Elle se manifeste lorsque les forces internes du système tentent de rétablir un équilibre perturbé par une excitation quelconque. Ce phénomène est omniprésent dans la nature et dans les systèmes conçus par l'homme, allant des cordes vibrantes aux structures aérospatiales complexes.

Sur le plan fondamental, toute vibration résulte de l'interaction entre trois propriétés physiques essentielles d'un système mécanique :

- La masse (ou inertie),
- La raideur (ou élasticité),
- L'amortissement (ou dissipation d'énergie).

Lorsque la position d'équilibre d'un système est perturbée (par une force, un choc ou un déplacement initial), la raideur agit pour ramener le système à sa position d'origine, tandis que l'inertie s'oppose à ce mouvement de retour. Ce déséquilibre temporaire entraîne un mouvement périodique, appelé vibration. [10]

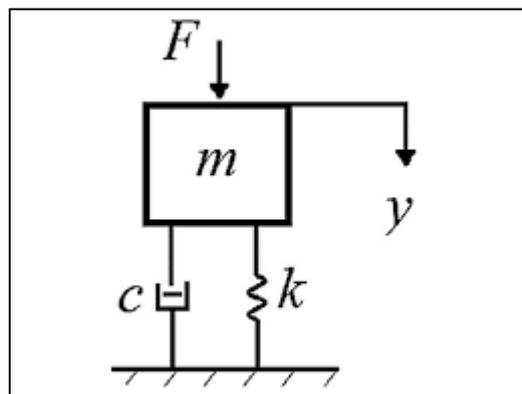


Figure 1.1 Schéma simplifié d'un système vibratoire masse-ressort-amortisseur [10]

1.2.2 Importance de la vibration dans l'ingénierie aérospatiale

Dans le domaine de l'ingénierie aérospatiale, les phénomènes vibratoires ont un impact critique sur la conception, la sécurité et la durabilité des structures. Les éléments structurels comme les ailes, les moteurs, les réservoirs de carburant, et même les instruments électroniques sont constamment soumis à des charges dynamiques pouvant générer des vibrations.

Dans le cas particulier des réservoirs de carburant pour moteurs-fusées, ceux-ci sont exposés à :

- des sollicitations dynamiques lors du lancement (accélération, turbulence, vibrations mécaniques),
- des ondes de pression internes dues à la combustion ou à l'écoulement rapide de fluides cryogéniques,
- un couplage avec les structures environnantes (aéroélasticité, accouplement fluide-structure).

Ces vibrations peuvent produire :

- une fatigue prématurée des matériaux,
- des résonances catastrophiques si une fréquence d'excitation correspond à une fréquence propre du réservoir,
- une altération des performances du système propulsif.

D'où l'importance de prévoir et d'analyser les vibrations dès la phase de conception, notamment à travers l'analyse modale. [14]

1.2.3 Classification des types de vibration

Les vibrations peuvent être classées selon plusieurs critères :

a) Selon l'origine de l'excitation :

- Vibrations libres : apparaissent lorsque le système est perturbé puis laissé à lui-même. Le mouvement est alors uniquement influencé par les propriétés internes du système (masse, raideur, amortissement). Ex : un réservoir qui vibre après un choc mécanique.

Chapitre 1 : Vibrations mécaniques et analyse modale

- Vibrations forcées : provoquées par une excitation extérieure continue (ex. : vibration d'un moteur, turbulence aérodynamique). Le comportement dépend ici de la nature et de la fréquence de l'excitation.

b) Selon la régularité :

- Vibrations périodiques : se répètent de manière régulière dans le temps (ex. : rotation d'un composant déséquilibré)

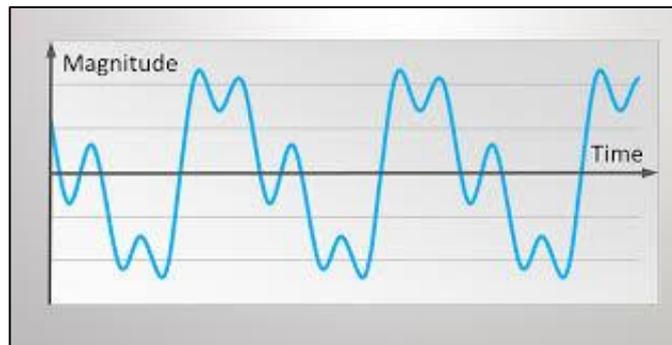


Figure 1.2 Exemple d'un signal de vibration périodique [10]

- Vibrations aléatoires : ne suivent aucun motif prévisible, souvent dues à des excitations complexes (ex. : turbulences dans l'atmosphère).

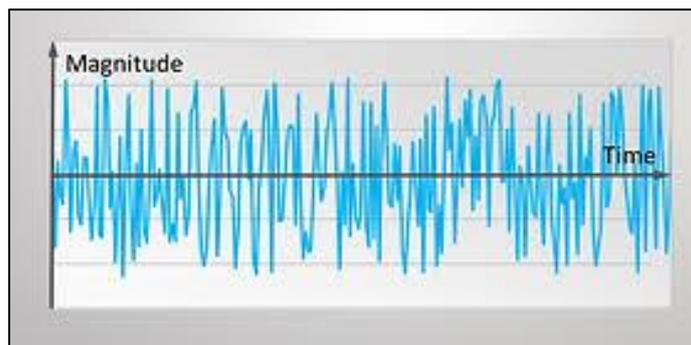


Figure 1.3 Exemple d'un signal de vibration aléatoire [10]

c) Selon la dissipation d'énergie :

- Vibrations amorties (oscillations amorties) : l'énergie du mouvement décroît dans le temps à cause de l'amortissement (friction, frottement interne...).
- Vibrations non amorties : idéalisées, supposent une absence de dissipation, utilisées souvent pour les calculs analytiques de base.

d) Selon le comportement dynamique :

- Vibrations linéaires : les réponses sont proportionnelles aux sollicitations (valide pour petits déplacements).
- Vibrations non linéaires : apparaissent quand les déplacements sont grands ou quand les matériaux présentent des comportements complexes. [10]

1.2.4 Lien avec l'analyse modale

L'analyse modale est l'approche mathématique et numérique permettant d'étudier le comportement vibratoire d'un système. Elle consiste à déterminer :

- Les fréquences propres (ou naturelles),
- Les modes propres (formes de déformation associées),
- Les facteurs d'amortissement,
- L'influence des conditions aux limites (fixations, appuis).

Cette méthode est particulièrement cruciale en aérospatiale car elle permet d'anticiper les résonances, de valider la stabilité dynamique des composants, et d'optimiser les designs pour minimiser les effets vibratoires.

L'application de cette méthode aux réservoirs de carburant permet d'évaluer avec précision l'influence des caractéristiques géométriques, matérielles et thermiques sur leur réponse dynamique, notamment dans des conditions extrêmes typiques du domaine spatial. [13]

1.2.5 Principaux indicateurs vibratoires

L'analyse vibratoire d'un système mécanique ou aérospatial repose sur l'interprétation de plusieurs grandeurs physiques fondamentales appelées indicateurs vibratoires. Ces derniers

Chapitre 1 : Vibrations mécaniques et analyse modale

permettent de caractériser le comportement dynamique d'une structure soumise à une excitation, et sont indispensables pour diagnostiquer, surveiller, ou optimiser les performances mécaniques dans des conditions dynamiques.

❖ Fréquence naturelle (Fréquence propre)

C'est la fréquence à laquelle un système tend à vibrer spontanément après une excitation initiale, en l'absence de toute excitation extérieure continue. Chaque structure possède plusieurs fréquences propres correspondant à ses différents modes de vibration. En ingénierie aérospatiale, il est crucial d'éviter que l'excitation externe (due par exemple aux moteurs ou aux turbulences) ne coïncide avec ces fréquences propres, car cela pourrait provoquer un phénomène de résonance, amplifiant dangereusement les vibrations. [10]

❖ Amplitude vibratoire

L'amplitude désigne la valeur maximale du déplacement d'un point de la structure par rapport à sa position d'équilibre lors d'une vibration. Elle exprime donc l'intensité de l'oscillation. Une grande amplitude indique une vibration potentiellement nocive, susceptible de générer des contraintes importantes sur les matériaux ou de conduire à la fatigue structurelle. Dans les réservoirs de carburant pour fusées, par exemple, une forte amplitude peut entraîner des déformations locales ou des pertes d'étanchéité critiques.

L'amplitude peut aussi être exprimée en fonction de la vitesse ou de l'accélération, surtout lorsqu'on utilise des capteurs inertiels pour la mesure sur le terrain. [6]

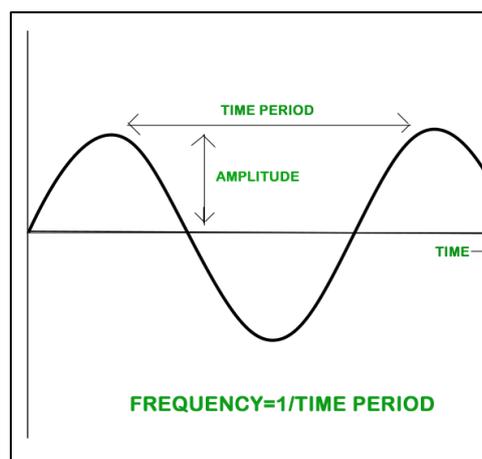


Figure 1.4 Illustration de l'amplitude d'une vibration périodique [6]

❖ Phase

La phase est une grandeur angulaire qui mesure le décalage temporel entre deux signaux vibratoires – généralement entre l'excitation appliquée et la réponse du système. En régime sinusoïdal, elle est exprimée en degrés ($^{\circ}$) ou en radians (rad). Elle est essentielle pour analyser les interactions entre différents composants vibrants, ou pour vérifier le comportement synchrone ou asynchrone des réponses dynamiques.

Une différence de phase importante entre l'entrée et la sortie peut indiquer un phénomène de retard, ou encore la présence d'un phénomène d'amortissement ou de résonance partielle.

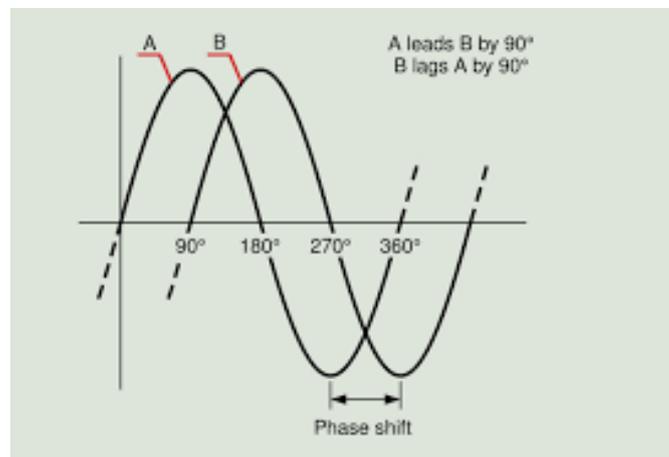


Figure 1.5 Décalage de phase entre deux signaux sinusoïdaux [6]

❖ Rapport d'amortissement (Damping Ratio)

Il mesure la capacité du système à dissiper l'énergie vibratoire. Un amortissement faible (ce qui est souvent le cas dans les structures aéronautiques et spatiales) signifie que la vibration perdure longtemps. Un amortissement élevé, au contraire, réduit la durée et l'intensité des oscillations. Ce paramètre est vital pour comprendre la stabilité dynamique d'un système et pour concevoir des solutions d'absorption vibratoire (comme les isolateurs ou les matériaux viscoélastiques). [10]

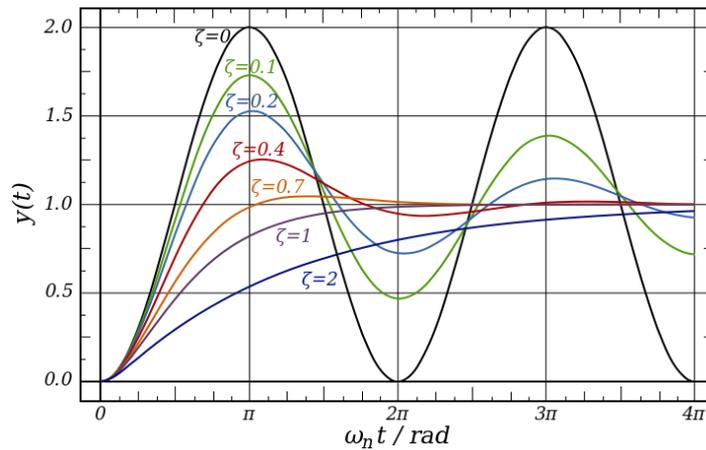


Figure 1.6 Effet de la variation du rapport d'amortissement sur un système du second ordre [10]

❖ Raideur (Stiffness)

La raideur représente la résistance d'un système à la déformation lorsqu'une force est appliquée. Elle est définie par la relation $k = F / \delta$, où F est la force appliquée et δ le déplacement résultant. Dans un modèle masse-ressort simple, la raideur détermine directement la fréquence propre selon la formule :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

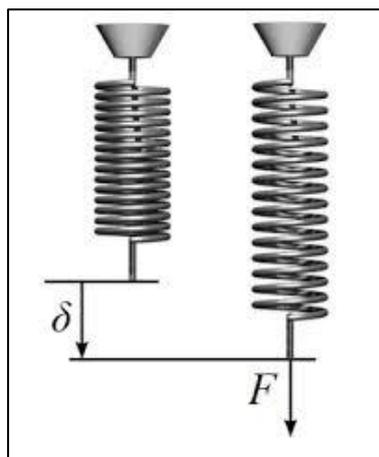


Figure 1.7 Illustration de la raideur d'un ressort [3]

❖ Résonance

La résonance est un phénomène qui se produit lorsque la fréquence d'excitation externe correspond à la fréquence naturelle du système. Cela entraîne une amplification considérable de l'amplitude, pouvant mener à des défaillances structurelles. Le cas historique du pont de Tacoma Narrows illustre parfaitement ce phénomène.

En aérospatiale, il est impératif d'éviter la résonance dans les plages de fonctionnement des moteurs ou lors du passage dans des zones de turbulence atmosphérique. [10]

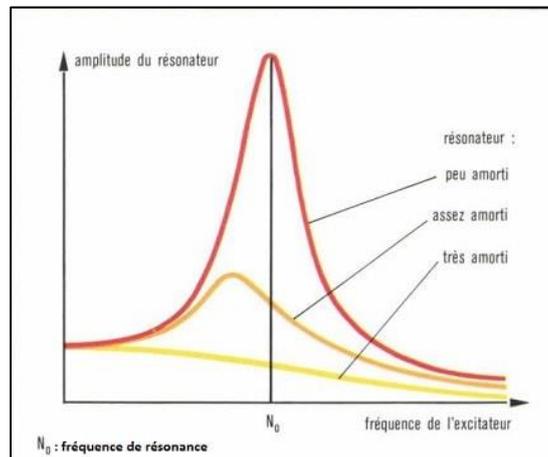


Figure 1.8 Phénomène de résonance dans un système vibratoire [10]

❖ Période propre

La période propre d'un système, notée T , est le temps nécessaire pour qu'il effectue un cycle complet d'oscillation autour de sa position d'équilibre. Elle est liée à la fréquence naturelle par la relation simple :

$$T = \frac{1}{fn} \quad (2)$$

Cette grandeur est essentielle pour caractériser le comportement temporel d'un système vibratoire. Une petite période signifie que le système vibre rapidement, tandis qu'une grande période indique un mouvement lent. Dans les structures aérospatiales, la connaissance des

périodes propres permet de prévoir les risques de résonance et de concevoir des systèmes capables de supporter les vibrations sans entrer en instabilité. [13]

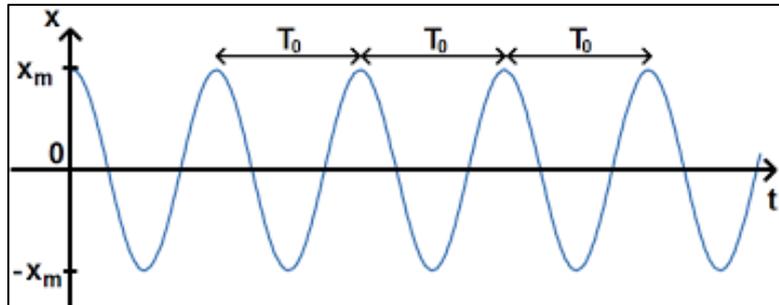


Figure 1.9 Période propre d'un système oscillant [13]

1.3 Analyse modale

1.3.1 Définition de l'analyse modale

L'analyse modale est une méthode fondamentale en dynamique des structures, visant à comprendre comment une structure vibre lorsqu'elle est soumise à une excitation, ou même en absence de celle-ci. Elle repose sur la décomposition du comportement dynamique complexe d'un système en un ensemble de modes simples, appelés modes propres (modes de vibration). Chaque mode est caractérisé par une fréquence propre, une forme modale et, dans le cas d'un système amorti, un facteur d'amortissement.

Dans le contexte mécanique ou aérospatial, une structure telle qu'un réservoir de carburant, une aile d'avion, ou un satellite peut posséder des centaines, voire des milliers de degrés de liberté. Pour prédire leur comportement vibratoire, il est inefficace d'étudier chaque déplacement ponctuel de manière indépendante. L'analyse modale permet de simplifier le problème en considérant uniquement les modes de vibration significatifs.

Plus précisément, un mode propre est une configuration de déplacement dans laquelle tous les points de la structure oscillent à la même fréquence, mais avec des amplitudes relatives spécifiques. Cette forme d'oscillation est obtenue naturellement sans excitation extérieure continue. À chaque mode est associée une fréquence propre, qui est la fréquence naturelle à laquelle la structure "préfère" vibrer. Si une excitation extérieure contient une composante à

cette fréquence, un phénomène de résonance peut survenir, amplifiant dangereusement la réponse du système.

L'analyse modale est donc cruciale pour :

- Identifier les fréquences dangereuses à éviter,
- Concevoir des structures rigides ou contrôlées dynamiquement,
- Réduire les risques de fatigue ou de défaillance,
- Et optimiser la conception pour les performances dynamiques. [3]

Il existe deux grandes approches pour réaliser une analyse modale :

1. Analyse modale numérique (ou théorique) : réalisée à partir d'un modèle numérique (éléments finis) via un logiciel comme ANSYS, NASTRAN ou COMSOL. Cette méthode calcule les modes propres à partir des matrices de masse et de raideur du système.

2. Analyse modale expérimentale : effectuée en laboratoire sur un prototype ou un modèle réel. On excite la structure (généralement à l'aide d'un marteau d'impact ou d'un shaker), on mesure la réponse vibratoire à l'aide de capteurs (accéléromètres), et on extrait les modes via des techniques d'identification (comme la fonction de réponse en fréquence – FRF).

Ces deux approches peuvent se compléter. Dans les projets aéronautiques ou spatiaux, l'analyse numérique est souvent utilisée en phase de conception, tandis que l'expérimentale intervient en phase de validation. [5]

1.3.2 Objectifs et intérêt de l'analyse modale en ingénierie

L'analyse modale joue un rôle fondamental dans le domaine de l'ingénierie mécanique et plus particulièrement dans les structures aéronautiques, où la sécurité, la performance et la fiabilité sont des impératifs critiques. L'objectif principal de cette analyse est de déterminer les fréquences propres et les modes de vibration d'une structure afin de prédire son comportement dynamique face aux sollicitations extérieures.

En pratique, l'analyse modale permet de détecter les zones sensibles aux résonances, d'optimiser les formes géométriques, de choisir des matériaux adaptés et de mieux concevoir les systèmes d'amortissement. Par exemple, lorsqu'une structure est soumise à des excitations harmoniques proches de ses fréquences naturelles, elle risque de vibrer de manière excessive,

ce qui peut conduire à la fatigue, à la fissuration, voire à la rupture. En identifiant ces fréquences critiques à l'avance, on peut adapter la conception pour les éviter.

Un autre intérêt crucial de l'analyse modale est la simplification des modèles de calcul. En effet, au lieu de simuler le comportement dynamique complet d'une structure complexe, on peut l'exprimer comme une superposition de modes propres, chacun ayant une fréquence et une forme associées. Cela réduit le coût de calcul tout en offrant une bonne précision, surtout dans les premiers modes qui dominent généralement la réponse.

Dans le contexte de l'aérospatial, les structures telles que les ailes, les réservoirs de carburant, les fuselages ou les moteurs subissent des excitations vibratoires de diverses origines (moteurs, flux aérodynamiques, événements de lancement, etc.). L'analyse modale est donc utilisée aussi bien en phase de conception que durant les essais expérimentaux, où elle permet d'identifier les écarts entre le modèle théorique et la structure réelle. Cette comparaison est indispensable pour valider les simulations numériques et garantir la conformité des performances mécaniques.

En résumé, l'analyse modale offre une compréhension fine du comportement vibratoire, aide à prévenir les problèmes de résonance, contribue à l'optimisation structurelle et constitue un outil incontournable dans les processus de validation expérimentale et numérique en ingénierie avancée. [5]

1.3.3 Les méthodes d'analyse modale : expérimentale, numérique et analytique

Dans le domaine de la dynamique des structures, l'analyse modale joue un rôle fondamental pour comprendre le comportement vibratoire des systèmes. Elle permet d'identifier les fréquences naturelles, les formes modales et les niveaux d'amortissement d'une structure. Pour ce faire, trois approches principales sont utilisées : l'analyse expérimentale, l'analyse numérique et l'analyse analytique. Chacune possède ses particularités, ses avantages et ses limites, et le choix de la méthode dépend des objectifs de l'étude, de la complexité de la structure, ainsi que des ressources disponibles. [13]

1.3.3.1 L'analyse modale expérimentale

Cette méthode repose sur l'observation directe du comportement vibratoire d'un système physique réel. Elle consiste à exciter la structure mécaniquement et à mesurer sa réponse à l'aide de capteurs.

❖ Principe général :

L'analyse modale expérimentale (AME) est une méthode essentielle dans le domaine de la dynamique des structures, visant à identifier expérimentalement les caractéristiques vibratoires d'un système physique réel. Contrairement à l'analyse modale numérique, qui repose sur des modèles mathématiques et des hypothèses idéalisées, l'AME se base sur des données mesurées directement à partir du comportement vibratoire réel de la structure testée. Cette approche est particulièrement utilisée lorsqu'il est difficile ou peu fiable de modéliser précisément le système à l'aide de méthodes numériques.

Le principe général de l'analyse modale expérimentale consiste à exciter mécaniquement une structure – à l'aide d'un marteau d'impact ou d'un excitateur électrodynamique – puis à mesurer sa réponse dynamique grâce à des capteurs comme les accéléromètres ou les vibromètres laser. Ces capteurs enregistrent la réponse temporelle de la structure sous forme de signaux vibratoires. Ensuite, ces signaux sont traités dans le domaine fréquentiel (souvent par la transformée de Fourier) pour obtenir la fonction de réponse en fréquence (FRF – Frequency Response Function), qui met en relation la force appliquée et la réponse mesurée.

À partir des FRF, différentes méthodes d'identification modale sont utilisées pour extraire les paramètres modaux : les fréquences propres (fréquences naturelles), les rapports d'amortissement, et les formes modales associées. Ces paramètres permettent d'évaluer la rigidité dynamique, la susceptibilité à la résonance, et le comportement vibratoire global de la structure. Les essais modaux expérimentaux sont souvent réalisés à différentes conditions aux limites et sur plusieurs points de mesure afin de garantir une bonne résolution spatiale et une représentation fidèle du comportement réel.

Parmi les principales étapes de l'analyse modale expérimentale, on peut citer :

- La préparation de la structure (fixation, conditions aux limites, instrumentation),
- La calibration et la configuration des capteurs,

- L'excitation contrôlée de la structure,
- L'acquisition des données temporelles,
- Le traitement des données en fréquence,
- L'identification des paramètres modaux,
- La validation des résultats par comparaison ou répétition.

Cette méthode est largement utilisée dans l'aéronautique, l'automobile, le génie civil et d'autres domaines d'ingénierie pour vérifier la conformité entre la conception et le comportement réel des structures, identifier les défauts, ou optimiser les performances dynamiques. Elle constitue également une base de référence pour la mise à jour des modèles numériques, dans une approche dite corrélation expérimentale-numérique. [23]

❖ Équipements utilisés

- Marteau d'impact (impact hammer) ou vibreur (shaker)
- Accéléromètres
- Système d'acquisition de données
- Logiciel d'analyse modale (ex. : LMS Test.Lab, Dewesoft)

❖ Résultats obtenus

- Fréquences propres expérimentales
- Formes modales expérimentales
- Taux d'amortissement mesurés

❖ Avantages :

- Précision élevée sur un modèle réel
- Identification des défauts dynamiques (non-linéarités, jeux, etc.)

❖ Inconvénients :

- Matériel coûteux
- Temps de mise en place important
- Nécessite un accès physique à la structure

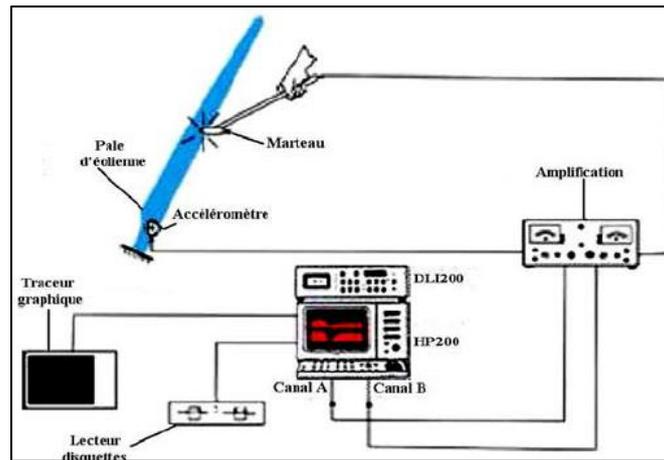


Figure 1.10 Type d'équipement utilisé pour l'analyse modale expérimentale [23]

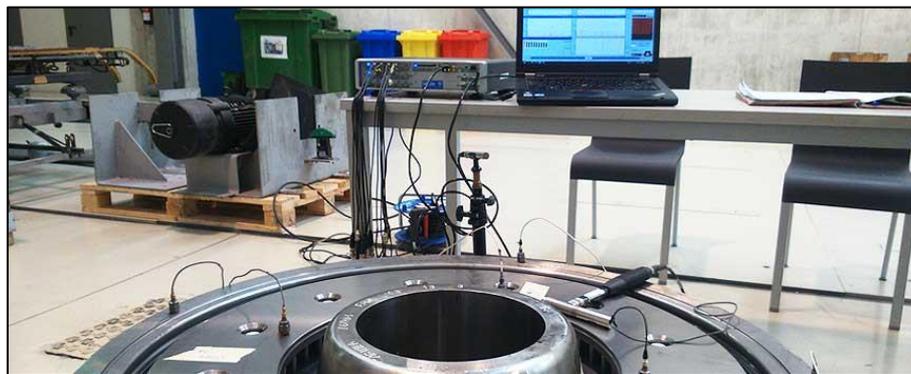


Figure 1.11 Essai d'analyse modale [23]

1.3.3.2 L'analyse modale numérique

❖ Principe général :

L'analyse modale numérique est une méthode de simulation utilisée pour déterminer les caractéristiques vibratoires fondamentales d'une structure, telles que les fréquences propres et les formes modales. Elle permet d'étudier le comportement dynamique d'un système avant sa fabrication ou sa mise en service, ce qui la rend particulièrement utile dans des domaines exigeants comme l'aéronautique, l'automobile ou le spatial.

Le principe général de cette approche repose sur la modélisation de la structure réelle par un modèle mathématique basé le plus souvent sur la méthode des éléments finis (MEF). Cette dernière consiste à diviser la structure continue en un ensemble fini d'éléments simples (triangles, quadrilatères, tétraèdres, etc.) qui sont reliés entre eux par des nœuds. Chaque

élément est caractérisé par ses propriétés mécaniques (module d'élasticité, densité, coefficient de Poisson...) et géométriques, et contribue à la formation des matrices globales du système.

L'analyse modale numérique permet alors d'assembler deux matrices principales :

- La matrice de masse (M), qui représente l'inertie de la structure,
- Et la matrice de raideur (K), qui représente la rigidité mécanique du système.

L'objectif est de déterminer les conditions dans lesquelles le système peut osciller librement, sans forçage externe, c'est-à-dire d'identifier ses modes propres de vibration. Cela se traduit par la résolution d'un problème aux valeurs propres, qui fournit un ensemble discret de fréquences naturelles associées à des formes modales spécifiques. Ces formes décrivent la manière dont la structure se déforme à chaque fréquence.

Cette méthode est largement mise en œuvre dans des logiciels de calcul tels que ANSYS, COMSOL Multiphysics, ABAQUS, ou NASTRAN, qui permettent de construire le modèle, définir les matériaux, appliquer les conditions aux limites, et exécuter le calcul modal. Une attention particulière est portée à la qualité du maillage, au choix des éléments, et à la définition précise des propriétés du matériau pour garantir la précision des résultats.

L'analyse modale numérique est donc un outil indispensable de la conception moderne, permettant d'anticiper les phénomènes de résonance, d'optimiser les performances vibratoires d'un composant, et de réduire les risques de défaillance structurelle. Elle offre également la possibilité de comparer différentes configurations géométriques, matériaux ou conditions de fonctionnement avant le prototypage physique, ce qui représente un gain de temps et de coûts significatif.

La structure est modélisée dans un logiciel de calcul (ex : ANSYS, COMSOL, NASTRAN), en définissant ses propriétés géométriques, ses matériaux, et ses conditions aux limites. La simulation permet de prédire les comportements dynamiques de la structure. [23]

❖ Outils utilisés :

- Logiciels de simulation (ANSYS, Abaqus, Comsol, etc.)
- Maillage 3D précis
- Définition des propriétés mécaniques (densité, rigidité, etc.)

❖ Résultats obtenus :

- Fréquences propres calculées
- Formes modales simulées
- Influence des conditions aux limites

❖ Avantages :

- Permet d'analyser des structures complexes
- Rapide et économique une fois le modèle établi
- Possibilité d'effectuer des études paramétriques

❖ Inconvénients :

- Sensible à la qualité du maillage et aux hypothèses de modélisation
- Écarts possibles avec les résultats expérimentaux

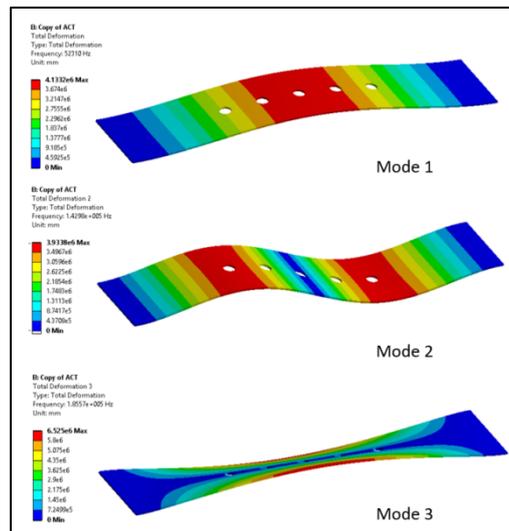


Figure 1.12 Exemple aléatoire d'une analyse modale numérique [23]

1.3.3.3 L'analyse modale analytique

Cette approche consiste à étudier le comportement vibratoire d'un modèle simplifié (souvent 1D ou 2D), permettant de comprendre les phénomènes fondamentaux et de valider les autres approches.

❖ Principe général :

L'analyse modale analytique est une approche théorique permettant d'étudier le comportement vibratoire d'un système mécanique à partir de ses équations différentielles fondamentales. Elle repose sur une modélisation mathématique précise de la structure, en

Chapitre 1 : Vibrations mécaniques et analyse modale

prenant en compte les lois de la mécanique classique, notamment celles du mouvement, de l'élasticité, et de la dynamique.

Le principe de base consiste à modéliser la structure comme un système dynamique, souvent simplifié en un modèle à un ou plusieurs degrés de liberté. À partir de cette modélisation, on établit une équation du mouvement qui décrit les interactions entre les forces internes (liées à la raideur du système), les forces d'inertie (liées à la masse), et éventuellement les forces d'amortissement ou de sollicitation externe. Ces équations permettent ensuite de déterminer les fréquences naturelles (ou propres) du système, ainsi que les modes propres, c'est-à-dire les manières caractéristiques dont la structure peut vibrer.

Dans sa forme la plus élémentaire, cette méthode est utilisée pour des structures simples telles que :

- des poutres en flexion,
- des plaques rectangulaires,
- des barres en traction-compression,
- ou encore des systèmes masse-ressort.

Elle permet d'obtenir des solutions exactes ou semi-analytiques selon les hypothèses retenues (conditions aux limites, homogénéité du matériau, symétrie géométrique, etc.). Grâce à cette précision, l'analyse analytique est souvent utilisée comme référence ou validation pour les autres méthodes plus complexes comme la méthode numérique (éléments finis).

Toutefois, cette méthode reste limitée à des configurations géométriques simples et des hypothèses idéalisées. Lorsque la structure devient trop complexe (forme géométrique irrégulière, matériaux composites, conditions aux limites multiples...), l'approche analytique devient impraticable ou extrêmement difficile à résoudre. Dans ce cas, elle est souvent remplacée ou complétée par des approches numériques.

L'intérêt de l'analyse modale analytique réside dans sa capacité à fournir une compréhension profonde et directe des phénomènes vibratoires. Elle permet d'identifier rapidement les paramètres influents (masse, raideur, amortissement) sur les fréquences propres, de prévoir les conditions de résonance, et de guider le concepteur dans les premières étapes de la conception mécanique. Elle joue également un rôle fondamental dans

Chapitre 1 : Vibrations mécaniques et analyse modale

l'enseignement et la recherche, en offrant un cadre théorique solide pour l'analyse dynamique des systèmes. [23]

❖ Utilisations :

- Validation préliminaire de modèles numériques
- Analyse de phénomènes dominants
- Formation académique et compréhension physique

❖ Avantages :

- Intuition physique claire
- Temps de calcul quasi nul
- Méthode pédagogique efficace

❖ Inconvénients :

- Limité aux géométries simples
- Moins précis pour les structures réelles et complexes

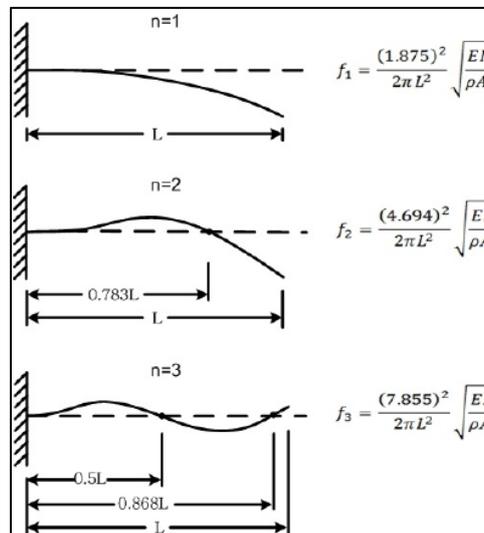


Figure 1.13 Exemples de formes modales analytiques pour des structures simples [10]

1.3.4 Paramètres modaux essentiels

L'analyse modale vise à identifier un ensemble de paramètres physiques appelés paramètres modaux, qui décrivent avec précision le comportement dynamique d'une structure soumise à des vibrations. Ces paramètres constituent la base pour comprendre les phénomènes

vibratoires, prédire les effets de résonance, et mettre en œuvre des stratégies de conception robustes, particulièrement dans les domaines sensibles tels que l'aéronautique, le spatial ou le nucléaire.

Parmi ces paramètres, plusieurs sont considérés comme fondamentaux :

- Forme modale (Mode shape / Forme propre)

La forme modale décrit le motif spatial de la déformation de la structure lors d'une vibration libre. Autrement dit, elle indique comment chaque point de la structure se déplace (en amplitude et en direction) lorsque le système vibre selon un mode spécifique.

Chaque mode est associé à une forme propre unique, qui peut révéler les zones de concentrations de contraintes ou de déplacements critiques.

Comprendre ces formes permet aux ingénieurs de localiser les points faibles, d'optimiser le design (allègement, renforts) et d'éviter les couplages dynamiques néfastes.

- Amortissement (Taux d'amortissement – ζ)

Ce paramètre quantifie la capacité du système à dissiper l'énergie vibratoire au cours du temps. Il peut provenir de plusieurs sources : frottements internes du matériau, pertes aux interfaces (joints, fixations), ou dispositifs d'absorption (viscoélastiques, amortisseurs).

Un faible taux d'amortissement engendre des oscillations prolongées, tandis qu'un amortissement élevé limite la propagation des vibrations, mais peut affecter la performance dynamique.

Dans l'ingénierie aéronautique, un équilibre précis est souvent recherché : trop peu d'amortissement augmente le risque de fatigue, trop d'amortissement peut détériorer la réactivité du système. [13]

1.3.5 Conditions aux limites et influence sur les modes propres

Les conditions aux limites jouent un rôle déterminant dans la définition du comportement dynamique d'un système mécanique. Elles définissent les contraintes imposées sur les déplacements et les rotations des points de la structure, ce qui influence directement les modes

propres ainsi que les fréquences associées. Une modification, même légère, de ces conditions peut entraîner des changements significatifs dans la distribution des fréquences propres et la forme des modes de vibration.

Par exemple, une structure avec des extrémités encastées présente une rigidité plus élevée, ce qui conduit généralement à des fréquences propres plus élevées et à des modes plus contraints. À l'inverse, des conditions aux limites de type libre permettent des mouvements plus amples, réduisent la rigidité globale du système, et se traduisent par des fréquences plus faibles. Entre ces deux cas extrêmes, on trouve des conditions intermédiaires comme l'appui simple, qui offre une liberté de rotation mais empêche le déplacement vertical, influençant ainsi les caractéristiques vibratoires de manière différente.

Il est important de noter que les conditions aux limites influencent également la forme spatiale des modes propres. Un même système géométrique, soumis à différentes conditions de bord, peut présenter des distributions modales très différentes. Certains modes peuvent apparaître ou disparaître, d'autres peuvent se déplacer en fréquence ou se déformer sous l'effet de la nouvelle configuration de contraintes.

Dans une analyse modale, la modélisation correcte des conditions aux limites est donc essentielle. Une représentation inexacte ou simplifiée peut fausser l'ensemble des résultats, et mener à des conclusions erronées quant au comportement dynamique réel du système. C'est particulièrement critique dans le cadre de la conception de structures soumises à des excitations dynamiques, où la précision des prévisions vibratoires est primordiale pour garantir la sécurité et la performance. [9]

1.4 Conclusion

L'étude des vibrations mécaniques et l'analyse modale linéaire représentent des piliers essentiels dans la compréhension du comportement dynamique des structures mécaniques, particulièrement celles soumises à des sollicitations variables ou cycliques. À travers ce chapitre, nous avons pu poser les bases théoriques indispensables à toute analyse sérieuse d'un système vibratoire, en mettant en évidence les différents types de vibrations, leurs origines, ainsi que les conséquences potentiellement néfastes qu'elles peuvent engendrer si elles ne sont pas convenablement maîtrisées.

Chapitre 1 : Vibrations mécaniques et analyse modale

La vibration, en tant que phénomène omniprésent dans les systèmes physiques, n'est pas seulement une source de nuisance sonore ou de fatigue des matériaux. Elle est également un indicateur précieux de l'état de santé d'une structure. C'est pourquoi son étude ne se limite pas à des considérations théoriques, mais s'inscrit de plus en plus dans une logique d'ingénierie avancée, où la détection précoce des anomalies vibratoires peut permettre d'anticiper des pannes, d'optimiser les phases de maintenance et d'améliorer la longévité des composants mécaniques.

Dans cette optique, l'analyse modale se présente comme une démarche méthodologique rigoureuse permettant de caractériser la réponse dynamique d'un système. En identifiant les fréquences propres, les modes propres et les coefficients d'amortissement, elle offre une représentation simplifiée mais puissante du comportement vibratoire. Cela permet non seulement d'évaluer la stabilité dynamique d'un système, mais également d'orienter des décisions de conception, d'optimisation topologique ou de renforcement structurel.

Aujourd'hui, l'analyse modale est largement utilisée dans divers domaines de l'ingénierie tels que l'aéronautique, le spatial, l'automobile, le génie civil, l'électronique embarquée, et même dans les applications biomédicales (comme l'étude des prothèses ou des implants soumis à des vibrations). L'évolution des outils numériques (notamment la méthode des éléments finis) et des techniques expérimentales (analyse modale expérimentale, essais en vibration, analyse opérationnelle) a permis une intégration plus fluide de ces méthodes dans les cycles de développement produit.

En parallèle, l'avènement des technologies intelligentes — capteurs embarqués, algorithmes de traitement de signal, intelligence artificielle — ouvre de nouvelles perspectives pour le suivi en temps réel et la maintenance prédictive. Grâce à la collecte et à l'analyse de données vibratoires, les ingénieurs sont désormais capables d'identifier, avec une grande précision, les comportements anormaux, les déviations par rapport aux modèles modaux de référence, et d'anticiper les éventuelles défaillances avant qu'elles ne se manifestent de manière critique.

Ainsi, les notions abordées dans ce chapitre ne sont pas uniquement des concepts fondamentaux à maîtriser, mais des outils stratégiques d'aide à la décision et à l'innovation dans l'ingénierie moderne. Elles offrent le socle nécessaire pour aborder avec assurance les chapitres suivants, qui seront consacrés à des études de cas concrets et à l'application de ces principes sur des structures complexes. Cette transition entre la théorie et la pratique marque

Chapitre 1 :Vibrations mécaniques et analyse modale

une étape déterminante dans l'approfondissement de notre compréhension des phénomènes vibratoires et dans la mise en œuvre d'approches de modélisation avancées au service de la performance et de la sécurité des systèmes mécaniques.

Chapitre 2

Étude des Réservoirs dans les Systèmes Aérospatiaux

2.1 Introduction

Dans le contexte complexe et exigeant de l'ingénierie aérospatiale, les réservoirs jouent un rôle fondamental et multifonctionnel. Leur mission ne se limite pas à contenir des fluides ; ils participent activement à la sécurité, à la stabilité, à la performance et à l'autonomie des aéronefs et des lanceurs spatiaux. Le développement de ces structures repose sur un équilibre délicat entre contraintes mécaniques, exigences fonctionnelles et limitations massiques. Plus qu'un simple volume confiné, un réservoir aéronautique ou spatial est une pièce critique du système global, à l'interface entre la propulsion, la structure, la thermique et parfois même les systèmes de contrôle.

Concevoir un réservoir pour un véhicule volant implique une analyse approfondie de plusieurs paramètres interdépendants. La pression interne, les effets de la gravité (ou son absence en microgravité), les charges vibratoires durant les phases de vol (accélérations, décélérations, turbulence), les variations thermiques extrêmes, et les possibles réactions chimiques entre le fluide stocké et les matériaux de la paroi, sont autant de défis que l'ingénieur doit anticiper et maîtriser. À cela s'ajoutent les considérations de masse, de volume, de facilité d'intégration dans la structure globale du véhicule, et de conformité aux normes de sécurité rigoureuses.

Dans le domaine de l'aéronautique, les réservoirs sont souvent intégrés dans les ailes ou le fuselage des avions. Ils doivent répondre à des critères d'aérodynamisme, de fiabilité et de facilité d'inspection, tout en permettant une distribution fluide du carburant vers les moteurs. Dans le spatial, la problématique se complexifie davantage. Les réservoirs doivent non seulement contenir des ergols cryogéniques (comme l'hydrogène liquide ou l'oxygène liquide), mais aussi maintenir leur stabilité thermodynamique dans un environnement où la gravité est quasi inexistante, ce qui pose des défis uniques en termes de gestion du fluide, de pressurisation, et de structure interne (comme les membranes, diaphragmes ou systèmes anti-vortex).

Le choix du type de réservoir dépendra donc fortement de l'application ciblée, de la nature du fluide, de la durée de la mission, de la fréquence de réutilisation, ainsi que des matériaux disponibles. On distingue entre autres les réservoirs rigides, semi-flexibles, sphériques, cylindriques, composites, auto-pressurisés ou à pressurisation active, chacun ayant ses avantages, ses limites, et ses domaines d'utilisation privilégiés.

Une étude comparative approfondie des différents types de réservoirs, tant dans le domaine aéronautique que spatial, permet non seulement de comprendre les principes de leur conception, mais aussi de justifier les choix techniques adoptés dans le cadre d'un projet d'ingénierie donné. Il s'agit également d'identifier les tendances actuelles en matière d'innovation : l'émergence des matériaux composites à matrice polymère ou métallique, l'impression 3D, l'optimisation topologique, ou encore l'intégration des fonctions de surveillance embarquée.

À travers cette exploration, on vise à offrir une vision claire et structurée de l'état de l'art dans la conception des réservoirs aérospatiaux, en mettant en lumière les critères de sélection, les contraintes typiques, les solutions techniques adoptées et les perspectives futures qui façonnent l'évolution de ces composants essentiels à toute mission aérienne ou orbitale. [18]

2.2 Les types de réservoirs

Les réservoirs existent sous une multitude de formes et de conceptions, chacune répondant à des besoins bien spécifiques selon le contexte d'utilisation. Ce vaste éventail de types s'explique par la diversité des applications industrielles et techniques dans lesquelles ils sont employés, qu'il s'agisse de l'aéronautique, du transport de fluides, du stockage d'énergie ou encore des installations fixes. Chaque type de réservoir présente ses propres avantages et inconvénients en termes de résistance mécanique, d'optimisation de l'espace, de facilité de fabrication ou d'adaptation aux contraintes environnementales. Ainsi, en fonction du fluide à contenir, de la pression, de la température, ou de la configuration spatiale disponible, un choix précis s'impose pour garantir performance et sécurité. Dans ce qui suit, nous allons explorer les principaux types de réservoirs, en mettant en lumière leurs caractéristiques, leurs domaines d'application, ainsi que les atouts et limites que chacun d'eux présente. [18]

2.2.1 Réservoirs cylindriques

Le réservoir cylindrique constitue une solution de choix dans de nombreux systèmes de stockage de fluides sous pression, notamment dans les domaines aéronautique et aérospatial, en raison de ses qualités mécaniques, sa simplicité géométrique et sa compatibilité structurelle avec les architectures des véhicules modernes. Sa forme allongée en cylindre permet une distribution uniforme des contraintes internes, surtout sous pression, ce qui le rend particulièrement adapté pour le stockage de carburants, d'oxydants ou d'autres fluides utilisés

dans les systèmes de propulsion liquide. Ce type de réservoir est souvent privilégié pour sa capacité à être intégré efficacement dans les structures tubulaires ou fuselées des fusées et des aéronefs, où l'espace axial est mieux exploité que l'espace transversal. D'un point de vue fabrication, les réservoirs cylindriques se prêtent bien aux procédés industriels tels que le roulage de tôles métalliques, la soudure longitudinale, ou encore les technologies de matériaux composites comme l'enroulement filamentaire, ce qui permet d'obtenir des composants à la fois légers, résistants et économiques à produire en série. Le choix des matériaux, qu'il s'agisse d'alliages d'aluminium, de titane ou de composites à matrice polymère renforcée de fibres de carbone, permet d'adapter les caractéristiques mécaniques et thermiques du réservoir en fonction des exigences de la mission. En plus de leur robustesse, les réservoirs cylindriques peuvent être facilement segmentés ou compartimentés pour contenir différents types de fluides dans un même volume, ou pour intégrer des systèmes anti-ballotement (anti-slosh) afin d'assurer la stabilité du fluide pendant les phases dynamiques du vol. Cette géométrie facilite également la mise en place des capteurs, des vannes, et des interfaces de remplissage ou de vidange. Leur forme linéaire permet aussi de les empiler ou de les agencer en série, ce qui est un avantage logistique dans les lanceurs multi-étages. Même si leur rapport surface/volume est inférieur à celui des réservoirs sphériques, ce qui signifie une masse structurelle potentiellement plus élevée à volume égal, le réservoir cylindrique reste un compromis très pertinent entre performances mécaniques, intégration fonctionnelle et efficacité de fabrication, faisant de lui une solution de référence dans la plupart des systèmes propulsifs actuels. [16]

❖ Avantages du réservoir cylindrique

- Simplicité de conception et de fabrication : Sa géométrie permet une production standardisée avec des techniques bien maîtrisées comme le roulage et le soudage.
- Bonne résistance à la pression interne : Distribue de manière homogène les contraintes le long de la paroi.
- Facilité d'intégration : Peut s'aligner facilement dans des structures fuselées (fusées, avions, satellites).
- Adaptabilité des matériaux : Compatible avec les métaux légers comme l'aluminium, le titane, ainsi que les composites.
- Facilité d'ajout d'accessoires : Les capteurs, valves, cloisons internes et systèmes anti-ballotement peuvent y être intégrés sans difficulté.

❖ Inconvénients du réservoir cylindrique

- Rapport surface/volume moins optimal : Par rapport à un réservoir sphérique, il nécessite plus de matériau pour contenir le même volume, ce qui augmente la masse.
- Sensibilité aux efforts externes : Moins efficace sous des charges non-uniformes que d'autres formes renforcées.
- Espace parfois mal exploité : Dans certaines configurations, sa forme allongée peut gêner l'optimisation du volume global disponible. [20]



Figure 2.1 Réservoir externe de la navette spatiale américaine [20]

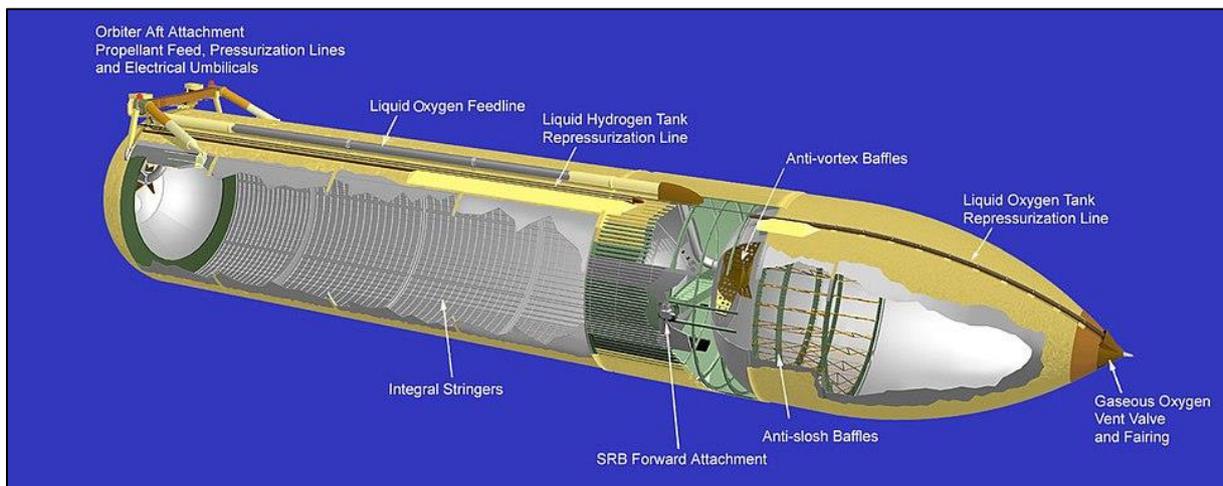


Figure 2.2 Schéma d'un réservoir externe [20]



Figure 2.3 Un réservoir cylindrique d'avion [22]

2.2.2 Réservoir sphérique

Le réservoir sphérique est une configuration géométrique utilisée principalement dans des contextes où la maîtrise de la pression interne est essentielle. Sa forme parfaitement ronde permet une distribution homogène de la pression sur toute la surface du récipient, ce qui en fait une solution très stable sur le plan mécanique. Cette symétrie sphérique est également avantageuse pour assurer un comportement prévisible du matériau lors des variations de température ou de pression, notamment dans les environnements extrêmes comme ceux rencontrés dans le domaine spatial ou cryogénique.

Sur le plan de la conception, le réservoir sphérique se distingue par sa géométrie compacte mais difficile à intégrer dans des structures étroites. Contrairement aux réservoirs de forme cylindrique ou prismatique, la sphère n'est pas toujours compatible avec les volumes rectilignes ou modulaires, ce qui nécessite souvent des adaptations structurelles pour l'installer correctement.

Ce type de réservoir est donc choisi non pas pour des raisons de simplicité ou d'optimisation de l'espace, mais plutôt pour ses performances structurelles intrinsèques. Il constitue une solution hautement technique, principalement retenue pour des systèmes où les contraintes mécaniques sont très élevées et où la fiabilité est une priorité absolue. [18]

❖ Avantages

- Résistance optimale à la pression : La forme sphérique permet une distribution uniforme de la pression interne, ce qui réduit les contraintes mécaniques sur la structure.
- Surface minimale pour un volume donné : Comparé à d'autres formes, la sphère offre le rapport surface/volume le plus bas, réduisant la quantité de matériau nécessaire.
- Moins de points de faiblesse : Moins de soudures ou de joints nécessaires, ce qui diminue les risques de fuite.
- Bonne tenue aux efforts thermiques : Idéal pour contenir des fluides cryogéniques comme l'hydrogène liquide.
- Stabilité mécanique élevée : Moins sujet à la déformation, surtout dans les conditions extrêmes.

❖ Inconvénients :

- Fabrication complexe : Les procédés de mise en forme sont plus difficiles et coûteux que pour les réservoirs cylindriques.
- Coût élevé : En raison des matériaux spécifiques et du besoin de précision dans l'assemblage.
- Problèmes d'intégration : Difficile à installer dans des espaces restreints ou aux formes irrégulières, comme dans les ailes d'avion.
- Utilisation d'espace inefficace : En termes d'aménagement, sa forme arrondie peut entraîner des pertes d'espace dans la structure environnante. [18]



Figure 2.4 Un grand réservoir de stockage pour l'hydrogène liquide comme carburant de fusée de lancement au 39B au Centre spatial Kennedy [22]



Figure 2.5 un réservoir cryogénique sphérique entièrement composite sans doublure [21]

Les récipients sous pression sans doublure - également connus sous le nom de type V - sont depuis longtemps un objectif dans la conception de réservoirs de stockage haute pression composites en fibre de carbone. Traditionnellement, les récipients sous pression des types I à IV ont incorporé au moins un certain pourcentage de métal, au moins en tant que revêtement entre le gaz ou le liquide stocké et l'extérieur composite (type IV). L'élimination des composants métalliques réduit considérablement le poids du réservoir, entraînant, dans le cas

des réservoirs de stockage de carburant pour les engins spatiaux, soit une réduction des coûts de lancement du véhicule, soit une augmentation de la capacité de charge utile. [21]

2.2.3 Réservoirs ellipsoïdaux ou ovoïdes

Les réservoirs ellipsoïdaux, aussi appelés réservoirs ovoïdes, présentent une forme arrondie et allongée qui s'apparente à une sphère aplatie ou étirée selon un ou plusieurs axes. Cette géométrie leur confère un équilibre intéressant entre les propriétés mécaniques des réservoirs sphériques et la simplicité des réservoirs cylindriques. Grâce à leurs parois courbes, ils permettent une distribution plus homogène des contraintes internes causées par la pression, réduisant ainsi les risques de points faibles structurels. Leur conception les rend particulièrement adaptés comme fonds (extrémités) de réservoirs à pression, car ils permettent de mieux résister à la pression sans nécessiter d'épaisseurs de parois excessives. Bien qu'ils soient plus complexes à fabriquer que les cylindres purs, ils sont souvent préférés dans les environnements industriels et aérospatiaux où l'optimisation entre volume, résistance et intégration est cruciale. Ils représentent donc une solution intermédiaire efficace entre la sphère (idéale mais coûteuse) et le cylindre (économique mais moins performant en pression). [22]

❖ Avantages

- Meilleure répartition de la pression que les cylindriques : forme plus arrondie qui réduit les concentrations de contraintes.
- Moins volumineux que les sphériques : meilleure intégration dans des espaces plus restreints.
- Bon compromis entre fabrication et performance mécanique : plus simple à fabriquer qu'un réservoir sphérique tout en offrant une bonne résistance.
- Utilisation fréquente comme extrémité de réservoirs : permet d'éviter les angles vifs et les points faibles.

❖ Inconvénients

- Moins résistant que la sphère pure sous haute pression.
- Fabrication plus complexe qu'un cylindre simple, surtout pour des grandes tailles.
- Moins efficace que la sphère en termes de matériau utilisé par volume stocké.



Figure 2.6 Réservoir elliptique en acier inoxydable de 5000 litres pour aviation [22]

2.2.4 Réservoir conique

Le réservoir conique est un type de réservoir dont la forme est définie par une base en cône, souvent prolongée par une partie supérieure cylindrique. Cette conception particulière permet une évacuation naturelle et optimale des liquides ou solides stockés grâce à la gravité, sans recourir à des équipements mécaniques supplémentaires. C'est une forme couramment utilisée dans les industries où le transfert complet du contenu est primordial, notamment lorsque le produit est visqueux, granulaire, ou nécessite un nettoyage fréquent. Par exemple, dans les usines agroalimentaires, le réservoir conique permet de vidanger complètement les matières sans laisser de résidus, ce qui est crucial pour respecter les normes d'hygiène. Dans le secteur chimique, cette forme est également avantageuse pour éviter les réactions indésirables dues à l'accumulation de restes de produits. Son fond incliné réduit les zones stagnantes (zones mortes), ce qui améliore la circulation et limite la contamination. En plus de ses qualités fonctionnelles, il est souvent utilisé en association avec des trémies, des vannes de vidange ou des systèmes de dosage. [12]

❖ Avantages :

- Vidange facile et rapide grâce au fond en pente.
- Réduction significative des résidus et dépôts.
- Nettoyage plus efficace et moins fréquent.
- Favorise l'écoulement des produits visqueux ou granuleux.

- Meilleure hygiène dans les environnements sensibles.
- ❖ Inconvénients :
 - Fabrication plus complexe et coûteuse.
 - Stabilité réduite si mal conçu ou mal posé.
 - Nécessite souvent une structure ou un support spécifique.
 - Moins de capacité de stockage à volume égal par rapport aux formes cylindriques.



Figure 2.7 Réservoir conique imprimé 3D en test [22]

2.3 Les matériaux utilisés dans la fabrication des réservoirs

Dans le domaine de la conception des réservoirs, le choix des matériaux représente une étape cruciale qui détermine non seulement la performance de l'ensemble, mais aussi sa durabilité, sa compatibilité avec les substances stockées, son poids et son comportement face aux contraintes mécaniques et thermiques. En effet, chaque environnement d'utilisation qu'il s'agisse de l'industrie aéronautique, automobile, spatiale, énergétique ou encore chimique impose des exigences spécifiques qui conditionnent la sélection du matériau idéal. Ce dernier doit répondre à une combinaison subtile de critères tels que la résistance à la corrosion, la légèreté, la facilité de mise en forme, la résistance à la pression, ainsi que les coûts de fabrication et de maintenance.

À travers les décennies, les avancées technologiques et les nouveaux besoins opérationnels ont conduit à l'apparition d'une grande diversité de matériaux, allant des classiques métaux

comme l'aluminium ou l'acier inoxydable, jusqu'aux matériaux plus modernes et innovants comme les composites à matrice polymère ou les alliages de titane. Chaque matériau possède ses propres atouts et limites, et c'est cette diversité qui permet d'adapter le réservoir à des conditions très précises de fonctionnement.

Dans ce qui suit, nous allons explorer en détail les principaux matériaux utilisés dans la fabrication des réservoirs, en mettant en lumière leurs caractéristiques techniques, leurs domaines d'application, ainsi que les raisons qui motivent leur choix dans des contextes industriels bien définis. [4]

2.3.1 L'aluminium

L'aluminium est l'un des matériaux les plus largement utilisés dans la fabrication des réservoirs, notamment dans les secteurs où la légèreté constitue un critère fondamental, comme l'aéronautique, l'aérospatial ou encore l'automobile. Ce métal, reconnu pour sa faible densité (environ un tiers de celle de l'acier), permet de réduire significativement le poids des structures tout en conservant une résistance mécanique satisfaisante, ce qui contribue à améliorer l'efficacité énergétique et la maniabilité des véhicules.

Outre sa légèreté, l'aluminium présente une excellente résistance à la corrosion atmosphérique grâce à la formation naturelle d'une fine couche d'oxyde à sa surface, agissant comme une barrière protectrice. Cette propriété en fait un choix privilégié pour les réservoirs destinés à contenir des fluides sensibles ou à fonctionner dans des environnements agressifs. De plus, sa bonne conductivité thermique est un avantage dans les applications où la gestion de la température est critique.

L'aluminium est également facile à mettre en forme par des procédés tels que l'emboutissage, l'extrusion ou le soudage, ce qui offre une grande liberté de conception pour les ingénieurs. Toutefois, malgré ses nombreux avantages, l'aluminium présente aussi certaines limites, notamment une résistance à la fatigue inférieure à celle de certains alliages d'acier, ainsi qu'un coût de production souvent plus élevé lorsqu'il est allié pour améliorer ses performances.

En résumé, l'aluminium s'impose comme un matériau de choix dans les situations où l'allègement de la structure est prioritaire sans compromettre la sécurité ou la fiabilité du système de stockage. Sa combinaison de propriétés techniques et sa compatibilité avec des

environnements variés en font un candidat de premier plan dans le développement des réservoirs modernes. [22]

2.3.2 L'acier inoxydable

L'acier inoxydable est un matériau de prédilection dans la conception des réservoirs destinés à des environnements exigeants en termes d'hygiène, de résistance mécanique et de durabilité. Couramment utilisé dans les industries chimique, pharmaceutique, agroalimentaire et pétrochimique, il se distingue par sa capacité à résister à la corrosion, même en présence de produits chimiques agressifs, d'humidité constante ou de températures élevées. Cette résistance exceptionnelle est due à l'alliage de l'acier avec du chrome (généralement plus de 10,5 %), qui forme une couche passive d'oxyde de chrome protectrice à la surface du métal.

Parmi ses avantages notables, on trouve sa robustesse mécanique remarquable, qui permet de concevoir des réservoirs soumis à des pressions internes ou externes élevées sans craindre la déformation ou la rupture. De plus, l'acier inoxydable est non poreux, ce qui empêche toute contamination croisée, un atout essentiel lorsqu'il s'agit de stocker des liquides destinés à la consommation humaine ou des substances sensibles à la pollution.

Sa surface lisse et facile à nettoyer facilite également l'entretien et la stérilisation des réservoirs, répondant ainsi aux normes sanitaires strictes imposées dans certains secteurs industriels. Il existe différentes familles d'acier inoxydable (austénitique, ferritique, martensitique...), chacune ayant des propriétés spécifiques adaptées à divers types d'applications selon les contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques rencontrées.

Cependant, l'acier inoxydable n'est pas exempt d'inconvénients : son coût initial est généralement plus élevé que celui des aciers carbone classiques, et son usinage peut s'avérer plus complexe. Néanmoins, sa longévité et sa fiabilité en font un investissement rentable à long terme, particulièrement lorsque la sécurité et la propreté du contenu du réservoir sont primordiales.

En définitive, l'acier inoxydable combine solidité, résistance chimique et neutralité sanitaire, ce qui en fait un matériau incontournable pour les réservoirs modernes, notamment dans les contextes industriels à haut niveau d'exigence. [22]

2.3.3 Les matériaux composites

Les matériaux composites représentent une alternative de plus en plus prisée dans la fabrication des réservoirs modernes, notamment lorsqu'on cherche à allier légèreté, résistance mécanique et résistance chimique. Par définition, un matériau composite est constitué d'au moins deux composants de nature différente, dont les propriétés se complètent pour former un matériau final aux caractéristiques supérieures à celles des constituants pris séparément. Dans le contexte des réservoirs, les composites les plus utilisés sont ceux à matrice polymère renforcée de fibres, tels que les composites à base de résine polyester ou époxy renforcée par des fibres de verre (GRP – Glass Reinforced Plastic) ou de carbone (CRP – Carbon Reinforced Plastic).

Ce type de matériau se distingue par une excellente résistance à la corrosion, même dans des environnements très agressifs (acides, bases, sels, humidité constante), ce qui en fait un choix idéal pour le stockage de produits chimiques, d'eaux usées, ou encore de solutions salines. Contrairement aux métaux, les matériaux composites ne rouillent pas et n'ont pas besoin de traitement anticorrosion supplémentaire, réduisant ainsi les coûts d'entretien à long terme.

Les composites offrent également un excellent rapport résistance/poids : ils sont beaucoup plus légers que l'acier ou même que l'aluminium, tout en conservant une rigidité suffisante pour des applications structurelles. Cette légèreté facilite leur transport, leur installation, et permet d'envisager des configurations surélevées ou modulaires, particulièrement intéressantes dans les sites à accès difficile ou contraints en espace.

Autre avantage notable : leur flexibilité de fabrication. Grâce aux procédés de moulage (filament winding, moulage par contact, infusion, etc.), il est possible de produire des réservoirs de formes complexes ou sur mesure, adaptés à des besoins très spécifiques. De plus, la structure sandwich (âme en nid d'abeille ou mousse entre deux couches de composite) peut être utilisée pour améliorer les performances thermiques ou mécaniques sans alourdir la structure.

Cependant, les matériaux composites présentent aussi certaines limites. Leur coût de production peut être élevé, notamment pour les modèles renforcés par des fibres de carbone. En outre, leur comportement à long terme sous charge ou en présence de rayons UV (dans le cas d'une exposition extérieure) doit être pris en compte. Les résines peuvent se dégrader ou

jaunir si elles ne sont pas correctement protégées. Par ailleurs, les réparations sur les composites peuvent s'avérer plus complexes que sur les métaux, nécessitant un savoir-faire spécifique.

Malgré ces défis, les matériaux composites offrent une solution particulièrement intéressante pour les réservoirs de stockage lorsqu'une résistance à la corrosion et une légèreté sont requises. Leur adaptabilité, leur durabilité et leur performance en font une option de plus en plus privilégiée dans les domaines industriels, agricoles et environnementaux. [21]



Figure 2.8 Réservoir cryogénique multiple en carbone pour applications hydrogène aéronautique [21]



Figure 2.9 Réservoirs de déchets en matériaux composites avancés pour Boeing. [21]

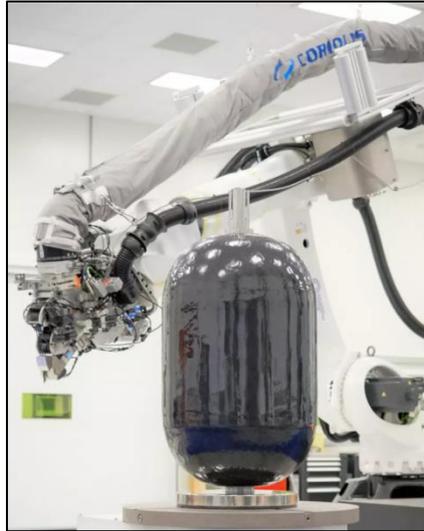


Figure 2.10 Réservoir spatial en composite [21]

2.3 Étude des réservoirs pour avion

L'étude des réservoirs de carburant destinés à l'aviation représente un domaine essentiel de la conception aéronautique. Ces réservoirs ne sont pas de simples contenants : ils sont intégrés dans une structure complexe où chaque gramme compte, chaque position influence le comportement de l'avion, et chaque matériau doit répondre à des exigences strictes. Cette section explore les configurations typiques des réservoirs d'avion ainsi que les contraintes techniques et fonctionnelles majeures liées à leur conception. [12]

2.3.1 Configurations typiques des réservoirs (réservoirs dans les ailes, fuselage, etc.)

Dans les avions modernes, plusieurs configurations sont possibles pour l'installation des réservoirs de carburant, selon la mission, le type d'appareil et les considérations de performance. Parmi les configurations les plus courantes :

❖ Réservoirs d'aile (wing tanks)

Ce sont les plus répandus. Intégrés dans la structure des ailes, ils permettent une répartition optimale de la masse et réduisent les contraintes sur la cellule. De plus, l'espace dans les ailes est souvent suffisant pour contenir une grande quantité de carburant.



Figure 2.11 Réservoir d'aile Boeing 737-800 [22]

❖ Réservoirs de fuselage (fuselage tanks)

Utilisés notamment dans les avions long-courriers ou militaires pour augmenter la capacité. Ils peuvent être placés dans des compartiments spécifiques du fuselage, voire sous forme de réservoirs amovibles

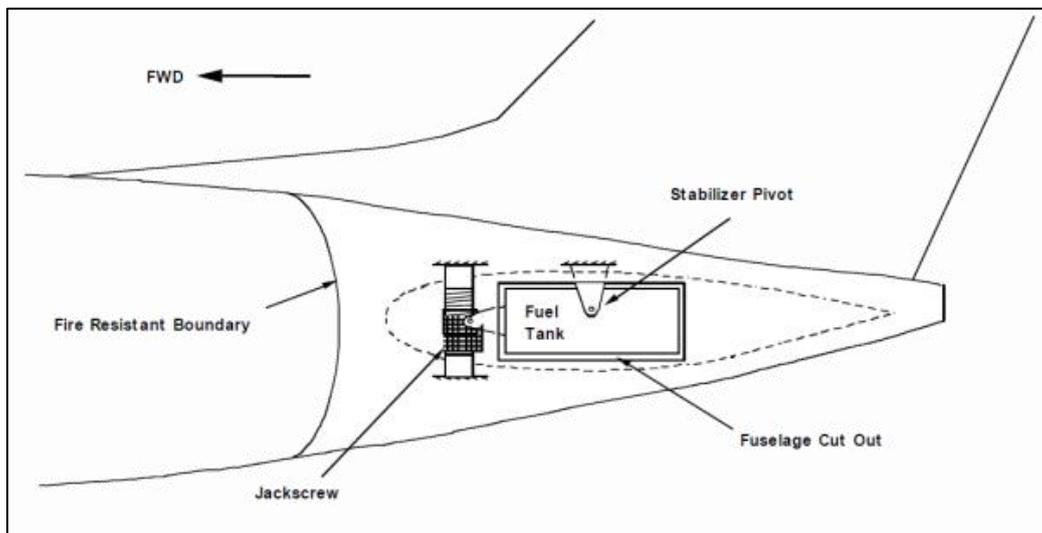


Figure 2.12 Réservoir de fuselage [22]

❖ Réservoirs auxiliaires ou externes

Utilisés dans certaines missions spécifiques (vols longue distance, missions militaires, etc.), ils sont souvent installés sous les ailes ou le fuselage et peuvent être largués en vol dans certaines configurations militaires.



Figure 2.13 Réservoirs De Carburant Externes à L'aile Du Jet Militaire [22]

Chaque disposition présente des avantages et des inconvénients en termes d'accessibilité, de sécurité, de performances et de complexité structurelle. [22]

2.4 Étude des réservoirs pour fusée

Dans le domaine spatial, les réservoirs de fusée constituent un élément essentiel du système de propulsion. Leur rôle principal est de stocker et d'alimenter les moteurs en ergols (carburant et comburant), dans des conditions extrêmement contraignantes. Ces réservoirs doivent fonctionner dans un environnement très hostile, ce qui influence fortement leur conception. [18]

2.4.1 Environnement extrême de fonctionnement

❖ Haute pression interne

Pendant le lancement, les réservoirs doivent résister à des pressions internes élevées dues à la pressurisation des ergols. Une rupture pourrait être catastrophique pour la mission.

❖ Vibrations mécaniques intenses :

Le décollage génère des charges dynamiques très élevées (vibrations, chocs), provenant des moteurs et de l'environnement acoustique. Les réservoirs doivent donc être mécaniquement robustes tout en restant légers.

❖ Températures extrêmes :

Les ergols cryogéniques (ex. : H₂ liquide, O₂ liquide) sont stockés à des températures pouvant atteindre -253 °C.

À l'inverse, certaines parties de la fusée peuvent subir des échauffements supérieurs à +100 °C à cause de la friction atmosphérique.

Il faut donc une excellente résistance thermique et une isolation efficace pour éviter la perte d'ergol par évaporation. [18]

2.4.2 Réservoirs pour carburants liquides

Ce sont les plus complexes d'un point de vue technologique.

- Structure : souvent dotés d'une double paroi et d'une isolation thermique.
- Fonctionnement : doivent maintenir les ergols à l'état liquide jusqu'à leur combustion.
- Systèmes associés : capteurs de niveau, soupapes de pressurisation, dispositifs anti-sloshing (pour limiter les mouvements de fluide).

Exemples :

- Réservoir d'hydrogène liquide du Space Launch System (SLS – NASA)
- Réservoir d'oxygène liquide d'Ariane 5

- Avantages :
 - Haute performance énergétique
 - Possibilité de réguler la poussée
- Inconvénients :
 - Systèmes plus lourds et plus complexes
 - Besoin d'infrastructures de stockage cryogénique au sol [22]

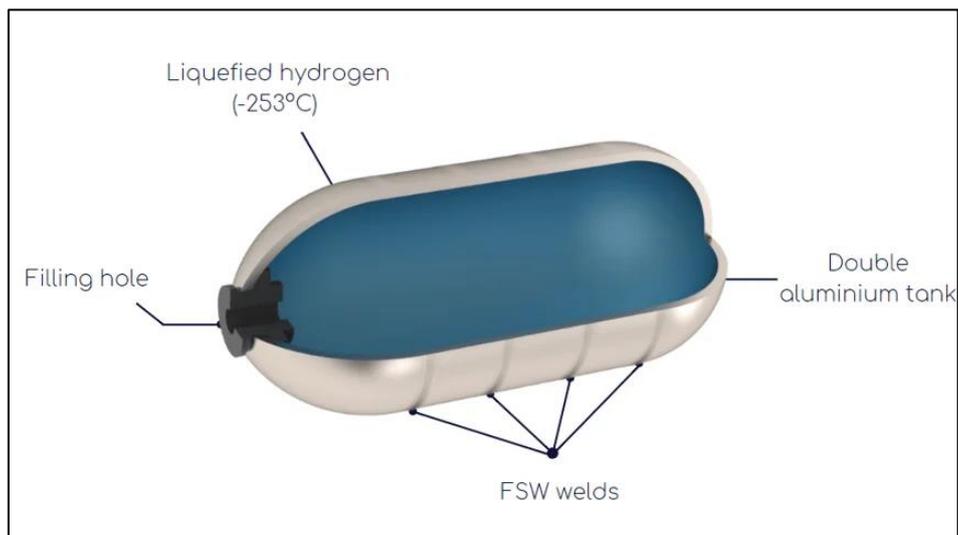


Figure 2.14 Réservoir cryogénique d'hydrogène [22]

2.4.3 Réservoirs pour carburants solides

Dans ce cas, le combustible et le comburant sont mélangés sous forme solide et coulés directement à l'intérieur du moteur.

- Structure : le réservoir est en réalité l'enveloppe du moteur.
- Fonctionnement : une fois allumé, le moteur brûle tout l'ergol sans possibilité d'arrêt.

Exemples :

- Propulseurs d'appoint à poudre du lanceur Ariane 5
- SRBs de la navette spatiale américaine
- Avantages :
 - Simplicité de stockage et de manipulation

- Densité énergétique élevée
- Moins sensibles aux fuites ou à l'évaporation
- Inconvénients :
 - Aucune possibilité de contrôle ou d'arrêt une fois allumés
 - Moins de flexibilité dans la mission [22]

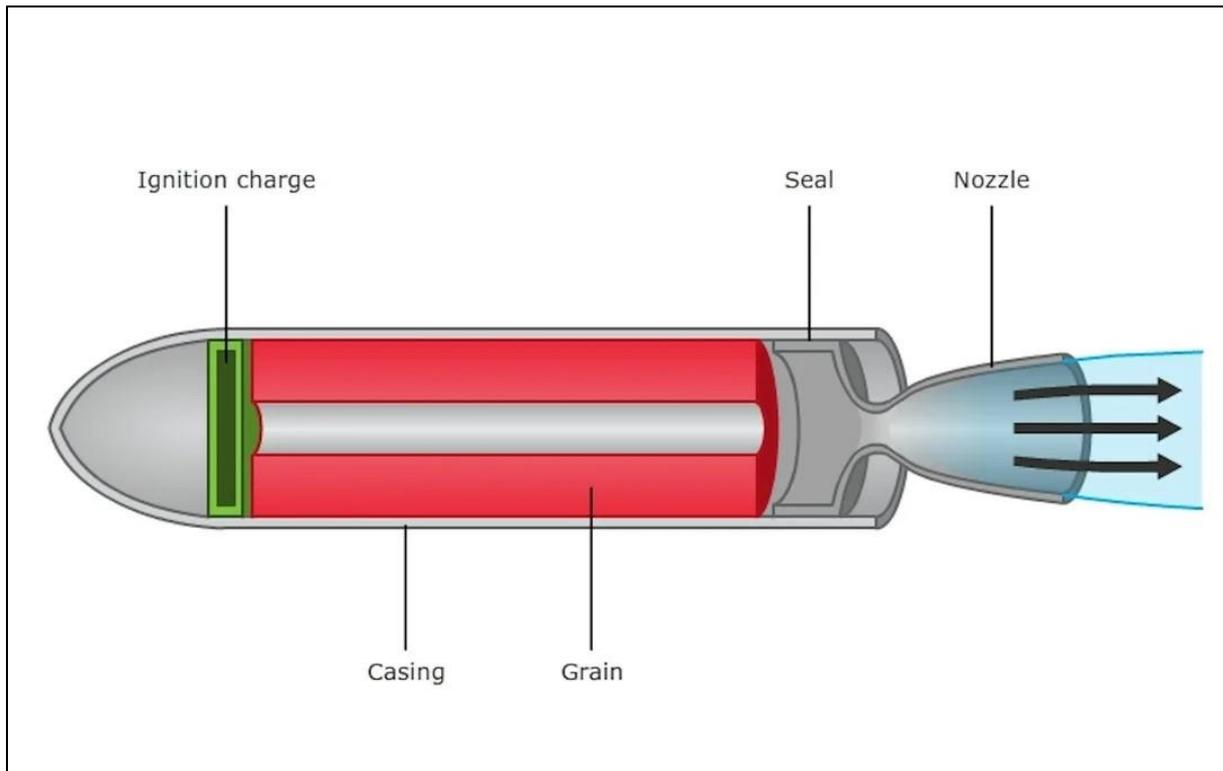


Figure 2.15 Schéma pédagogique d'un moteur à ergol solide [22]

2.5 Conclusion

À travers cette étude, nous avons compris que les réservoirs de carburant jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des avions et des fusées. Bien plus que de simples contenants, ce sont des systèmes complexes conçus pour répondre à des conditions extrêmes de température, de pression, de vibrations et de sécurité.

Dans l'aviation, les réservoirs sont souvent intégrés dans les ailes ou le fuselage. Ils doivent être à la fois légers, solides, et résistants au feu ou aux fuites. Le choix des matériaux est donc très important : on utilise souvent de l'aluminium, du titane, ou même des matériaux

composites comme la fibre de carbone. Ces choix permettent de gagner du poids tout en assurant une bonne sécurité et une longue durée de vie.

Du côté spatial, les réservoirs sont encore plus spécialisés. Pour les fusées à carburant liquide, on utilise des réservoirs cryogéniques capables de garder des gaz comme l'hydrogène ou l'oxygène à des températures extrêmement basses. Ces réservoirs doivent résister aux énormes contraintes du décollage et des variations thermiques. Pour les fusées à carburant solide, le carburant est directement moulé à l'intérieur du réservoir, qui devient alors à la fois un conteneur et une chambre de combustion. Cela nécessite des matériaux très robustes, souvent avec des renforts thermiques.

En résumé, que ce soit pour l'aviation ou l'exploration spatiale, la conception des réservoirs est un domaine stratégique. Elle combine performance, légèreté, résistance et sécurité. Grâce aux avancées en matériaux et en techniques de fabrication, les réservoirs deviennent de plus en plus fiables et efficaces, contribuant ainsi aux progrès rapides dans le domaine aéronautique et spatial.

Chapitre 3

Etude Théorique

3.1 Introduction

Dans le cadre de l'étude et de la conception des réservoirs pour les applications aérospatiales, une compréhension approfondie de leur comportement mécanique et dynamique est essentielle. Cela passe inévitablement par l'élaboration d'un modèle mathématique rigoureux permettant de représenter fidèlement la réalité physique du système étudié. Cette modélisation constitue une étape clé dans le processus d'analyse, car elle fournit les bases nécessaires pour simuler, évaluer et optimiser la performance des structures soumises à des conditions complexes.

La modélisation mathématique a pour objectif de traduire le comportement physique d'un réservoir (ou de tout autre composant structurel) en un ensemble d'équations mathématiques. Ces équations décrivent notamment la réponse de la structure aux sollicitations mécaniques, thermiques et dynamiques, telles que les efforts internes, les déformations, les contraintes vibratoires et les résonances.

Dans le contexte des structures minces comme les réservoirs en matériaux composites ou métalliques, cette modélisation s'appuie généralement sur les théories de l'élasticité, les équations différentielles du mouvement, ainsi que sur des méthodes numériques telles que les éléments finis (FEM). Elle permet notamment d'identifier les modes propres de la structure, de calculer ses fréquences naturelles de vibration, et de prédire les réponses dynamiques face à des excitations mécaniques, acoustiques ou aérodynamiques.

Par ailleurs, dans des environnements aussi exigeants que ceux rencontrés dans l'aéronautique ou l'astronautique, la modélisation doit également prendre en compte les effets multiphysiques, tels que la variation de température, la pression interne, ou encore la cryogénie dans le cas des réservoirs de carburants liquides. Ces facteurs influencent significativement les propriétés mécaniques des matériaux, et donc la fiabilité du modèle.

L'objectif de ce chapitre est donc double. D'une part, nous allons présenter les principales approches théoriques et numériques utilisées dans le domaine de la dynamique des structures pour l'analyse des réservoirs, en mettant l'accent sur les équations fondamentales et les méthodes de calcul. D'autre part, nous appliquerons ces outils à notre propre cas d'étude, afin d'analyser le comportement dynamique de nos réservoirs conçus dans les chapitres précédents.

Ce travail de modélisation permettra in fine de mieux anticiper les éventuels phénomènes critiques tels que les résonances mécaniques ou les instabilités, et de guider les choix de conception vers des solutions plus sûres, légères et performantes. [9]

3.2 Méthodes de calcul des modes propres et des fréquences naturelles

L'analyse modale constitue une étape essentielle dans l'étude dynamique des structures, notamment pour identifier les modes propres de vibration et les fréquences naturelles associées. Ces caractéristiques sont cruciales dans la conception des réservoirs, car elles permettent de prévenir les phénomènes de résonance, qui peuvent entraîner des défaillances structurelles.

3.2.1 Théorie de base de l'analyse modale

Une structure mécanique soumise à une excitation dynamique peut être modélisée comme un système discret à plusieurs degrés de liberté. L'équation du mouvement pour un tel système s'écrit généralement sous la forme matricielle suivante :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{0} \quad (3)$$

- \mathbf{M} est la matrice de masse (mass matrix),
- \mathbf{K} est la matrice de rigidité (stiffness matrix),
- $\mathbf{u}(t)$ est le vecteur des déplacements nodaux en fonction du temps,
- $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ est l'accélération nodale

Cette équation est valable dans le cas de vibrations libres non amorties.

3.2. Résolution du problème propre (problème aux valeurs propres)

En supposant une solution harmonique de la forme :

$$\mathbf{u}(t) = \Phi \cdot e^{i\omega t} \quad (4)$$

et en la remplaçant dans l'équation du mouvement, on obtient le problème aux valeurs propres suivant :

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (5)$$

où :

- ω est la fréquence naturelle (rad/s),
- ϕ est le vecteur propre (mode propre) associé.

La résolution de ce système fournit :

- un ensemble de valeurs propres , dont les racines carrées donnent les fréquences naturelles

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (6)$$

- les vecteurs propres , qui décrivent la forme de vibration pour chaque mode.

3.2.3 Construction des matrices de masse et de rigidité

Les matrices M et K sont construites en fonction de la discrétisation de la structure (éléments finis), des propriétés mécaniques des matériaux (module d'Young, masse volumique, géométrie), et des conditions aux limites.

- Matrice de masse M : peut être concentrée (lumped) ou consistante (consistent mass matrix). Elle exprime la distribution de la masse dans la structure.
- Matrice de rigidité K : exprime la résistance de la structure à la déformation élastique. Elle dépend des propriétés des éléments finis, comme les poutres, plaques ou coques utilisées dans le maillage.

3.2.4 Méthodes numériques de résolution

La résolution du problème aux valeurs propres peut être effectuée par différentes méthodes numériques, notamment :

- Méthode de Jacobi (pour petits systèmes),
- Méthode de la puissance inverse,
- Méthode QR,
- Méthode de Lanczos (très utilisée pour les grands systèmes issus des éléments finis),
- Méthode de Rayleigh-Ritz : méthode d'approximation basée sur des fonctions de forme,
- Méthode de sous-structuration modale (pour les assemblages complexes).

Ces méthodes sont souvent intégrées dans des logiciels de calcul (Ansys, Abaqus, Nastran), mais la compréhension de leur base théorique est indispensable pour interpréter les résultats correctement. [9]

3.2.5 Importance des conditions aux limites

Les conditions aux limites (encastrement, appuis simples, liaisons élastiques...) influencent fortement les fréquences naturelles. Un même réservoir pourra présenter des modes très différents selon qu'il soit fixé à une base rigide ou suspendu par des liaisons souples. [9]

3.2.6 Influence des paramètres physiques

Plusieurs paramètres influencent les résultats de l'analyse modale :

- La masse totale du réservoir (notamment si du carburant est présent ou non),
- La rigidité des matériaux, influencée par la température (notamment en cryogénie),
- La géométrie : épaisseur, rayon, longueur du cylindre ou du dôme,
- La présence de renforts structurels, nervures, ou cloisons internes. [9]

3.3 Exemple numérique : Cas d'un réservoir cylindrique de fusée en aluminium

Dans cette section, nous considérons un réservoir de forme cylindrique afin d'illustrer l'application des modèles mathématiques précédemment développés. La géométrie et les propriétés matérielles de le réservoir sont définies comme suit :

- Longueur (L) : 4894 mm
- Diamètre moyen (D) : 2504 mm
- Épaisseur (e) : 6 mm
- Matériau : Aluminium
- Module d'élasticité (E) : 96 GPa
- Coefficient de Poisson (ν) : 0.33
- Densité (ρ) : 2700 kg/m³

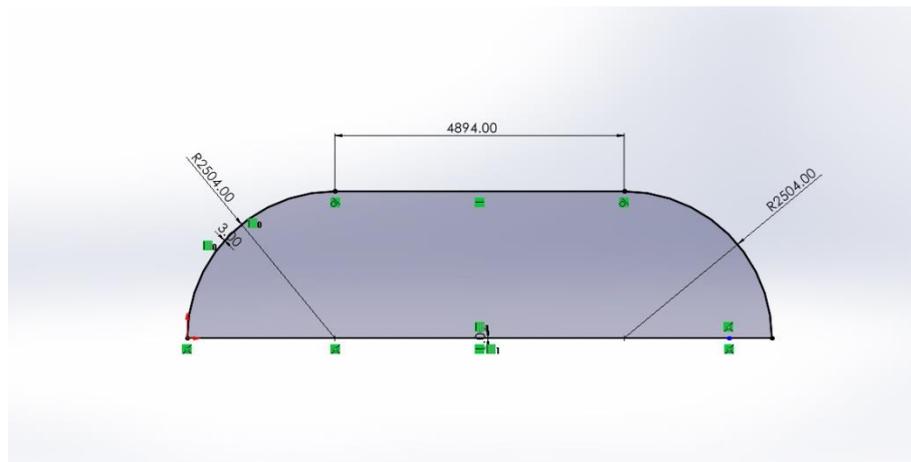


Figure 3.1 Réservoir cylindrique avant la révolution

- Les Conditions aux limites

Le réservoir cylindrique est encasté aux deux extrémités ($z = 0$ et $z = L$), ce qui impose des conditions d'immobilité sur les déplacements longitudinaux .De plus, une pression interne uniforme est appliquée sur la surface latérale, ce qui introduit une contrainte radiale .Ces conditions aux limites sont essentielles pour définir le comportement dynamique du réservoir lors de l'analyse modale.

Ces paramètres serviront à la construction des matrices de rigidité et de masse, ainsi qu'à la résolution du problème de vibrations libres pour déterminer les fréquences naturelles et les modes propres de la coque. L'utilisation d'un modèle axisymétrique linéaire est justifiée par la symétrie géométrique et la régularité des conditions aux limites dans ce cas d'étude. [11]

Les vibrations longitudinales sont produites dans la fusée. Les étapes pour déterminer la fréquence sont données ci-dessous.

$$K = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$M = \frac{\rho AL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Équation des éléments finis :

$$\{P\} = \{[K] - [m]\omega^2\}\{u\} \quad (9)$$

Résolution de l'équation pour déterminer ω (ω est la fréquence naturelle)

$$\text{Période (T)} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (10)$$

$$\text{Fréquence (f)} = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (11)$$

Où :

ρ = densité

A = aire de la section

L = longueur

$$\text{Det}([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad (12)$$

Après le calcul du déterminant, nous avons obtenu une équation .

Après avoir résolu cette équation du second degré, nous avons obtenu deux solutions.

$$X_1=2134164.933 \quad (13)$$

$$X_2=-96473 \quad (14)$$

La deuxième solution étant négative, elle a été écartée. Ainsi, la solution retenue est :

$$\omega_1 = \sqrt{X_1} \quad (15)$$

$$\omega_1 = 1460.87 \quad (16)$$

Donc :

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 232.62 \text{ Hz} \quad (17)$$

3.4 Exemple numérique : étude d'un profil d'aile (envergure = 10000 mm, corde = 2000 mm)

Dans cette section, nous allons appliquer la méthode des éléments finis pour l'étude des modes propres et des fréquences naturelles d'un profil d'aile. Les dimensions géométriques considérées sont : une envergure de 10000 mm (soit 10 m) et une corde de 2000 mm (soit 2 m). Le matériau utilisé est l'aluminium, caractérisé par un module d'élasticité $E = 96 \text{ GPa}$, un coefficient de Poisson $\nu = 0.33$, et une densité $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$.

- Les Conditions aux limites :

Le profil d'aile est encastré à l'emplanture ($x = 0$), ce qui impose une annulation complète des déplacements et des rotations, L'extrémité opposée ($x = L$) est libre, ce qui permet les déformations et les vibrations naturelles de la structure.

Ces conditions aux limites traduisent un comportement en console, typique des ailes d'avion ou des réservoirs intégrés dans une structure portante.

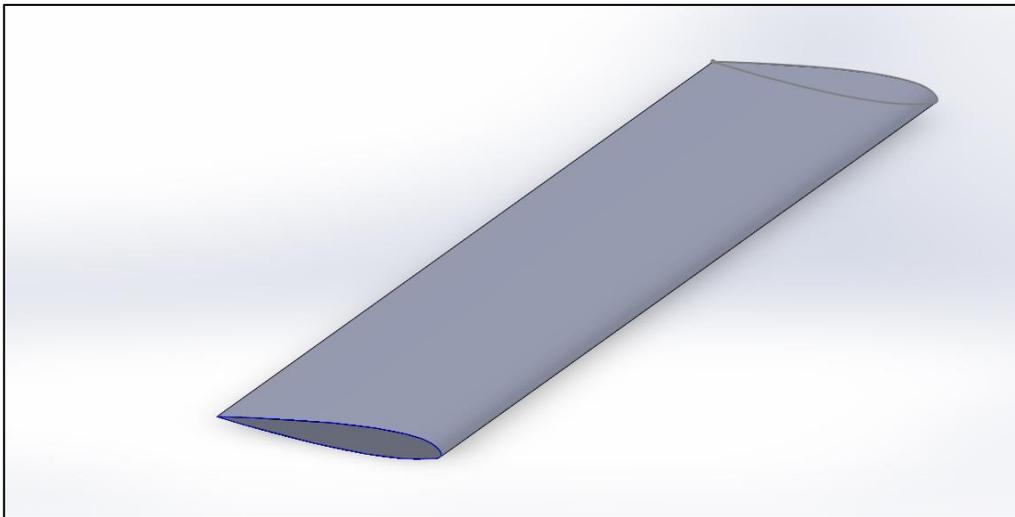


Figure 3.2 Profil d'aile

Pour un matériau isotrop :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ T_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Il suffit de généraliser la loi de Hooke introduite pour un matériau isotrope. Elle s'écrit classiquement en fonction du module d'Young et du coefficient de Poisson.

Avec les conditions de test (traction longitudinale pure) :

$$\sigma_{LL} \neq 0, \quad \sigma_{TT} = \tau_{LT} = 0 \quad (19)$$

Ce qui nous permet d'arriver à évaluer le coefficient de poisson et de cisaillement par des formules ci-dessous en utilisant des valeurs expérimentales :

$$S_{11} = \frac{\varepsilon_{11}}{\sigma_{11}} = \frac{1}{E} \quad (20) \quad S_{12} = \frac{-\nu}{E} \quad (21) \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (22)$$

Pour calculer les fréquences propres de pulsation on utilise la relation suivante :

$$W_n = \frac{a_n}{L^2} \sqrt{\frac{E.I}{\rho.S}} \quad (23)$$

$$\text{Et : } f_n = \frac{W_n}{2\pi} \quad (24)$$

Tableau 3.1 Fréquences naturelles calculées Six premiers modes

| Mode | Fréquence (Hz) |
|------|----------------|
| 1 | 2.41 |
| 2 | 11.55 |
| 3 | 18.23 |
| 4 | 23.18 |
| 5 | 38.79 |
| 6 | 65.68 |

3.5 Conclusion

L'approche mathématique mise en œuvre a permis d'identifier les caractéristiques vibratoires des structures étudiées à travers la résolution du problème aux valeurs propres. En utilisant la méthode des éléments finis et les équations différentielles du mouvement, les fréquences naturelles ont été déterminées pour différentes géométries et conditions aux limites.

L'analyse modale obtenue fournit des informations essentielles pour la compréhension du comportement dynamique, notamment en ce qui concerne les modes de vibration dominants. Les résultats obtenus confirment la fiabilité des formulations théoriques et leur capacité à prédire le comportement vibratoire des structures soumises à des sollicitations longitudinales.

Chapitre 4

Simulation numérique et outils logiciels

4.1 Introduction

La simulation numérique constitue aujourd'hui un outil incontournable dans le domaine de l'ingénierie, permettant de modéliser et d'analyser des phénomènes physiques complexes de manière efficace et économique. Grâce à l'évolution rapide des logiciels de calcul scientifique et des capacités de traitement informatique, il est désormais possible de prédire le comportement de structures soumises à divers types de sollicitations, avec un degré élevé de précision et de fiabilité. L'approche numérique s'impose donc comme une solution performante pour explorer virtuellement des scénarios physiques difficiles à reproduire expérimentalement ou nécessitant des moyens matériels coûteux.

Dans le cadre de ce travail, la simulation a été utilisée comme une méthode complémentaire à l'approche théorique pour mieux appréhender les phénomènes vibratoires affectant différents types de structures, notamment les profils d'aile et les enveloppes cylindriques. L'objectif fondamental est de développer une représentation numérique fidèle des systèmes étudiés, en tenant compte des dimensions géométriques réelles, des propriétés mécaniques des matériaux, ainsi que des conditions aux limites spécifiques à chaque configuration. Cette représentation virtuelle permet ensuite d'effectuer des analyses modales afin d'identifier les fréquences naturelles et les modes propres de vibration.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour parvenir à une simulation fiable et représentative : la modélisation géométrique des structures, l'affectation des matériaux, l'application des conditions aux limites, le maillage, et enfin la définition des paramètres de calcul. Chacune de ces étapes doit être traitée avec rigueur pour assurer la qualité des résultats. Par ailleurs, le choix des outils logiciels adaptés revêt une importance capitale pour mener à bien ces tâches.

Dans ce contexte, plusieurs logiciels ont été mobilisés en fonction de leurs fonctionnalités spécifiques. SolidWorks a été utilisé pour la création des modèles géométriques en 3D avec précision. ANSYS et COMSOL Multiphysics, deux plateformes puissantes d'analyse par éléments finis, ont permis de réaliser les simulations numériques grâce à leurs modules avancés en mécanique des structures et dynamique des vibrations. Leur complémentarité a été exploitée pour explorer différentes approches de modélisation, affiner les hypothèses, et comparer les résultats obtenus.

L'ensemble de cette démarche vise à mettre en œuvre une chaîne de simulation cohérente, depuis la conception géométrique jusqu'à la préparation des modèles pour l'analyse numérique, tout en s'appuyant sur des outils industriels largement reconnus pour leur robustesse et leur fiabilité.

4.2 Logiciels utilisés

Dans le cadre de cette étude, la simulation numérique a constitué un pilier fondamental pour l'analyse et la compréhension du comportement du système mécanique étudié. Pour cela, plusieurs logiciels de modélisation, de conception et de simulation ont été mobilisés. Ces outils offrent une large gamme de fonctionnalités permettant de modéliser avec précision la géométrie, de définir les propriétés des matériaux, d'appliquer les conditions limites, et d'obtenir des résultats numériques pertinents, notamment dans le domaine des vibrations et de l'analyse modale.

Les logiciels utilisés dans ce travail sont : SolidWorks, ANSYS Workbench, et COMSOL Multiphysics. Chacun de ces programmes a été sélectionné en fonction de ses capacités spécifiques et de sa complémentarité avec les autres outils. Ci-dessous, une présentation détaillée de chacun d'eux ainsi que de leur rôle dans la chaîne de simulation.

4.2.1 SolidWorks : Conception et modélisation géométrique

SolidWorks est un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) développé par Dassault Systèmes. Il est aujourd'hui considéré comme l'un des outils les plus répandus dans les milieux industriels, académiques et de recherche pour la modélisation 3D de pièces mécaniques. Son interface conviviale et ses fonctionnalités avancées en font un choix privilégié pour les ingénieurs et les concepteurs.

Dans ce projet, SolidWorks a été utilisé pour :

- La création précise des modèles 3D des composants du système étudié, en respectant les dimensions réelles, les tolérances et les détails géométriques fins.
- L'assemblage de plusieurs pièces, permettant de représenter fidèlement la configuration fonctionnelle du mécanisme étudié.
- La vérification des interférences et du fonctionnement mécanique de l'ensemble avant toute simulation.

- L'exportation du modèle vers d'autres plateformes de simulation, notamment ANSYS et COMSOL, via des formats neutres comme STEP ou IGES assurant une compatibilité optimale.

L'un des grands avantages de SolidWorks réside dans sa facilité d'utilisation et sa rapidité à générer des conceptions complexes. Cependant, ses capacités de simulation restent limitées aux cas simples, et ne permettent pas une analyse vibratoire approfondie. Ainsi, il sert essentiellement de point de départ dans le processus global de simulation. [15]

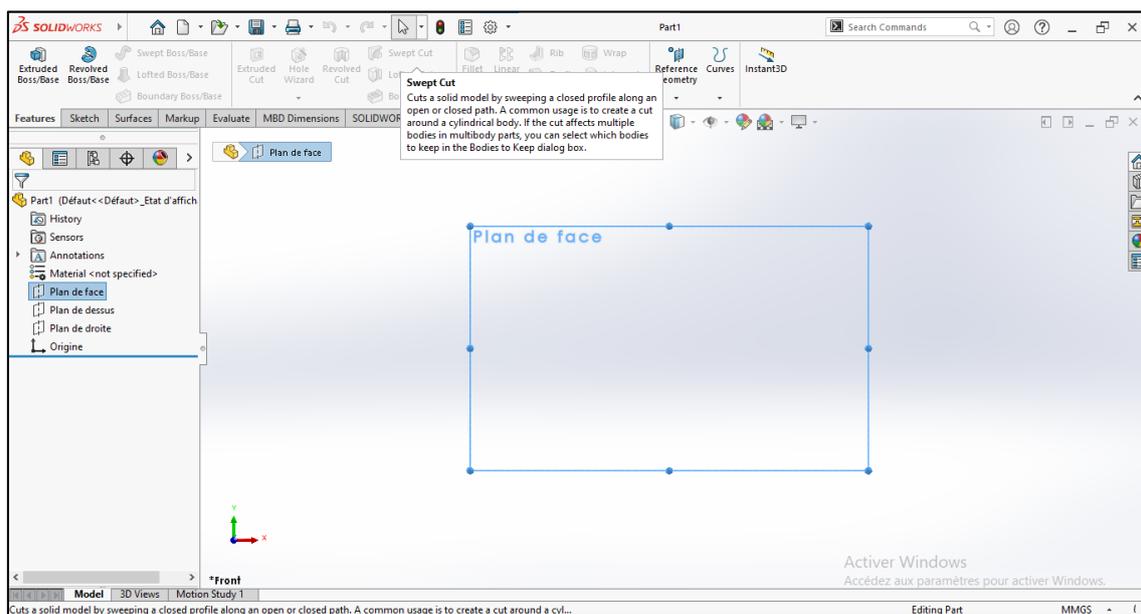


Figure 4.1 Espace de travail vide dans SolidWorks au lancement du projet

4.2.2 ANSYS Workbench

ANSYS est un logiciel de simulation numérique de référence dans le monde de l'ingénierie. Il repose sur la méthode des éléments finis (FEM), une approche mathématique puissante permettant de résoudre des problèmes complexes de mécanique des solides, de thermique, de fluides, ou encore d'électromagnétisme. ANSYS Workbench constitue la plateforme intégrée qui centralise tous les modules de calcul et facilite la gestion des projets.

Dans cette étude, ANSYS a été utilisé principalement pour :

- L'importation des géométries 3D créées sur SolidWorks, en s'assurant que le maillage est bien adapté à la topologie des pièces.

- La génération de maillage de haute qualité, avec un contrôle précis sur la densité, la régularité et la forme des éléments finis, ce qui influence fortement la précision des résultats.
- La réalisation de l'analyse modale, permettant de déterminer les fréquences naturelles (propres) de vibration ainsi que les modes associés. Cette analyse est essentielle pour prévenir les phénomènes de résonance dans les systèmes mécaniques.
- L'application de conditions limites et de chargements physiques, reproduisant les contraintes auxquelles le système peut être soumis dans des conditions réelles de fonctionnement.
- Le post-traitement des résultats, avec des outils de visualisation permettant d'analyser les déformations, les amplitudes modales, et de mieux interpréter le comportement dynamique du système.

ANSYS est reconnu pour sa robustesse, sa précision et sa capacité à gérer des modèles complexes. Toutefois, son utilisation requiert une bonne maîtrise des concepts théoriques, ainsi qu'une certaine expérience en simulation numérique. [7]

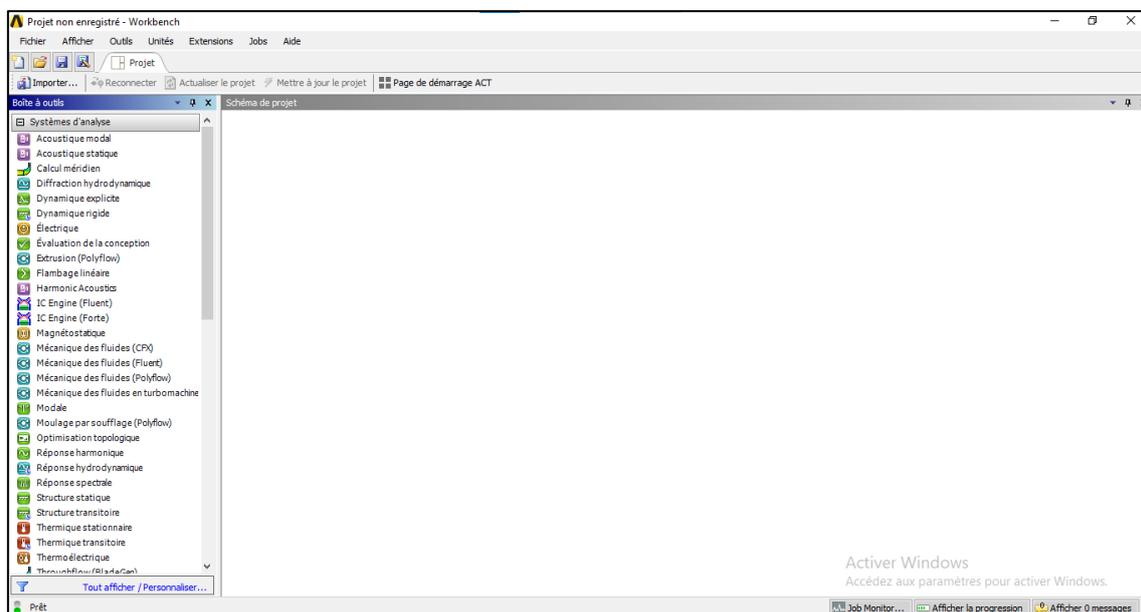


Figure 4.2 Espace de travail vide dans ANSYS au lancement du projet

4.2.3 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation avancé qui se distingue par sa capacité à coupler plusieurs phénomènes physiques dans une seule et même interface. Contrairement à d'autres logiciels qui se limitent à une seule physique, COMSOL permet de prendre en compte des interactions complexes entre différents domaines comme la mécanique, la thermique, l'acoustique, l'électromagnétisme, etc.

Dans le cadre de ce travail, COMSOL a été mobilisé pour :

- La modélisation complète des composants en 3D, avec possibilité de simplifier certaines géométries pour accélérer les temps de calcul sans sacrifier la précision.
- La définition des matériaux avec des propriétés complexes, incluant des comportements anisotropes ou dépendants de la température, si nécessaire.
- L'analyse fréquentielle, qui permet d'étudier la réponse du système soumis à des excitations harmoniques, d'obtenir les courbes d'amplitude en fonction de la fréquence, et d'identifier les résonances.
- La création d'études paramétriques, offrant la possibilité de faire varier certains paramètres (comme la masse, la raideur, ou la géométrie) afin d'évaluer leur impact sur les résultats obtenus.
- L'analyse de couplages physiques, dans les cas où le comportement mécanique dépendrait d'autres effets (par exemple, des charges thermiques ou des champs électromagnétiques)

COMSOL offre une grande flexibilité grâce à son interface basée sur les équations physiques, ce qui en fait un outil très puissant pour des études avancées. Cependant, son efficacité dépend fortement de la puissance de calcul disponible et de la rigueur dans la définition du modèle. [8]

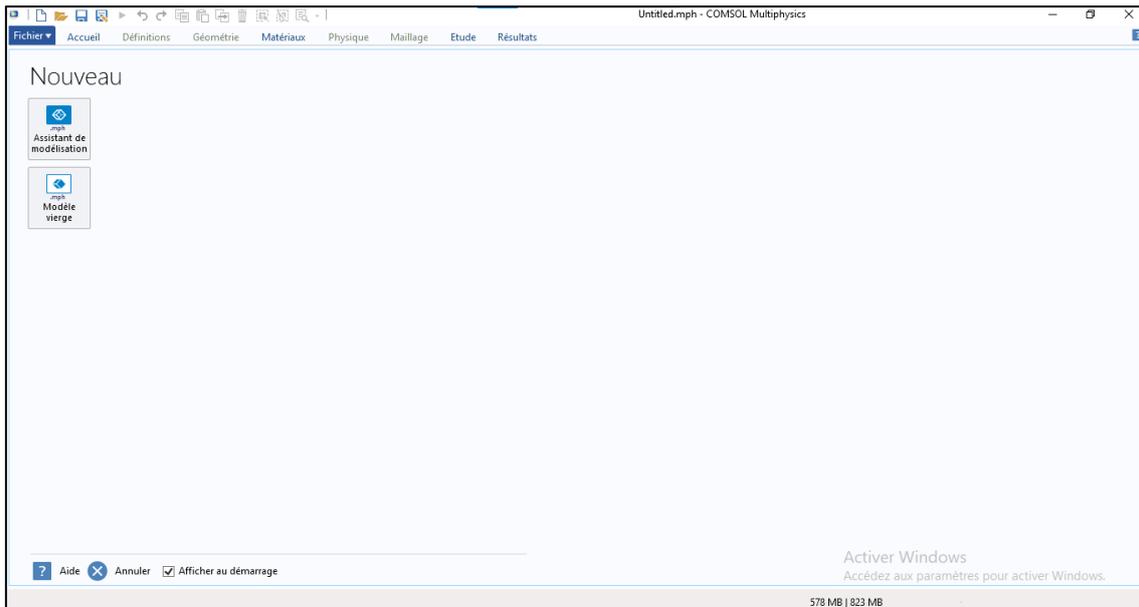


Figure 4.3 Espace de travail vide dans COMSOL au lancement du projet

4.3 Les Étapes de la simulation

Dans cette partie, nous allons illustrer les différentes étapes suivies pour effectuer la simulation numérique. Le processus commence par la modélisation géométrique de la pièce à l'aide du logiciel SolidWorks, puis se poursuit par son importation et son exploitation dans les environnements de simulation ANSYS et COMSOL. À travers des captures d'écran représentatives, nous mettrons en évidence les différentes phases du travail réalisé, depuis la création du modèle jusqu'à la configuration des paramètres de simulation.

4.3.1 Création du modèle géométrique sous SolidWorks

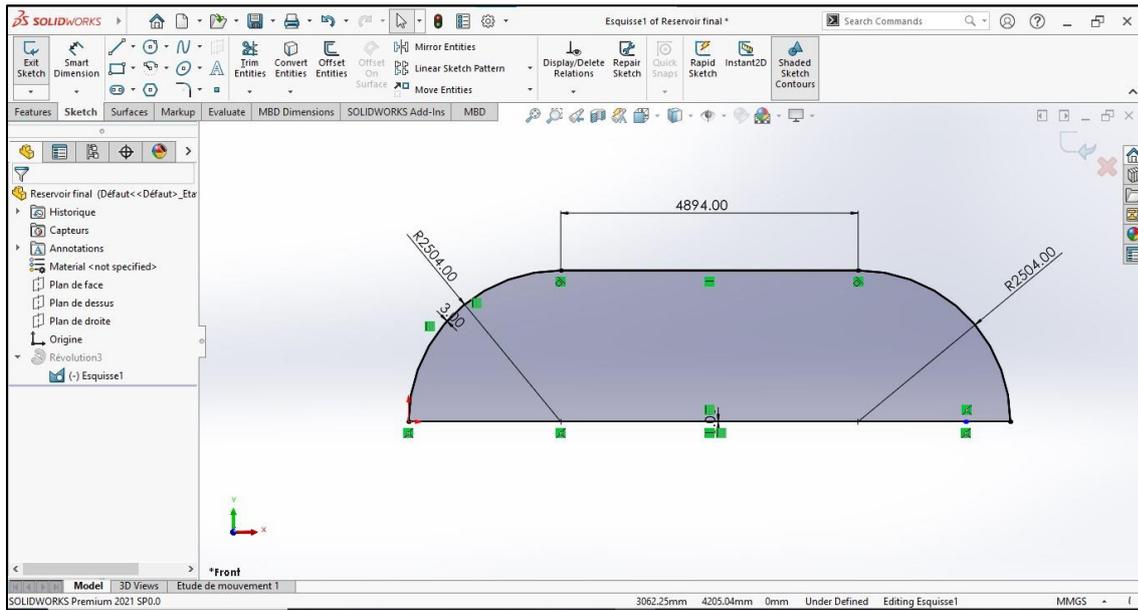


Figure 4.4 Esquisse initiale du réservoir sur SolidWorks (avant révolution)

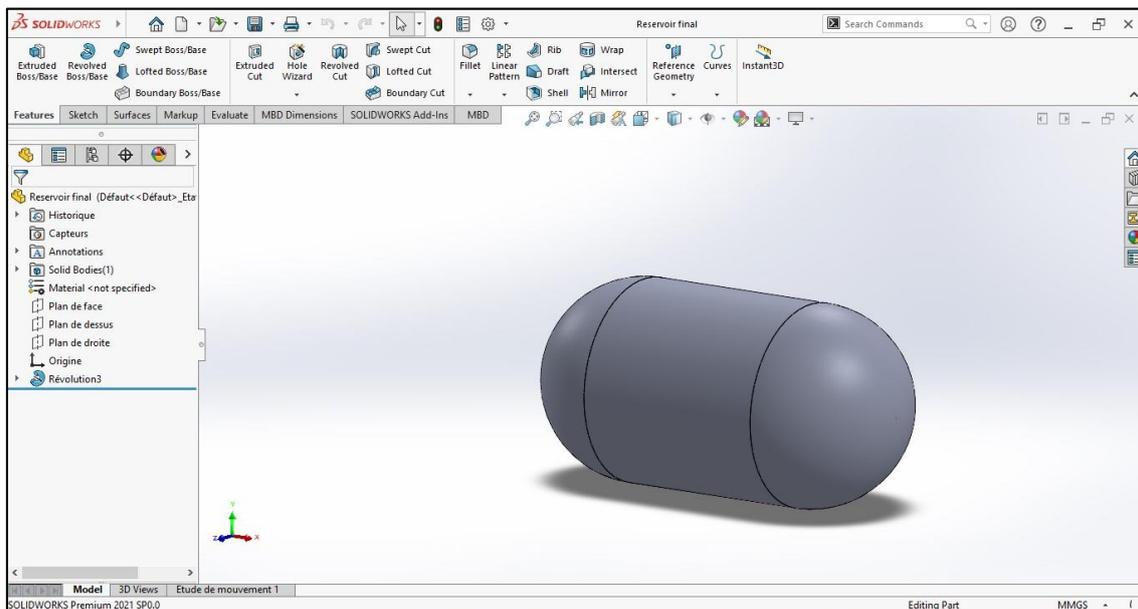


Figure 4.5 Vue du réservoir généré par révolution du profil sur SolidWorks

Après la modélisation complète du réservoir sur SolidWorks, le fichier a été exporté au format STEP (.step), un format standard permettant l'échange de modèles 3D entre différents logiciels de simulation. Cette conversion a facilité l'importation du modèle dans les environnements ANSYS et COMSOL afin de poursuivre l'analyse.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les étapes de la simulation numérique effectuée sur le modèle du réservoir. Chaque étape sera expliquée en détail, en montrant comment le modèle a été traité dans les différents logiciels.

4.3.2 Simulation avec ANSYS

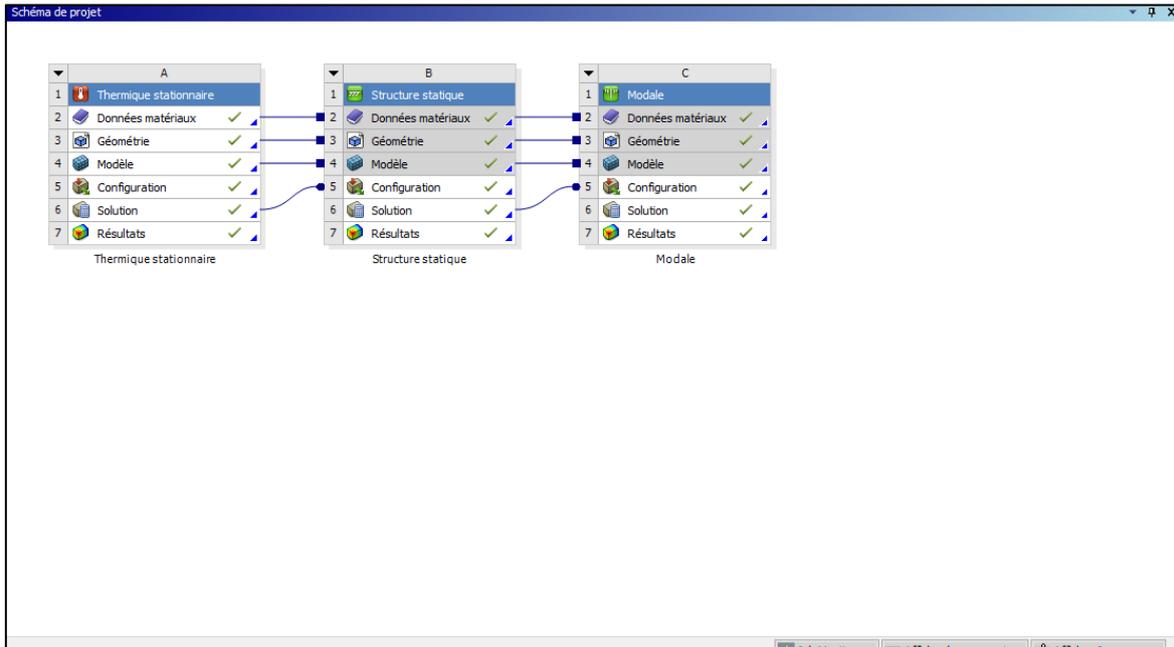


Figure 4.6 Schéma de projet ANSYS

On commence par une simulation thermique stationnaire afin d'appliquer une température uniforme sur l'ensemble du réservoir. Cette simulation permet d'analyser la répartition de la chaleur à l'intérieur du matériau et d'observer les éventuelles déformations ou contraintes thermiques résultant de cette sollicitation thermique constante. Cette étape est essentielle pour comprendre le comportement thermique initial du réservoir avant de passer à d'autres types d'analyses.

On entre dans les données de matériau et on choisit le matériau qu'on souhaite utiliser pour notre réservoir.

| Arborescence de Schéma A2, B2, C2 : Données matériaux | | | | | Table de Ligne de propriétés 2 : Alliage d'aluminium Variables de champ | | | | | |
|---|---|---|---|---|--|---|-----------------|-------|--------------------|-------------------------|
| | A | B | C | D | | A | B | C | D | |
| 1 | Contenu de Données matériaux | | | | Description | 1 | Nom de variable | Unité | Données par défaut | Limite inférieure |
| 2 | Material | | | | | 2 | Température | C | 22 | Contrôlé par le program |
| 3 | Alliage d'aluminium | | | | Alliage d'aluminium standard. Les propriétés en fatigue proviennent de MIL-HDBK-5H, page 3 -277. | 3 | Coefficient R | | -1 | Contrôlé par le program |
| * | Cliquez ici pour ajouter un nouveau matériau. | | | | | | | | | |

| Propriétés de Ligne d'arborescence 3 : Alliage d'aluminium | | | | | |
|--|---|-----------|--------------------|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Propriété | Valeur | Unité | | |
| 2 | Variables des champs matériaux | | | | |
| 3 | Masse volumique | 2770 | kg m ⁻³ | | |
| 4 | Coefficient isotrope sécant de dilatation thermique | | | | |
| 6 | Elasticité isotrope | | | | |
| 12 | Courbe S-N | Tabulaire | | | |
| 16 | Limite d'élasticité en traction | 2.8E+08 | Pa | | |
| 17 | Limite d'élasticité en compression | 2.8E+08 | Pa | | |
| 18 | Limite à la rupture en traction | 3.1E+08 | Pa | | |
| 19 | Limite à la rupture en compression | 0 | Pa | | |
| 20 | Conductivité thermique isotrope | Tabulaire | | | |

Figure 4.7 Données matériaux ANSYS

Après avoir importé le modèle et défini les propriétés du matériau, nous avons procédé à la génération du maillage. Pour cette étape, nous avons opté pour un maillage automatique en conservant les paramètres par défaut proposés par le logiciel. Ce choix a été fait dans le but d'obtenir un maillage équilibré assurant une bonne précision des résultats sans alourdir excessivement le temps de calcul.

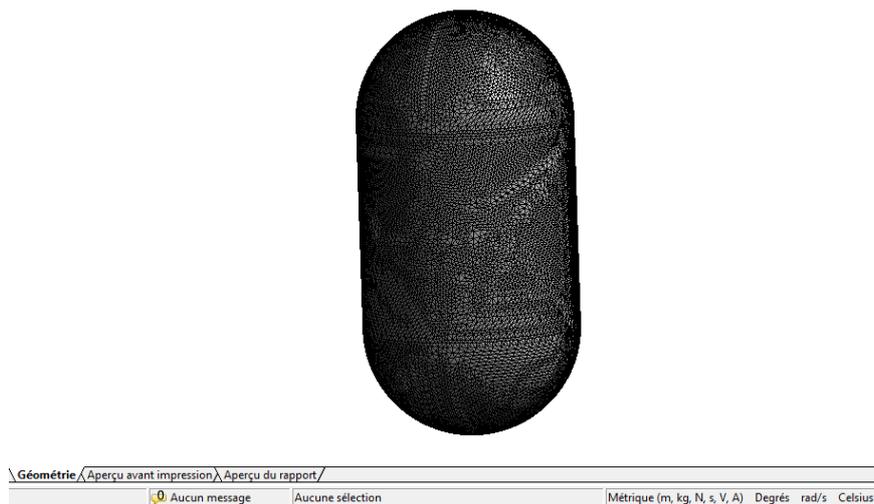


Figure 4.8 La génération du maillage

Nous introduisons la température souhaitée à appliquer sur le réservoir, tout en maintenant constante la température initiale définie au préalable, afin d'observer l'effet thermique sans altérer les conditions de départ du système.

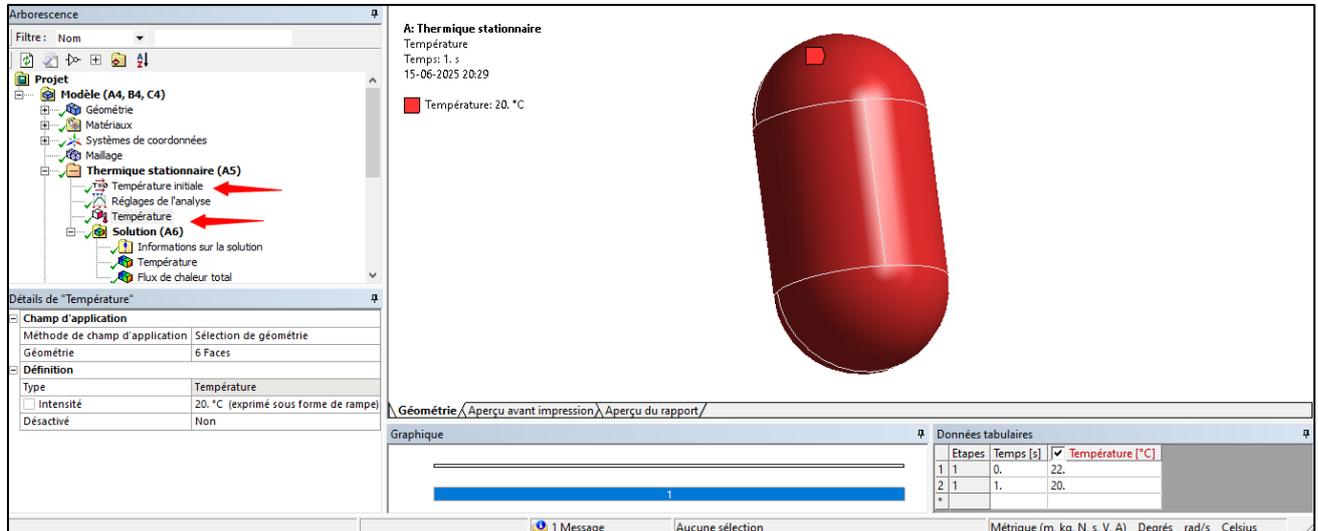


Figure 4.9 Définition de la température appliquée sur le réservoir

Après avoir défini les conditions thermiques nécessaires, nous procédons à la résolution de l'analyse thermique stationnaire. Une fois le calcul terminé, nous obtenons les résultats relatifs à la température ainsi qu'au flux de chaleur total, des données essentielles que nous allons exploiter dans les étapes suivantes de la simulation.

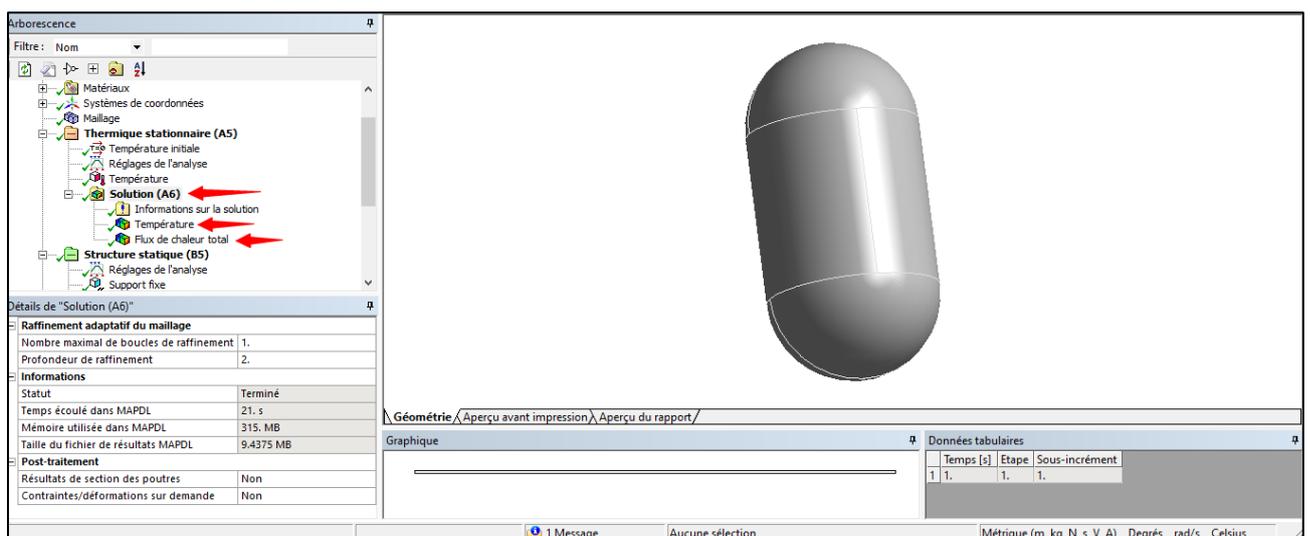


Figure 4.10 La résolution de l'analyse thermique stationnaire

Ensuite, une analyse structurelle statique est effectuée afin d'étudier la réponse mécanique du réservoir sous l'effet des charges thermiques précédemment appliquées. Cette simulation permet d'évaluer les déformations, les contraintes internes ainsi que les zones potentiellement critiques qui pourraient subir des dommages ou une fatigue prématurée. Même en absence de charges mécaniques externes, les effets thermiques peuvent induire des efforts internes importants qu'il est crucial de prendre en compte.

Dans l'analyse structure statique, nous avons commencé par définir une condition de support fixe afin de simuler l'immobilisation du réservoir. Pour cela, les deux extrémités du réservoir ont été fixées, ce qui permet de représenter de manière réaliste les contraintes mécaniques auxquelles il serait soumis dans des conditions réelles d'utilisation.

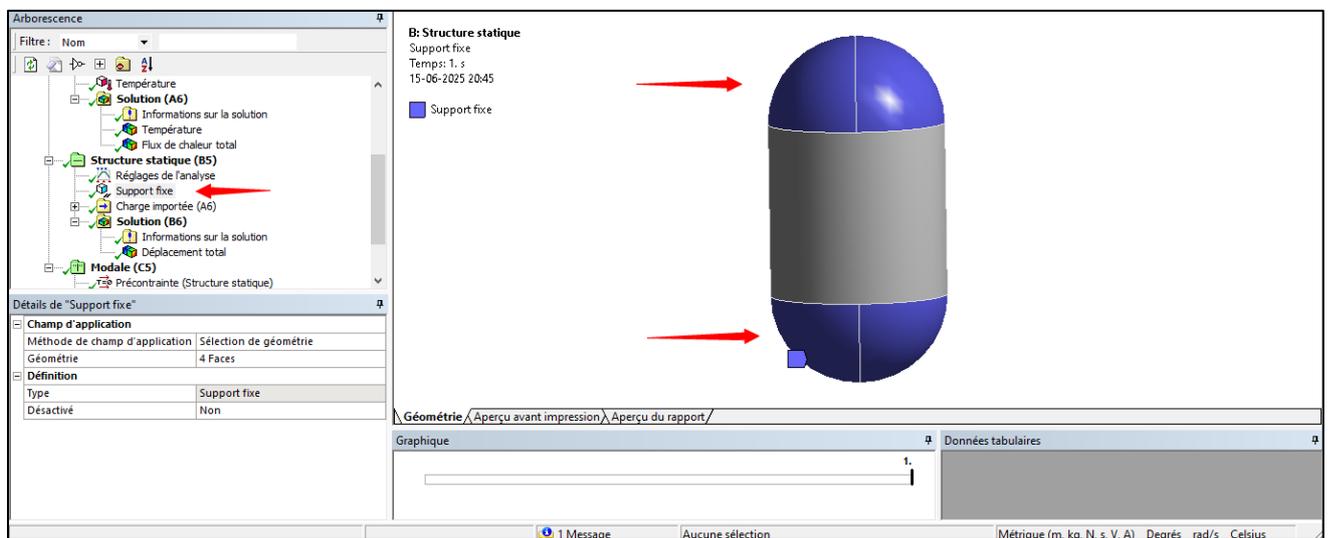


Figure 4.11 Application du support fixe sur le réservoir

À cette étape, nous introduisons la température du corps importé afin de transférer les résultats de la simulation thermique stationnaire, notamment la distribution de température obtenue, vers l'analyse structurelle statique. Cette opération permet de prendre en compte l'effet thermique sur le comportement mécanique du réservoir.

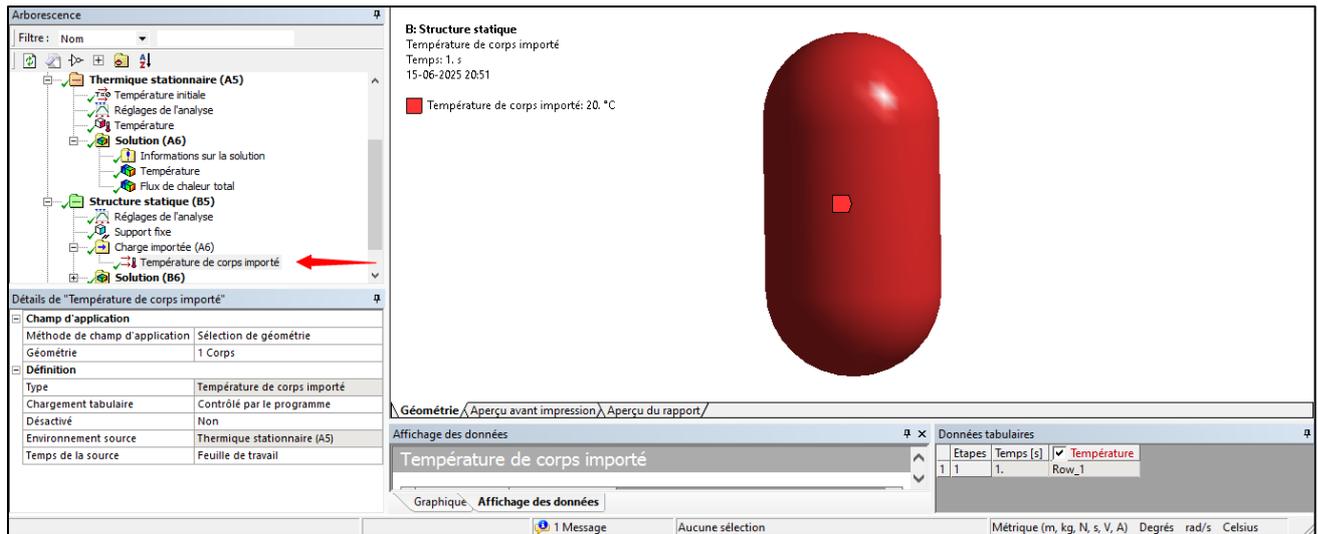


Figure 4.12 Insertion de la température du corps importé dans l'analyse structurelle

Maintenant, nous lançons le calcul de la solution de l'analyse structurelle statique afin d'obtenir le déplacement total du réservoir sous l'effet des contraintes thermiques.

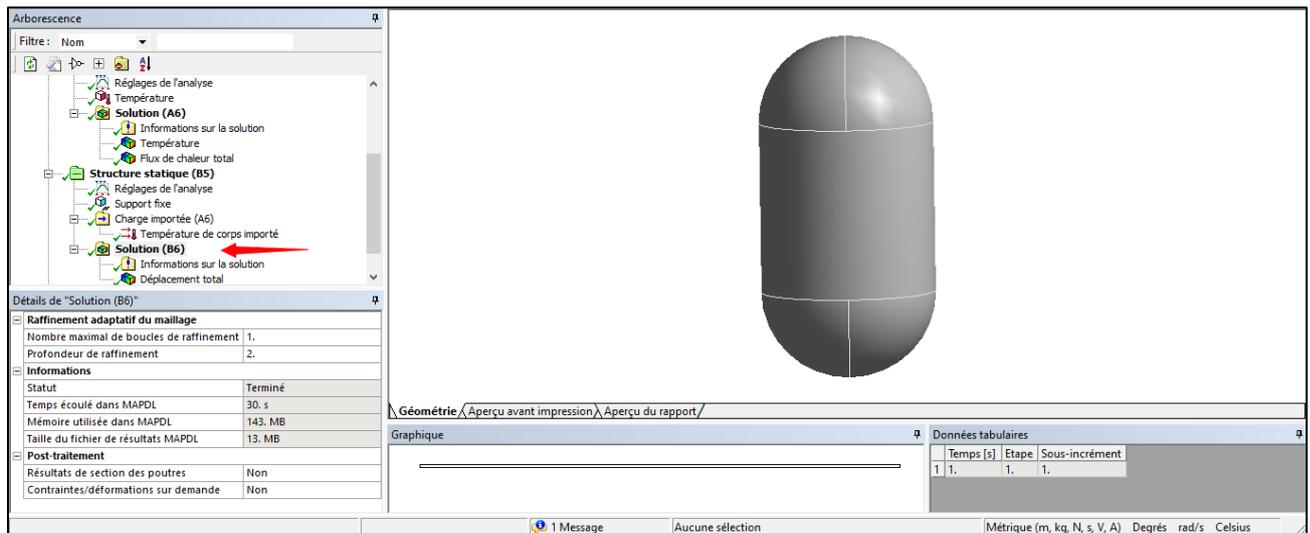


Figure 4.13 La résolution de l'analyse structurelle

Enfin, une analyse modale est réalisée dans le but d'identifier les différentes fréquences propres de vibration du réservoir. Cette étape permet de déterminer le comportement dynamique de la structure, ce qui est particulièrement important si le réservoir est soumis à des excitations mécaniques, thermiques ou environnementales pouvant entraîner des résonances. La connaissance des modes propres aide ainsi à prévenir des défaillances liées aux vibrations.

On résout directement pour déterminer les fréquences de vibration du réservoir.

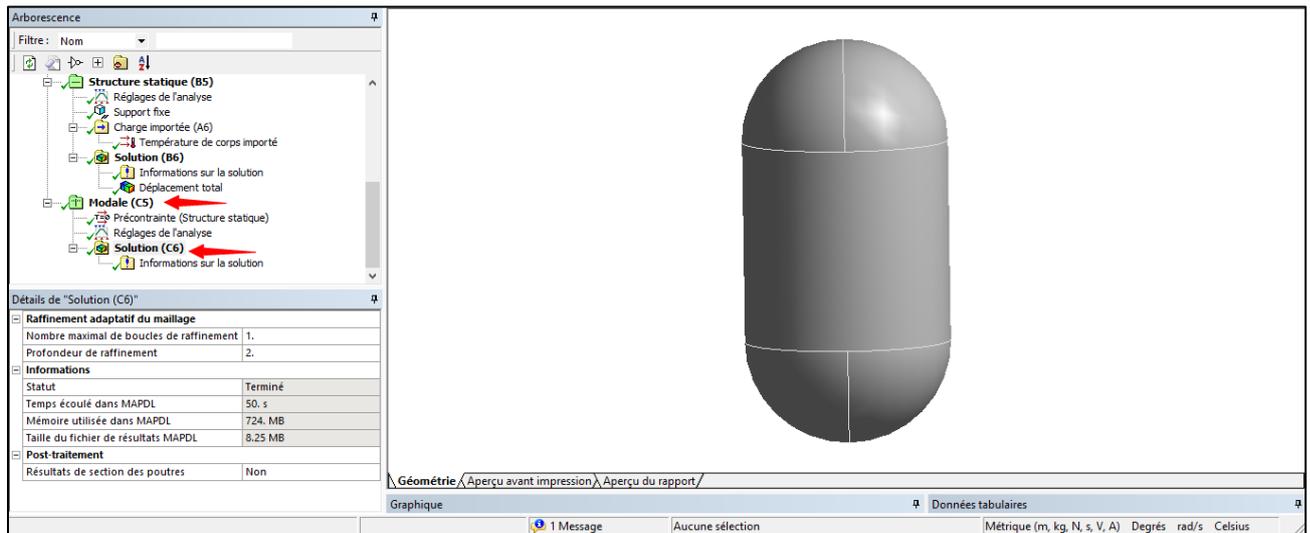


Figure 4.14 Analyse modale

- Cas de remplissage

Dans le cas de la simulation de remplissage du réservoir, on ajoute une masse distribuée représentant le poids du liquide contenu à l'intérieur. Par exemple, pour simuler un remplissage à 20 %, on applique seulement 20 % du poids total du liquide. De même, pour 40 %, 60 %, etc., on ajuste la valeur en fonction du taux de remplissage afin de représenter fidèlement l'état physique dans les calculs.

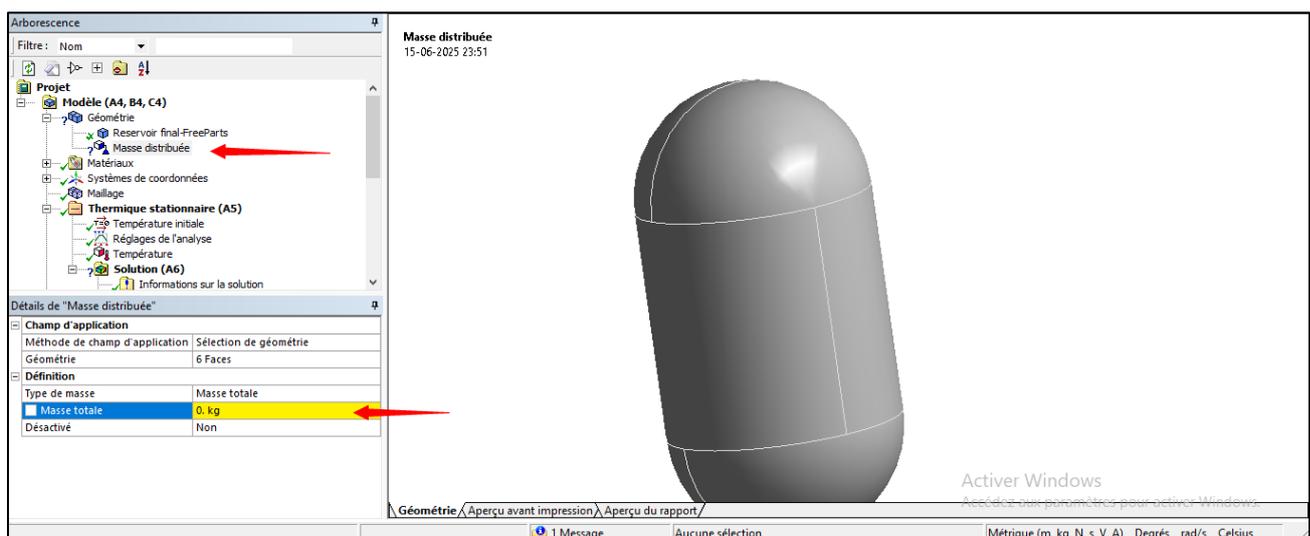


Figure 4.15 Cas de remplissage

4.3.3 Simulation avec COMSOL

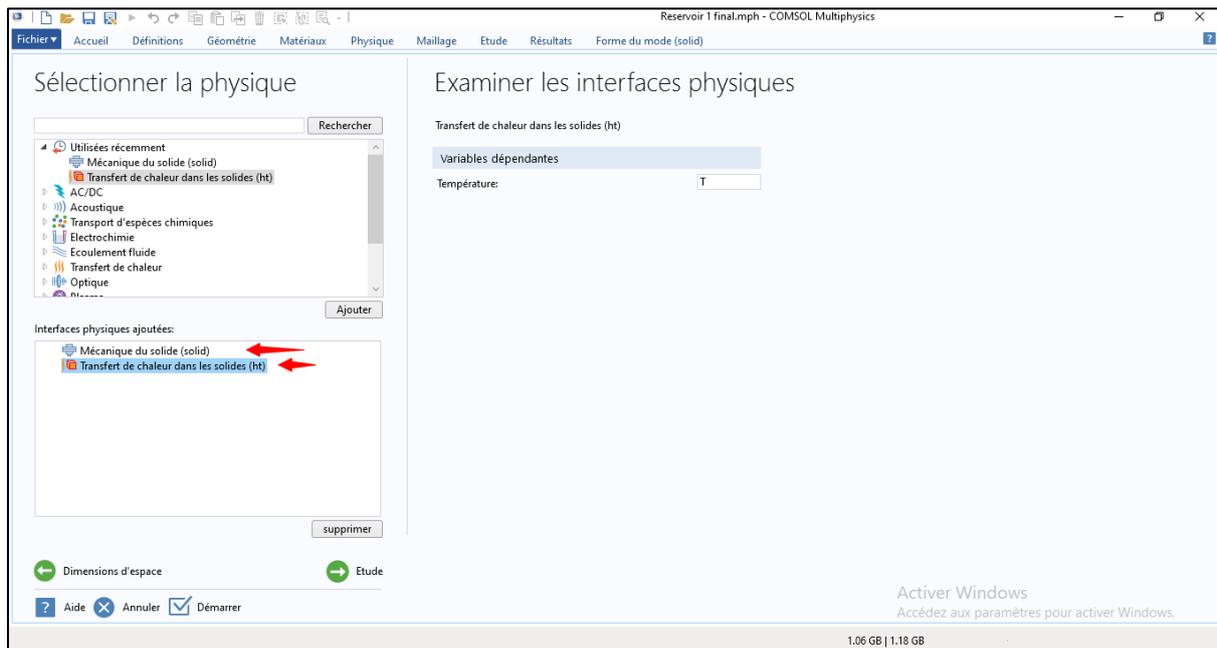


Figure 4.16 Schéma de projet COMSOL

Dans COMSOL, nous avons utilisé deux physiques principales : Mécanique du solide et Transfert de chaleur dans les solides, afin de simuler le même comportement que dans ANSYS. Cela nous permet de transférer la température appliquée au réservoir et d'analyser son effet mécanique de manière couplée.

Par la suite, nous accédons à la section Matériaux afin d'ajouter le matériau approprié pour notre simulation.

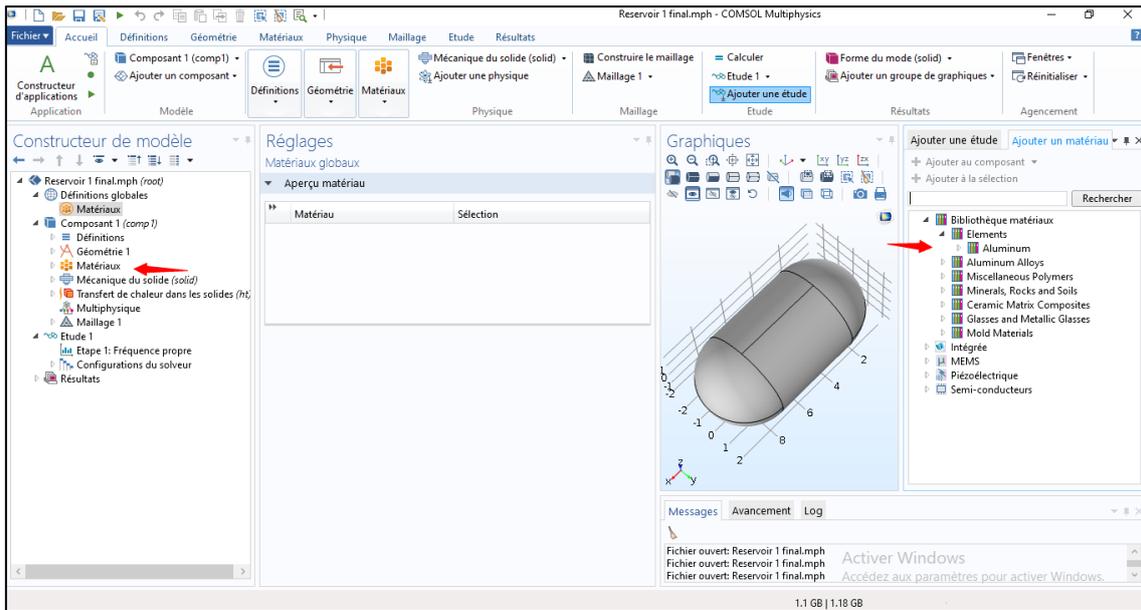


Figure 4.17 Ajouter le matériau sur COMSOL

Afin de représenter correctement les conditions aux limites mécaniques du réservoir, nous appliquons une condition d'Encastrement sur ses extrémités. Cette condition permet de fixer totalement les déplacements et rotations à ces zones, ce qui simule un ancrage rigide, similaire à celui appliqué dans le logiciel ANSYS.

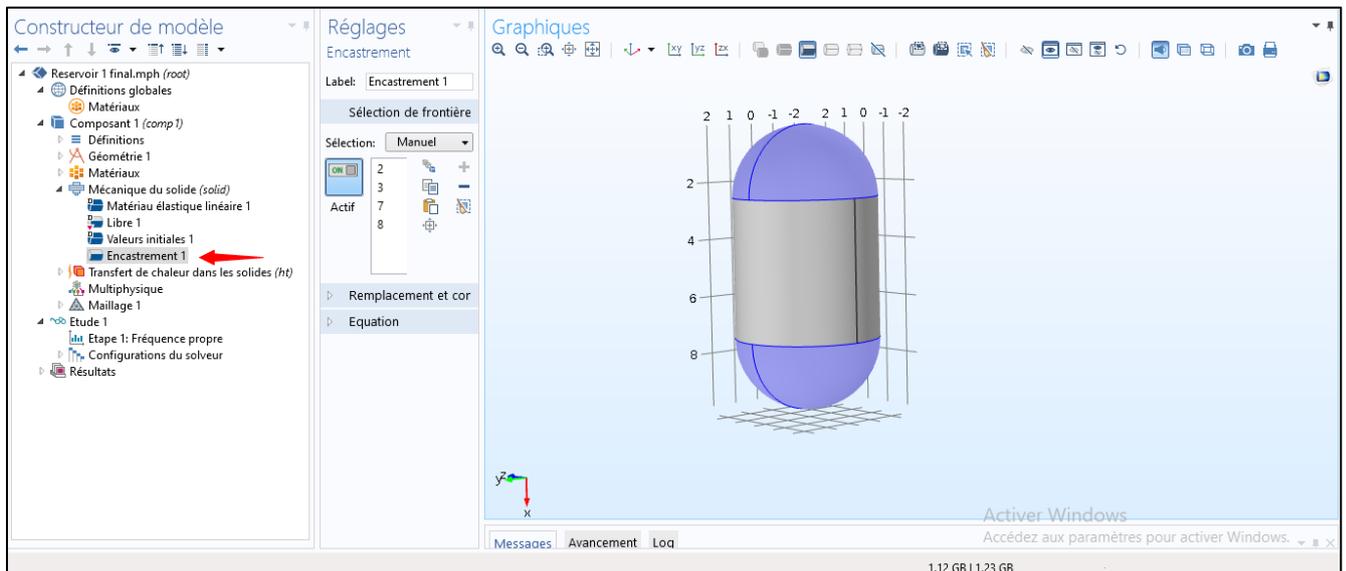


Figure 4.18 Fixer les extrémités du réservoir sur COMSOL

Nous accédons maintenant à la physique Transfert de chaleur dans les solides, où nous ajoutons la température souhaitée sur l'ensemble du corps tout en conservant la température initiale définie par défaut.

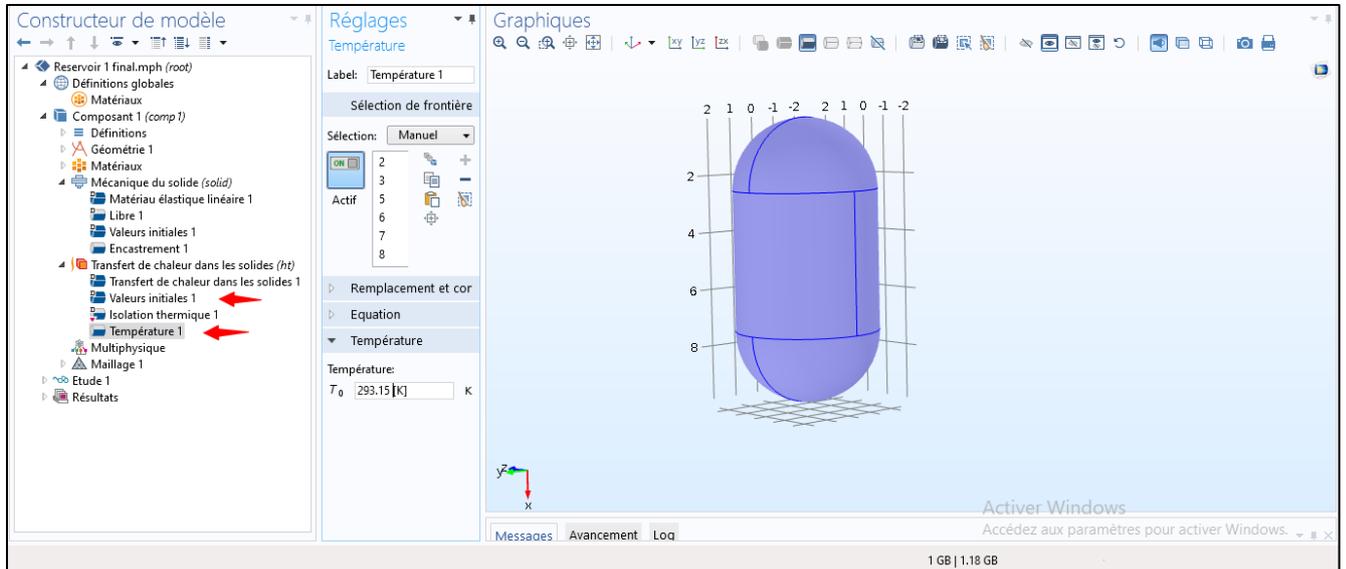


Figure 4.19 Ajouter la température dans COMSOL

Ensuite, nous accédons à la section Multiphysique afin d'ajouter un couplage thermique-mécanique, ce qui permet d'appliquer l'effet de la température sur le réservoir de manière réaliste.

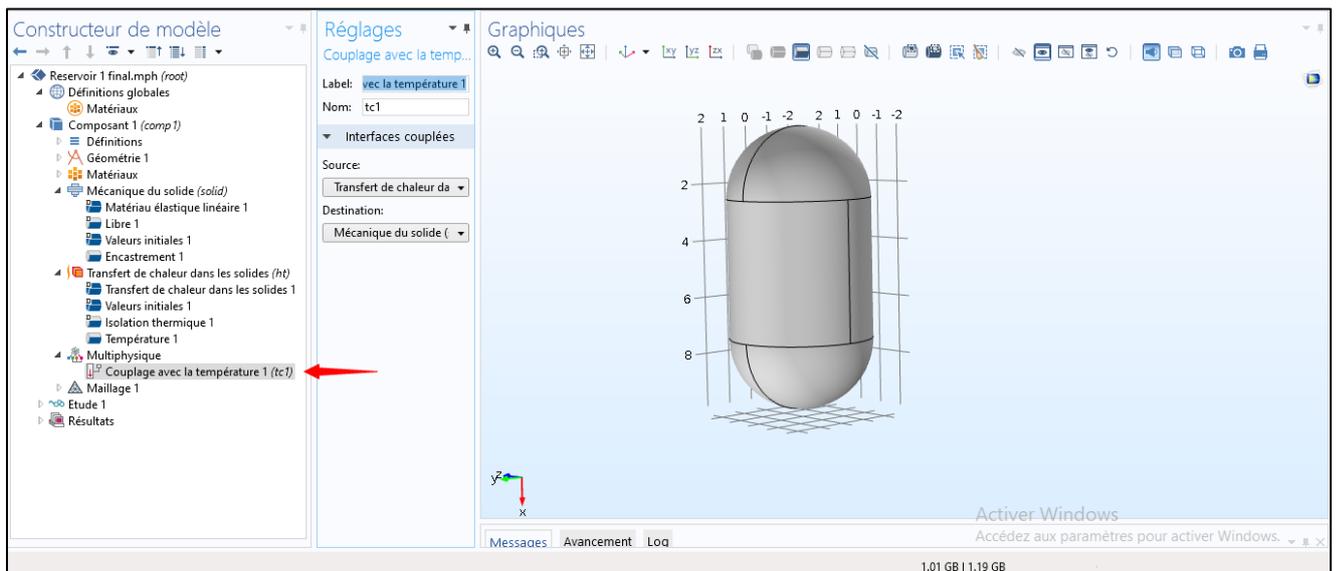


Figure 4.20 Couplage thermique-mécanique

Maintenant, nous passons à l'étape du maillage pour discrétiser le modèle et permettre la simulation des phénomènes physiques.

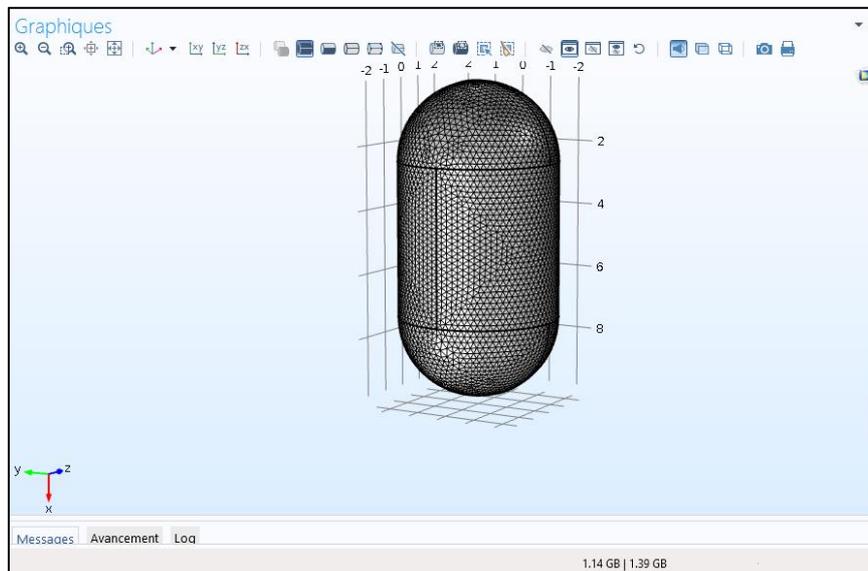


Figure 4.21 Maillage dans COMSOL

Ensuite, nous accédons à l'étude Fréquence propre et lançons le calcul afin d'obtenir les résultats des fréquences naturelles.

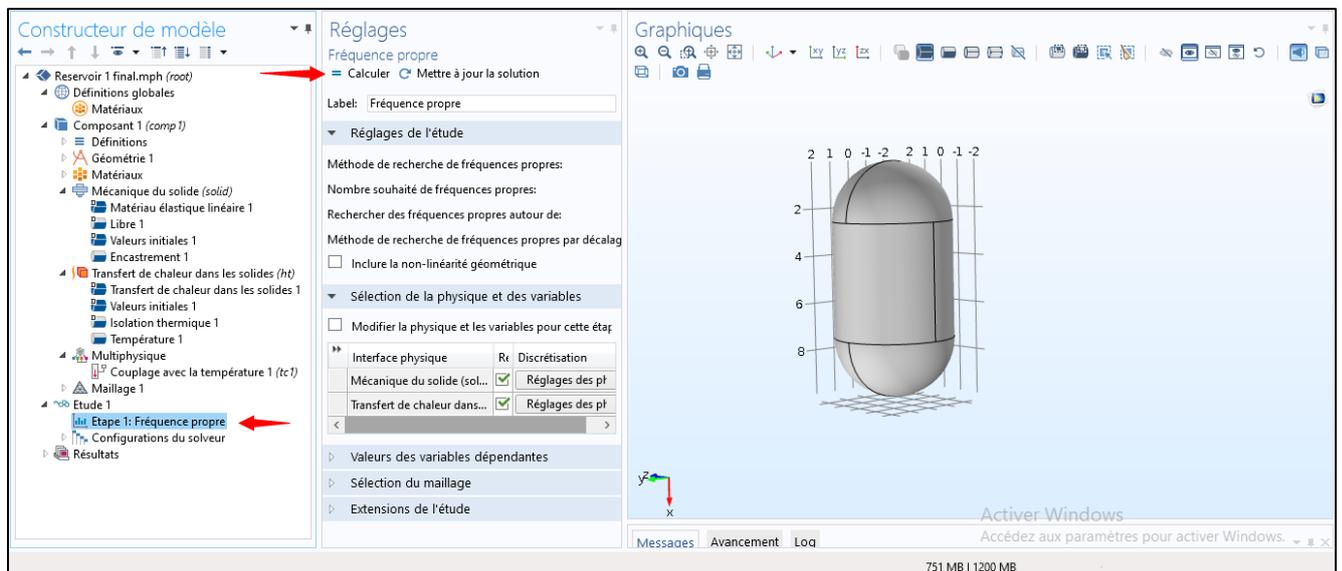


Figure 4.22 Calcul Fréquence propre dans COMSOL

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude numérique complète visant à simuler le comportement thermo-mécanique d'un réservoir soumis à des conditions réalistes. En combinant les capacités des logiciels ANSYS et COMSOL Multiphysics, nous avons pu modéliser les effets conjoints de la température et de la contrainte mécanique sur la structure.

La simulation a commencé par la mise en place de supports fixes pour représenter les conditions d'ancrage du réservoir, suivie par l'introduction d'une température appliquée au corps, permettant d'analyser les déformations totales générées dans un contexte de structure statique.

Ensuite, l'étude de la réponse en fréquence propre a permis d'évaluer les caractéristiques vibratoires fondamentales du système, élément indispensable pour comprendre son comportement dynamique de base.

Nous avons également pris en compte différentes situations de remplissage du réservoir en ajoutant des masses distribuées proportionnelles aux taux de remplissage (20 %, 40 %, etc.), ce qui a permis de mieux représenter l'influence de la masse interne sur la structure.

Grâce à l'approche multiphysique, nous avons pu coupler la température avec la mécanique des solides pour obtenir des résultats plus représentatifs du comportement réel. Cette méthode s'est montrée fiable et efficace pour anticiper les effets thermomécaniques et guider vers une meilleure conception du réservoir.

Chapitre 5

Résultats et commentaires

5.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude, plusieurs configurations géométriques ont été modélisées dans le but de représenter différents types de structures utilisées pour le stockage de carburant dans le domaine aérospatial. Trois formes principales ont été prises en compte : un réservoir de forme cylindrique, un autre de forme sphérique, ainsi qu'un profil d'aile creuse intégrant un volume interne destiné au stockage.

Le réservoir cylindrique, caractérisé par sa simplicité géométrique et sa facilité de fabrication, est couramment utilisé dans diverses applications industrielles et aéronautiques. Le modèle sphérique, quant à lui, est souvent privilégié pour sa capacité à répartir les contraintes de manière uniforme, ce qui en fait une solution avantageuse dans certaines configurations spécifiques. Enfin, le profil d'aile, conçu selon une section NACA, a été modélisé de manière à intégrer un réservoir interne, simulant une configuration réaliste d'un réservoir intégré dans une structure portante telle qu'une aile d'avion.

Chaque géométrie a été modélisée avec précision, en respectant les dimensions, proportions, et caractéristiques physiques appropriées. L'ensemble des modèles a été ensuite soumis aux différentes étapes d'analyse, permettant d'extraire les données nécessaires à l'étude comparative menée dans cette recherche.

5.2 Cas d'un réservoir de carburant cylindrique

Le réservoir de carburant cylindrique a été conçu à l'aide du logiciel SolidWorks, en s'inspirant des dimensions typiques utilisées dans les systèmes de propulsion des fusées. La géométrie modélisée présente un diamètre intérieur de 2504 mm, une longueur totale de 4894 mm, ainsi qu'une épaisseur de paroi de 6 mm. Ces dimensions ont été soigneusement sélectionnées afin de représenter une configuration réaliste, tout en permettant une analyse modale fiable. L'objectif principal de cette modélisation est d'étudier le comportement vibratoire du réservoir à travers l'évaluation de ses fréquences propres, en tenant compte de différents matériaux et conditions thermiques. Ce choix géométrique constitue une base cohérente pour comparer l'influence des paramètres physiques sur les modes de vibration naturels. [11]



Figure 5.1 : Réservoir de carburant cylindrique

5.2.1 Influence du matériau sur le comportement modal du réservoir cylindrique

L'effet du type de matériau sur la réponse modale du réservoir cylindrique a été étudié en considérant trois matériaux différents : l'aluminium, l'acier inoxydable et un composite à matrice époxy renforcée par des fibres de carbone tissées. Cette analyse vise à observer comment les propriétés mécaniques propres à chaque matériau influencent les fréquences propres et la distribution des modes vibratoires.

- Étude du matériau : Aluminium

Dans cette étude, Aluminium a été sélectionné comme matériau principal en raison de ses propriétés mécaniques intéressantes et de sa large utilisation dans les structures aéronautiques et spatiales. Les caractéristiques adoptées pour cet alliage sont un module de Young de 96 GPa, un coefficient de Poisson de 0,33 et une densité de 2700 kg/m³. Ces valeurs permettent de représenter fidèlement le comportement mécanique de ce matériau dans le cadre d'une analyse modale.

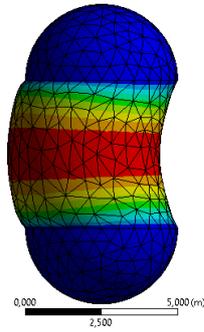
Tableau 5.1 Convergence du maillage

| Taille de maillage (mm) | Nombre d'éléments | Fréquence propre(Hz) |
|-------------------------|-------------------|----------------------|
| 2 | 48 000 | 256.84 |
| 1.5 | 60 000 | 256.91 |
| 1 | 71 000 | 256.96 |
| 0.7 | 95 000 | 256.96 |

ANSYS

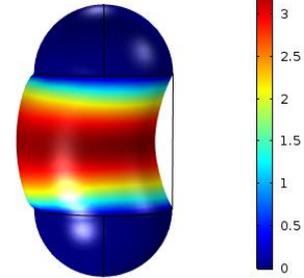
A: Modale
 Déplacement total
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 256,96 Hz
 Unité: m
 20/02/2025 18:31

0,0026353 Max
 0,0023425
 0,0020497
 0,0017569
 0,0014641
 0,0011712
 0,00087843
 0,00058562
 0,00029281
0 Min



f1= 256.96 Hz

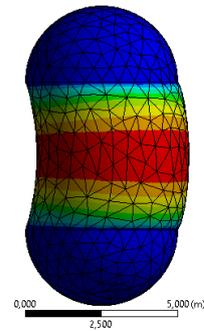
COMSOL



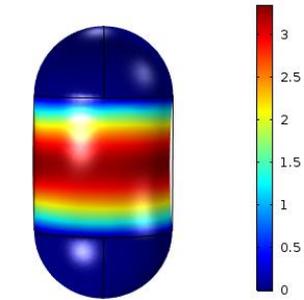
f1= 257.12 Hz

A: Modale
 Déplacement total 2
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 257,5 Hz
 Unité: m
 20/02/2025 18:32

0,0026378 Max
 0,0023447
 0,0020516
 0,0017585
 0,0014654
 0,0011724
 0,00087926
 0,00058618
 0,00029309
0 Min



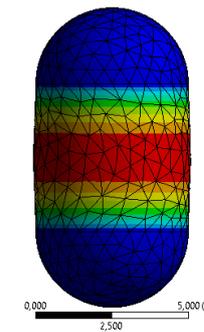
f2= 257.5 Hz



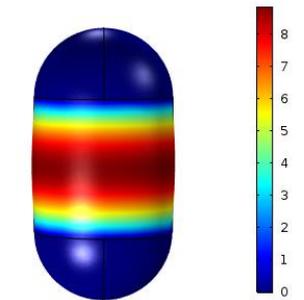
f2= 257.24 Hz

A: Modale
 Déplacement total 3
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 283,52 Hz
 Unité: m
 20/02/2025 18:33

0,0036595 Max
 0,0032529
 0,0028463
 0,0024397
 0,0020331
 0,0016265
 0,0012199
 0,00081333
 0,00040662
0 Min



f3= 283.52 Hz

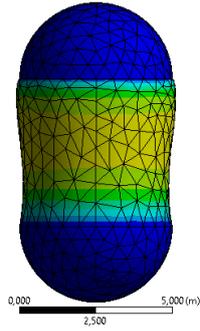


f3= 283.58 Hz

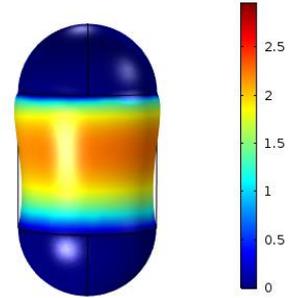
Chapitre 5 : Résultats et commentaires

A: Modale
Déplacement total 4
Type: Déplacement total
Fréquence: 420,37 Hz
Unité: m
20/02/2025 18:33

0,0026979 Max
0,0023981
0,0020984
0,0017986
0,0014988
0,0011991
0,00089931
0,00059954
0,00029977
0 Min



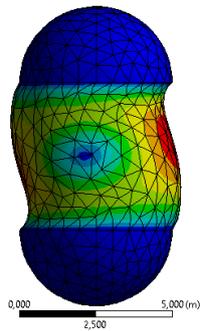
f4= 420.37 Hz



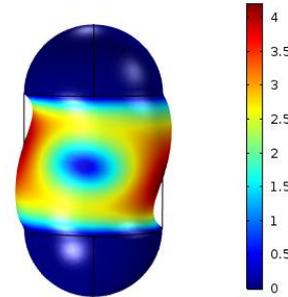
f4= 420.99 Hz

A: Modale
Déplacement total 5
Type: Déplacement total
Fréquence: 426,6 Hz
Unité: m
20/02/2025 18:36

0,0032049 Max
0,0028488
0,0024927
0,0021366
0,0017805
0,0014244
0,0010683
0,00071219
0,0003561
0 Min



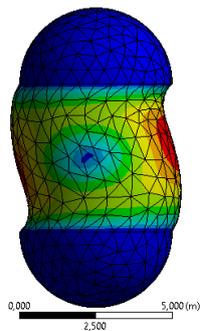
f5= 426.6 Hz



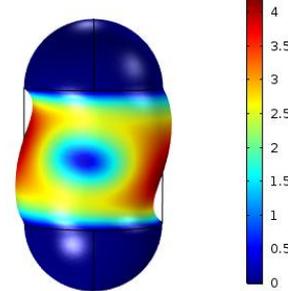
f5= 426.17 Hz

A: Modale
Déplacement total 6
Type: Déplacement total
Fréquence: 426,79 Hz
Unité: m
20/02/2025 18:35

0,0031668 Max
0,0028149
0,002469
0,0021112
0,0017593
0,0014075
0,0010556
0,00070373
0,00035186
0 Min



f6= 426.79 Hz



f6= 426.4 Hz

Tableau 5.2 : Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du réservoir de carburant cylindrique .

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERREUR(%) |
|------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 256.96 | 257.12 | 0.062 |
| 2 | 257.5 | 257.24 | 0.101 |
| 3 | 283.52 | 283.58 | 0.021 |
| 4 | 420.37 | 420.99 | 0.147 |
| 5 | 426.6 | 426.17 | 0.101 |
| 6 | 426.79 | 426.4 | 0.091 |

En comparant les résultats obtenus à partir des deux logiciels ANSYS et COMSOL, on remarque une forte concordance entre les fréquences naturelles calculées. L'écart relatif entre les valeurs ne dépasse généralement pas 0,1 %, ce qui témoigne de la fiabilité des deux approches numériques utilisées dans cette étude.

- Étude du matériau : acier inoxydable

Un acier inoxydable a également été retenu dans cette étude en tant que matériau de comparaison, en raison de sa rigidité élevée et de sa bonne résistance aux environnements sévères. Les propriétés mécaniques utilisées dans les simulations sont les suivantes : un module de Young de 193 GPa, un coefficient de Poisson de 0,31 et une densité de 7750 kg/m³. Ces caractéristiques permettent de simuler de manière fiable le comportement dynamique du matériau dans le cadre de l'analyse modale.

Tableau 5.3 : Comparaison des fréquences naturelles des six premiers modes via ANSYS et COMSOL.

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERREUR(%) |
|------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 256.62 | 256.95 | 0.12 |
| 2 | 257.12 | 257.05 | 0.02 |
| 3 | 285.85 | 286.16 | 0.10 |
| 4 | 410.65 | 411.11 | 0.11 |
| 5 | 427.5 | 427.37 | 0.03 |
| 6 | 427.67 | 427.59 | 0.01 |

L'utilisation de l'acier inoxydable n'a pas entraîné de variations significatives des fréquences modales, que ce soit à température ambiante (20°C) ou à -253°C. Les résultats restent globalement proches, ce qui suggère que, malgré une densité plus élevée, son influence sur la réponse dynamique du réservoir cylindrique reste limitée, et la température n'a pas d'impact majeur sur les résultats.

- Matériau : Époxy Carbone Tissé

Dans cette étude, un matériau composite de type époxy carbone tissé a été sélectionné pour son usage fréquent dans les structures aéronautiques et spatiales. Ce matériau se distingue par un module de Young élevé d'environ 135 GPa, un coefficient de Poisson de 0.3, et une densité relativement faible de 1600 kg/m³, ce qui lui confère une excellente rigidité spécifique. L'objectif de son intégration dans cette analyse modale est d'observer son comportement dynamique et de comparer ses performances avec celles des matériaux métalliques plus classiques.

Tableau 5.4 Couche et orientation

| Couche (Layer) | Orientation |
|----------------|-------------|
| 1 | 0° / 90° |
| 2 | +45° / -45° |
| 3 | 0° / 90° |
| 4 | +45° / -45° |
| 5 | 0° / 90° |

Nombre total de couches = 5

Épaisseur typique d'une couche : 0.25 mm

Tableau 5.5 : Comparaison des fréquences naturelles des six premiers modes via ANSYS et COMSOL.

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERREUR(%) |
|------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 345.97 | 346.41 | 0.12 |
| 2 | 383.59 | 384.26 | 0.17 |
| 3 | 426.74 | 427.68 | 0.22 |
| 4 | 461.37 | 463.81 | 0.52 |
| 5 | 482.48 | 483.19 | 0.14 |
| 6 | 486.14 | 486.62 | 0.1 |

On observe une augmentation notable des fréquences propres avec l'utilisation du matériau époxy carbone tissé, ce qui s'explique par sa rigidité spécifique plus élevée comparée aux autres matériaux testés. Ce résultat met en évidence l'importance du choix du matériau dans les études modales, surtout lorsqu'il s'agit de structures sensibles aux vibrations comme les réservoirs de carburant aéronautiques.

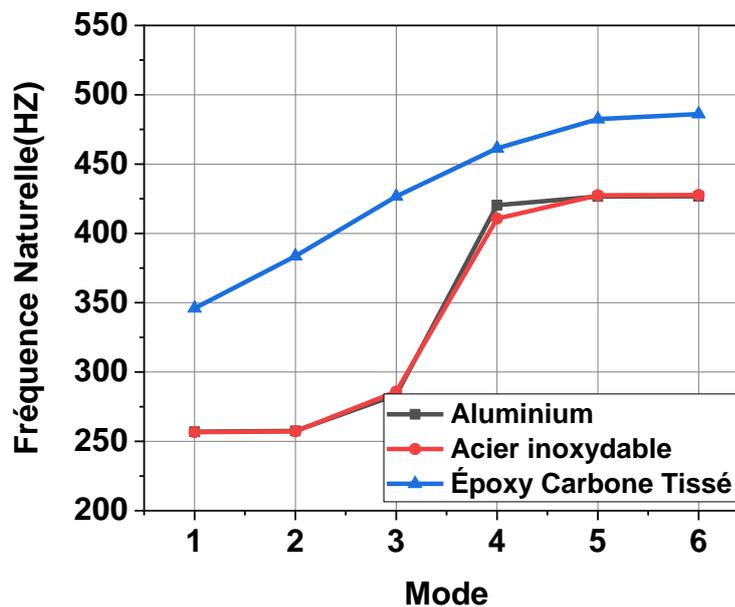


Figure 5.2 Influence du matériau

5.2.2 Effet de la Masse

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet de la masse du carburant contenu à l'intérieur du réservoir cylindrique. Deux cas seront considérés afin d'évaluer l'influence thermique sur le comportement vibratoire de la structure : le premier concerne l'oxygène liquide à une

température de 20°C, représentant des conditions proches de l'ambiance, tandis que le second implique l'hydrogène liquide à très basse température, soit -253°C, correspondant à un environnement cryogénique typique des applications aérospatiales.

Tableau 5.6 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du l'oxygène liquide à 20°C

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERREUR(%) |
|------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 44.18 | 45.897 | 3.74 |
| 2 | 52.867 | 50.922 | 3.82 |
| 3 | 52.957 | 54.135 | 2.18 |
| 4 | 77.899 | 80.336 | 3.03 |
| 5 | 77.957 | 81.361 | 4.18 |
| 6 | 82.644 | 84.406 | 2.09 |

L'introduction de l'oxygène liquide à 20 °C dans le réservoir cylindrique a provoqué une diminution notable des fréquences naturelles, en raison de l'augmentation de la masse totale du système. Toutefois, les résultats obtenus par ANSYS et COMSOL restent très proches, avec une erreur négligeable entre les deux logiciels.

Tableau 5.7 : Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du gaz cryogénique (-253 °C).

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERREUR(%) |
|------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 84.178 | 85.471 | 1.54 |
| 2 | 84.867 | 85.546 | 0.8 |
| 3 | 102.63 | 103.87 | 1.21 |
| 4 | 114.46 | 117.6 | 2.74 |
| 5 | 121.72 | 122.24 | 0.43 |
| 6 | 122.16 | 122.96 | 0.65 |

Lors de l'application de la température de l'hydrogène liquide à -253°C, on observe une augmentation notable des fréquences naturelles par rapport à celles obtenues avec l'oxygène liquide à 20°C. Cette élévation s'explique principalement par la réduction de la dilatation thermique et l'augmentation locale de la rigidité du matériau à très basse température, ce qui influence directement le comportement dynamique du réservoir.

De plus, les résultats obtenus à partir des deux logiciels, ANSYS et COMSOL, restent très proches, avec un taux d'erreur négligeable, confirmant ainsi la fiabilité et la cohérence des simulations effectuées.

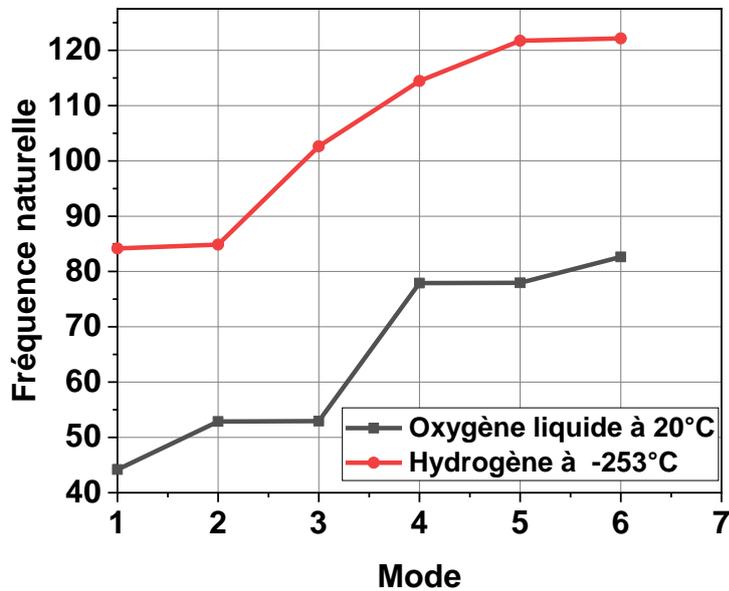


Figure 5.3 Effet de la Masse

Il est clair que la température et la nature du carburant ont un impact significatif sur les fréquences propres du réservoir. En effet, les variations thermiques modifient les propriétés mécaniques du matériau, telles que le module de Young et la rigidité structurelle, ce qui influence directement la réponse vibratoire du système.

Par exemple, un carburant cryogénique comme l'hydrogène liquide (-253°C) entraîne un accroissement des fréquences en raison de la contraction thermique et de l'augmentation de la rigidité, contrairement à un carburant à température ambiante comme l'oxygène liquide, qui provoque un affaiblissement de la structure et donc une baisse des fréquences.

Ces résultats confirment que le choix du carburant et les conditions thermiques doivent être pris en compte dès la phase de conception pour garantir la fiabilité et la performance des réservoirs sous contraintes vibratoires.

5.2.3 Effet de l'épaisseur

Dans cette étude, nous avons choisi trois épaisseurs différentes pour la paroi du réservoir cylindrique : 3 mm, 6 mm et 9 mm. Ces valeurs ont été sélectionnées afin de couvrir une large gamme d'épaisseurs couramment utilisées dans la fabrication des réservoirs de carburant, ce qui nous permet d'évaluer précisément l'influence de l'épaisseur sur les propriétés dynamiques et structurelles du réservoir. L'épaisseur est un paramètre clé qui impacte à la fois la masse et la rigidité de la paroi, deux facteurs déterminants dans la définition des fréquences naturelles et des modes de vibration. Cette étude vise à analyser comment la variation de l'épaisseur peut modifier la réponse vibratoire du réservoir, contribuant ainsi à l'amélioration de sa conception pour assurer sa sécurité et sa performance sous différentes conditions d'exploitation. Les résultats obtenus pour chaque épaisseur seront comparés afin d'identifier clairement l'effet éventuel de ce paramètre sur le comportement modal du système

.Résultats de la simulation avec ANSYS :

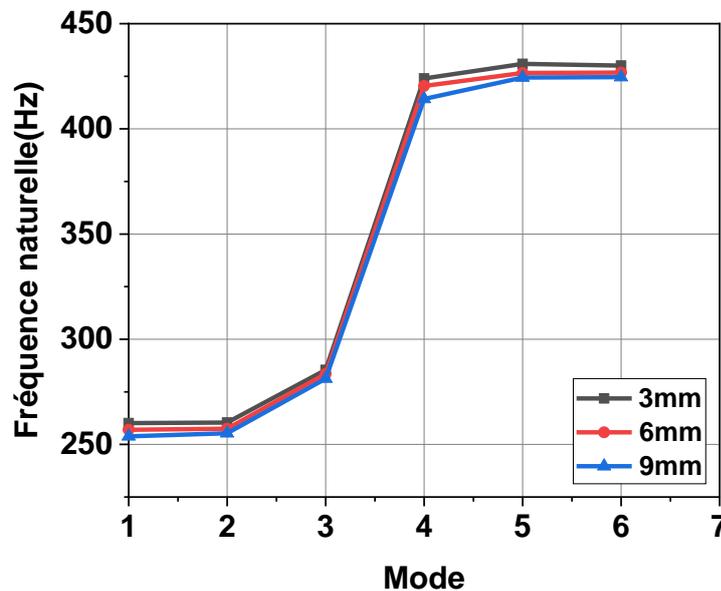


Figure 5.4 Influence de l'épaisseur sur les fréquences naturelles du réservoir cylindrique

L'étude de l'influence de l'épaisseur sur les fréquences naturelles, réalisée pour des valeurs de 3 mm, 6 mm et 9 mm, a montré que les variations restent relativement faibles. Bien que l'augmentation de l'épaisseur tende à rigidifier légèrement la structure, cette modification ne provoque pas de changement significatif des modes propres. Cela peut s'expliquer par le fait

que, dans ce cas précis, la dynamique du réservoir est plus sensible à d'autres paramètres tels que les conditions aux limites ou la masse du remplissage, qui ont un impact plus marqué sur le comportement vibratoire. Par conséquent, l'effet de l'épaisseur, dans la plage étudiée, demeure secondaire par rapport à ces facteurs, ce qui justifie la similitude observée dans les résultats.

5.2.4 Effet des taux de remplissage sur les fréquences naturelles

L'influence du taux de remplissage sur les fréquences naturelles du réservoir a également été étudiée, en considérant plusieurs niveaux représentant des conditions de fonctionnement réelles : 20 %, 40 %, 60 %, 80 % et 100 %. Pour simuler ces scénarios, l'oxygène liquide a été retenu comme fluide de remplissage, en raison de son utilisation courante dans les systèmes de propulsion des lanceurs spatiaux.

L'oxygène liquide (LOX), utilisé comme comburant cryogénique, est caractérisé par une température extrêmement basse et une densité relativement élevée (environ 1141 kg/m³). Ces propriétés en font un choix pertinent pour évaluer l'effet d'un fluide réaliste sur la réponse dynamique du réservoir. L'ajout progressif de LOX permet d'analyser l'impact de la variation de la masse interne sur les fréquences naturelles, tout en maintenant des conditions proches de celles rencontrées dans les applications aérospatiales.

Résultats de la simulation avec ANSYS :

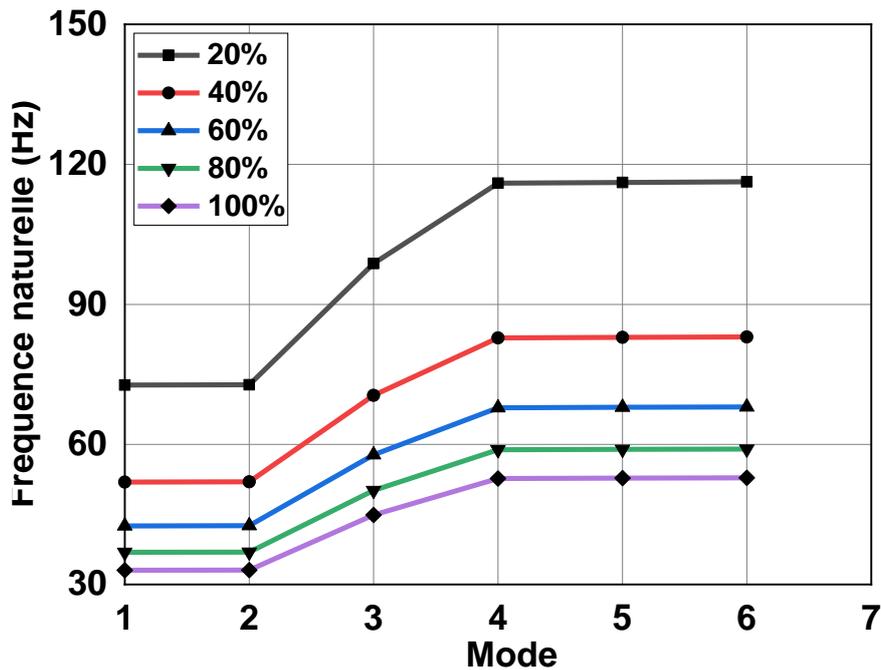


Figure 5.5 Influence du taux de remplissage sur les fréquences naturelles du réservoir cylindrique

Les résultats montrent un impact significatif de l'augmentation du taux de remplissage sur les fréquences naturelles du réservoir. Avec l'augmentation du taux de remplissage, on observe une diminution progressive des fréquences naturelles à travers tous les modes. Cette diminution devient plus prononcée de 20% à 100%, avec un impact notable de la masse à l'intérieur du réservoir. La différence de fréquences entre les différents taux de remplissage montre que l'interaction entre le fluide et les parois du réservoir a un effet significatif sur le comportement vibratoire, soulignant l'importance d'étudier les effets du taux de remplissage dans la conception des réservoirs de carburant.

5.3 Analyse modale du réservoir sphérique de carburant

Le réservoir sphérique a également été conçu avec une grande précision afin de reproduire fidèlement la géométrie des réservoirs sphériques utilisés dans les applications aérospatiales. Le modèle développé présente un diamètre extérieur de 2500 mm et une épaisseur de paroi de 10 mm. Ces dimensions ont été soigneusement choisies pour permettre une analyse approfondie de l'influence de la forme sphérique sur les fréquences propres et les réponses vibratoires du système. Contrairement aux structures cylindriques, la géométrie sphérique

offre une répartition plus uniforme des contraintes et une rigidité globale différente, ce qui peut engendrer un comportement modal distinct. Cette configuration géométrique a été soumise à différentes conditions de matériaux et de températures, afin d'observer les éventuelles variations dans les modes propres et de mieux comprendre les avantages potentiels d'un tel design dans le domaine spatial.

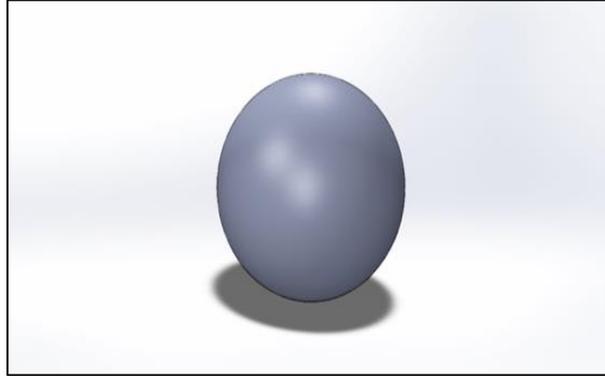


Figure 5.6 Le réservoir de carburant sphérique

5.3.1 Influence du matériau sur le comportement modal du réservoir sphérique

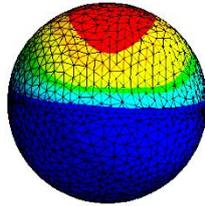
Afin d'analyser l'influence du matériau sur les fréquences propres du réservoir sphérique, trois matériaux différents seront étudiés, comme cela a été fait précédemment pour le réservoir cylindrique. Il s'agit d'un alliage d'aluminium, d'un acier inoxydable, et d'un composite de type époxy carbone tissé. Cette démarche permettra de comparer les comportements vibratoires du réservoir selon la nature du matériau utilisé.

- Étude du matériau : Aluminium

ANSYS

C Modale
 Déplacement total
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 367.24 Hz
 Unité: m
 23/02/2025 23:00

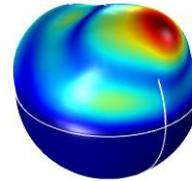
0.088347 Max
 0.237326
 0.260671
 0.250354
 0.348309
 0.325242
 0.284447
 0.215967
 0.0058157
 0 Min



f1= 367.24 Hz

COMSOL

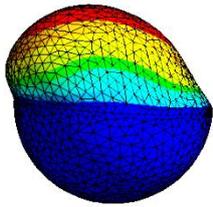
$\times 10^3$
 7
 6
 5
 4
 3
 2
 1
 0



f1= 368.56 Hz

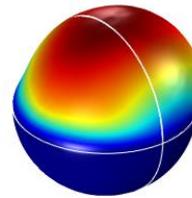
C Modale
 Déplacement total 2
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 367.65 Hz
 Unité: m
 23/02/2025 23:01

0.088291 Max
 0.237347
 0.260671
 0.25036
 0.348306
 0.325244
 0.28445
 0.21596
 0.0058131
 0 Min



f2= 367.65 Hz

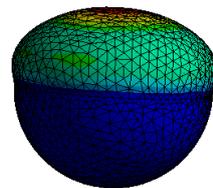
$\times 10^3$
 4
 3.5
 3
 2.5
 2
 1.5
 1
 0.5
 0



f2= 370.18 Hz

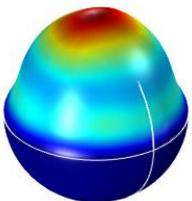
C Modale
 Déplacement total 3
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 496.56 Hz
 Unité: m
 23/02/2025 23:01

0.12812 Max
 0.11388
 0.099647
 0.085412
 0.071176
 0.056941
 0.042706
 0.028471
 0.014235
 0 Min

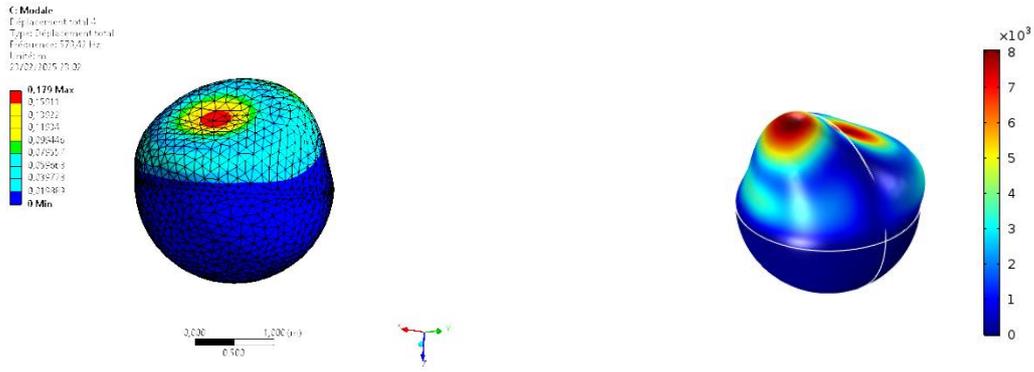


f3= 496.56 Hz

$\times 10^3$
 6
 5
 4
 3
 2
 1
 0

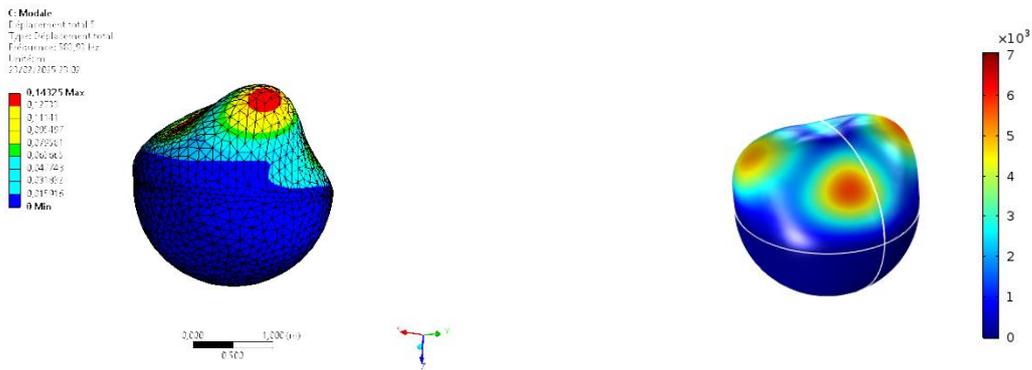


f3= 495.36 Hz



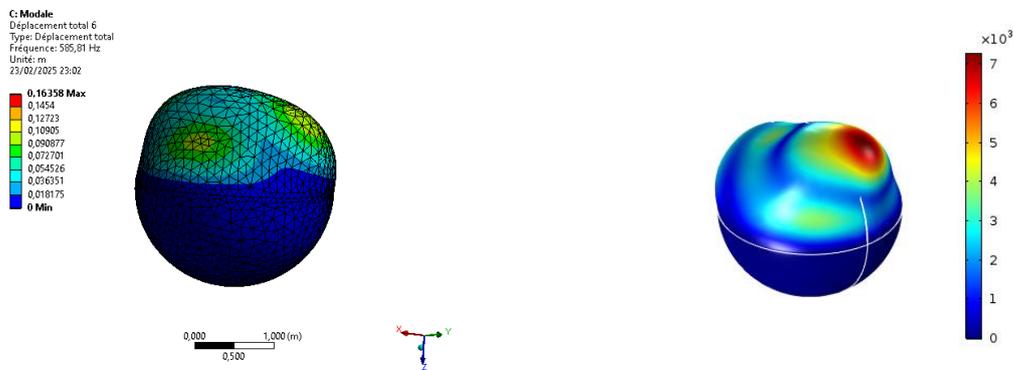
f4= 579.42 Hz

f4= 576.8 Hz



f5= 583.93 Hz

f5= 578.6 Hz



f6= 585.81 Hz

f6= 579.14 Hz

Tableau 5.8 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du réservoir sphérique de carburant.

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERREUR(%) |
|------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 367.24 | 368.56 | 0.35 |
| 2 | 367.65 | 370.18 | 0.68 |
| 3 | 496.56 | 495.36 | 0.24 |
| 4 | 579.42 | 576.8 | 0.45 |
| 5 | 583.93 | 578.6 | 0.9 |
| 6 | 585.81 | 579.14 | 1.1 |

La comparaison des fréquences naturelles obtenues via ANSYS et COMSOL révèle une bonne concordance des résultats, avec des écarts limités entre les deux méthodes. Ces différences minimales, ne dépassant pas 1.1%, traduisent la précision du modèle et la robustesse de l'approche numérique adoptée pour l'analyse du réservoir sphérique.

- **Étude du matériau : Acier inoxydable**

Tableau 5.9 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du matériau Acier inoxydable.

| Mode | ANSYS(HZ) | COMSOL(HZ) | ERREUR(%) |
|------|-----------|------------|-----------|
| 1 | 369.55 | 365.56 | 1.08 |
| 2 | 369.96 | 365.6 | 1.18 |
| 3 | 497.98 | 490.09 | 1.58 |
| 4 | 579.55 | 575.4 | 0.72 |
| 5 | 584.12 | 576.52 | 1.30 |
| 6 | 586.05 | 581.1 | 0.84 |

L'utilisation de l'acier inoxydable a montré que les écarts entre les résultats d'ANSYS et de COMSOL sont restés dans une plage étroite, avec des erreurs variant entre 0.7% et 1.5%. Ces différences reflètent l'impact du nouveau matériau sur le comportement vibratoire du réservoir, tout en maintenant une bonne concordance entre les deux approches numériques. manière significative les résultats, montrant ainsi une bonne concordance entre les deux approches numériques dans l'analyse de ces conditions.

- **Étude du matériau : Époxy Carbone Tissé**

Tableau 5.10 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du Époxy Carbone Tissé

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERROR(%) |
|------|-----------|------------|----------|
| 1 | 412.36 | 413.81 | 0.11 |
| 2 | 413.87 | 415.6 | 0.71 |
| 3 | 531.84 | 533.14 | 0.65 |
| 4 | 615.36 | 616.78 | 0.42 |
| 5 | 643.54 | 645.38 | 0.94 |
| 6 | 646.48 | 647.34 | 0.21 |

L'utilisation d'un matériau composite de type époxy carbone tissé montre un impact notable sur les modes vibratoires obtenus lors de l'analyse modale. Cet effet s'explique par les propriétés mécaniques élevées du matériau, notamment sa rigidité spécifique, ce qui entraîne une modification significative de la distribution et des fréquences des modes.

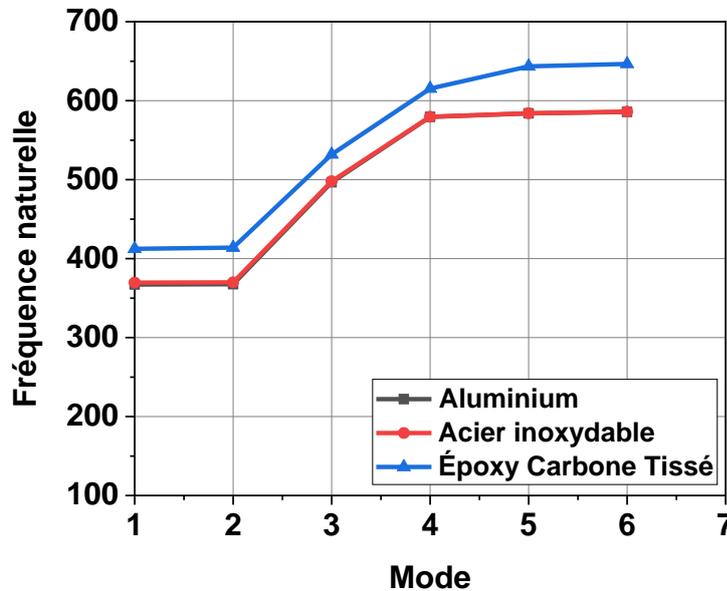


Figure 5.7 Influence du matériau sur le comportement modal du réservoir Sphérique

On observe une grande similarité entre les résultats obtenus avec l'aluminium et l'acier inoxydable, ce qui s'explique par le fait que leurs propriétés mécaniques (module de Young, densité, coefficient de Poisson, etc.) sont relativement proches, entraînant des réponses vibratoires similaires.

En revanche, le matériau composite époxy carbone tissé présente des résultats très différents, en raison de sa rigidité spécifique élevée et de sa faible densité, ce qui modifie profondément la dynamique du système et conduit à des fréquences naturelles nettement plus élevées.

Cela souligne l'importance cruciale du choix du matériau dans la conception des réservoirs soumis à des sollicitations vibratoires.

5.3.2 Effet de la masse

Nous allons à présent appliquer les mêmes températures de carburants utilisées précédemment à notre réservoir sphérique, à savoir :

l'oxygène liquide (20 °C) et l'hydrogène liquide (-253 °C), afin d'étudier leur influence sur les fréquences naturelles.

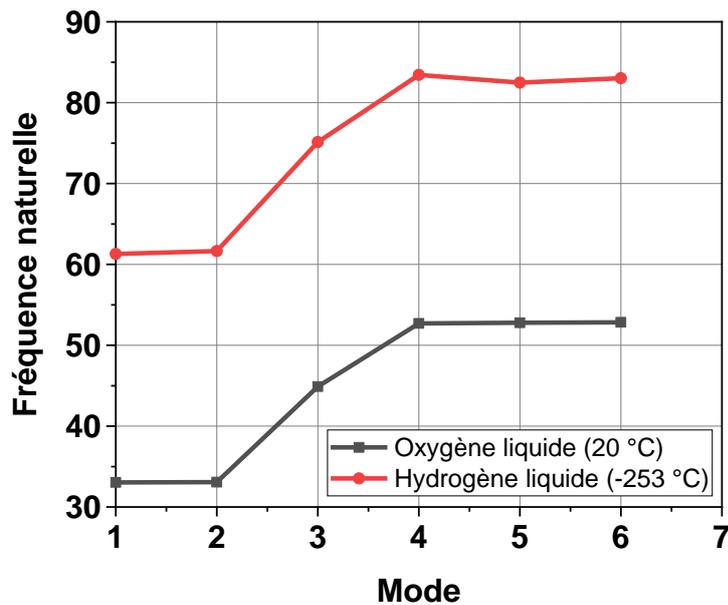


Figure 5.8 Effet de la Masse

L'effet de la température du carburant est particulièrement prononcé dans le cas du réservoir sphérique, où l'on observe une augmentation notable des fréquences naturelles lors de l'utilisation de l'hydrogène liquide (-253 °C) comparé à l'oxygène liquide (20 °C).

5.3.3 Effet de l'épaisseur

Trois épaisseurs différentes (3 mm, 6 mm et 9 mm) ont été considérées afin d'évaluer l'influence de l'épaisseur sur les résultats de l'analyse modale du réservoir sphérique. Cette variation permet d'étudier l'impact de l'épaisseur sur les fréquences propres et les modes de vibration.

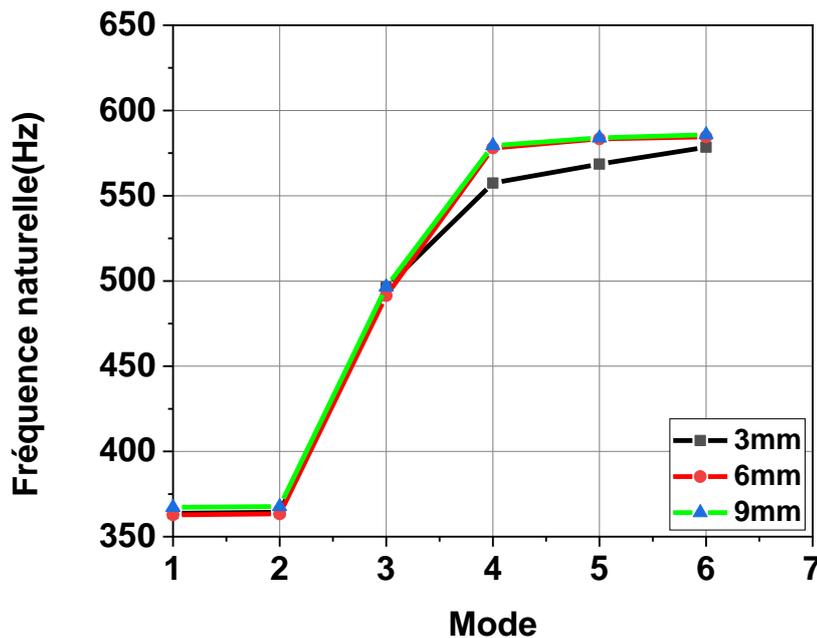


Figure 5.9 Influence de l'épaisseur de la paroi sur les fréquences naturelles du réservoir sphérique.

L'étude de l'influence de l'épaisseur sur les fréquences propres du réservoir sphérique a été réalisée en considérant trois valeurs d'épaisseur différentes : 3 mm, 6 mm et 9 mm. Les résultats obtenus ont montré que les variations dans les fréquences propres restent relativement faibles d'une configuration à une autre. Cette stabilité dans les résultats suggère que, pour cette géométrie particulière, les changements d'épaisseur dans cette plage n'induisent pas de modifications significatives du comportement vibratoire global. Cela pourrait être attribué à la symétrie de la structure sphérique, qui répartit les contraintes de manière homogène, réduisant ainsi l'impact de la variation de l'épaisseur sur les modes de vibration. Cette observation est en cohérence avec les comportements attendus pour des structures présentant une forme isotrope et uniforme.

5.3.4 Effet des taux de remplissage sur les fréquences naturelles

Dans cette partie, l'effet du remplissage sur le réservoir sphérique sera étudié. Le réservoir sera rempli d'oxygène liquide (LOX) à différents niveaux (20 %, 40 %, 60 %, 80 % et 100 %) afin d'analyser l'impact de cette variation sur son comportement vibratoire à travers une analyse modale.

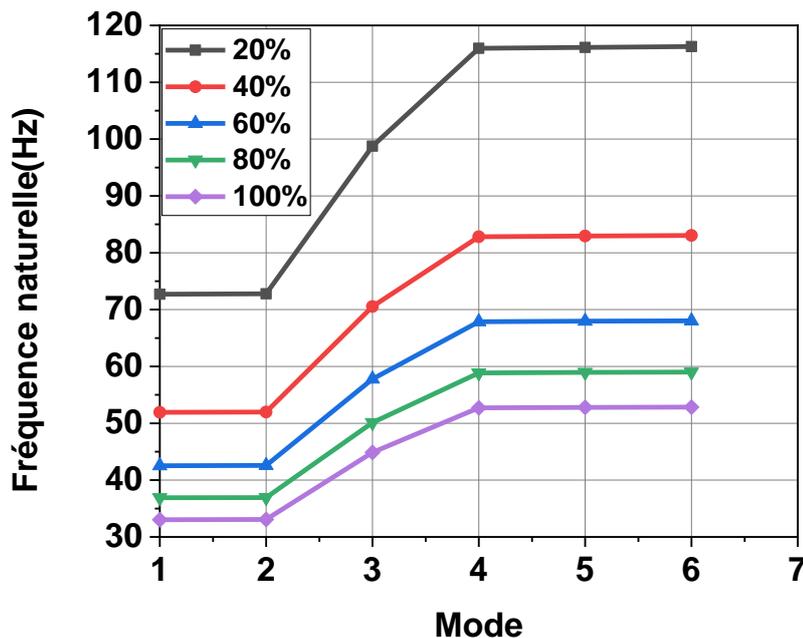


Figure 5.10 Influence du taux de remplissage sur les fréquences naturelles du réservoir sphérique

Les résultats obtenus montrent une diminution progressive des fréquences propres avec l'augmentation du taux de remplissage. Cette baisse est liée à l'augmentation de la masse interne, due à la quantité de carburant ajoutée dans le réservoir. La présence du liquide agit comme une masse supplémentaire, sans contribuer à la rigidité de la structure, ce qui modifie la réponse modale du système.

En augmentant le taux de remplissage, la dynamique du réservoir change légèrement, notamment pour les premiers modes. Ce facteur influence la répartition de l'énergie vibratoire et déplace le centre de masse. Ainsi, le taux de remplissage s'impose comme un paramètre important à considérer dans toute étude modale fiable

5.4 Analyse modale du profil d'aile

Dans cette partie de l'étude, un modèle géométrique en forme de profil d'aile Naca 23012 a été conçu afin de représenter une structure typiquement utilisée dans le domaine aéronautique. Le choix de cette configuration permet de simuler les comportements dynamiques d'une aile creuse, telle qu'on peut la retrouver dans certaines applications spatiales ou aéronautiques où les volumes internes sont utilisés pour accueillir des systèmes embarqués.

Le profil considéré présente une envergure de 10000 mm et une corde de 2000 mm, ce qui permet d'obtenir une géométrie réaliste et suffisamment représentative pour une analyse modale pertinente. Ce modèle symétrique est basé sur un profil aérodynamique standard, avec une épaisseur variable le long de la corde, reproduisant les caractéristiques réelles d'une aile d'avion.

L'objectif de cette modélisation est d'analyser les fréquences propres et les modes de vibration spécifiques à cette géométrie allongée, afin de comparer ses réponses dynamiques à celles des autres formes étudiées. L'impact de la forme profilée sur le comportement vibratoire sera ainsi examiné sous différentes conditions thermiques et matérielles.

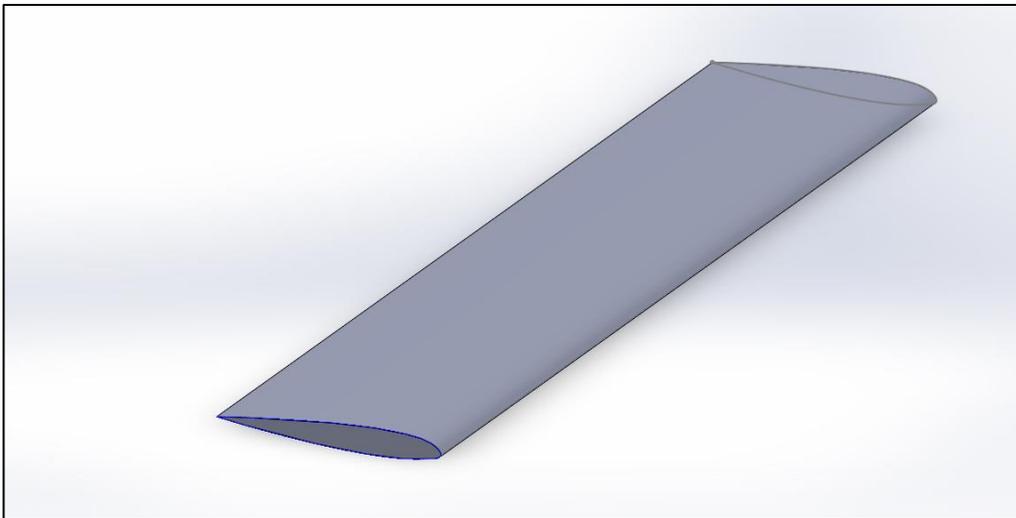


Figure 5.11 Le profil d'aile

5.4.1 Influence du matériau sur le comportement modal de profil d'aile

Dans le prolongement des analyses précédemment menées sur les autres géométries, une étude comparative des matériaux sera également appliquée au profil d'aile. Cette étape vise à évaluer l'impact des propriétés mécaniques des matériaux sur le comportement vibratoire de cette structure complexe. Trois matériaux aux caractéristiques distinctes ont été retenus pour cette analyse : un alliage d'aluminium léger, un acier inoxydable plus dense et plus rigide, ainsi qu'un composite à base d'époxy et de fibres de carbone tissées, reconnu pour son excellent rapport rigidité/poids.

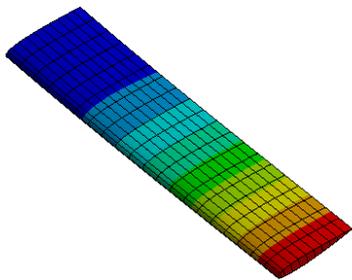
L'objectif de cette démarche est de déterminer si le choix du matériau influence de manière significative les fréquences naturelles et les modes propres du profil d'aile, en tenant compte de la même géométrie et des mêmes conditions aux limites. Cette comparaison permettra d'identifier les avantages et limitations de chaque matériau dans un contexte de conception aéronautique.

- **Étude du matériau : Aluminium**

ANSYS

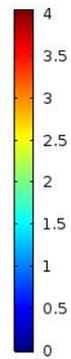
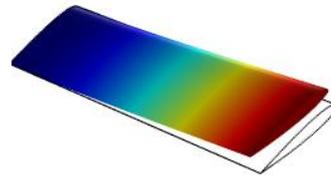
A: Modale
Déplacement total
Type: Déplacement total
Fréquence: 1.6589 Hz
Unité: m

0.021091 Max
0.018747
0.016404
0.014061
0.011717
0.0093737
0.0070303
0.0046868
0.0023434
0 Min



f1= 1.6589 Hz

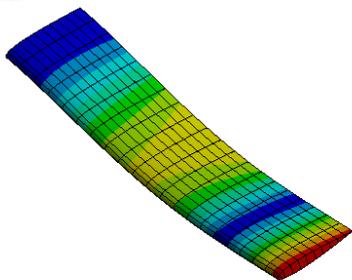
COMSOL



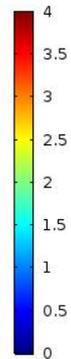
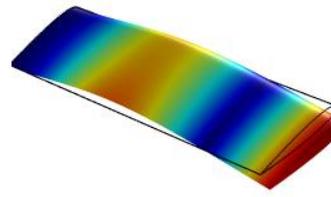
f1= 1.6529 Hz

A: Modale
Déplacement total 2
Type: Déplacement total
Fréquence: 10.332 Hz
Unité: m

0.021441 Max
0.019059
0.016676
0.014294
0.011912
0.0095293
0.007147
0.0047647
0.0023823
0 Min

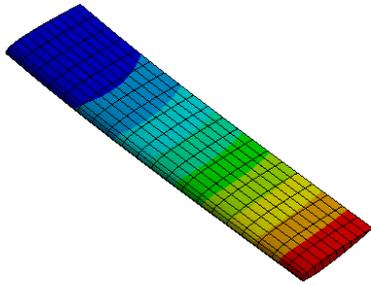
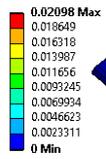


f2= 10.332 Hz

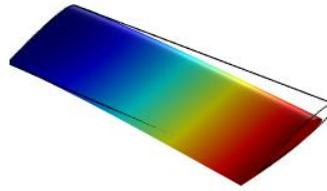
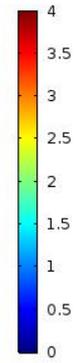


f2= 10.294 Hz

A: Modale
 Déplacement total 3
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 13.128 Hz
 Unité: m

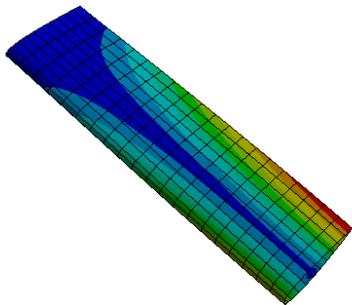
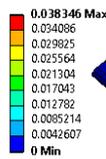


f3= 13.128 Hz

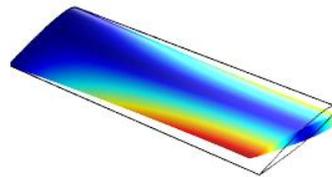
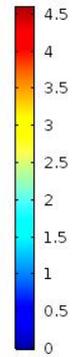


f3= 13.118 Hz

A: Modale
 Déplacement total 4
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 19.234 Hz
 Unité: m

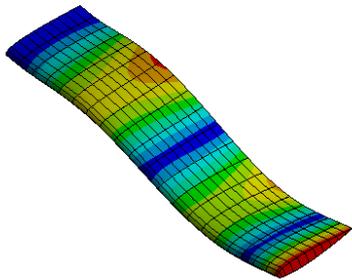
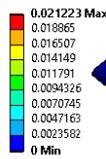


f4= 19.234 Hz

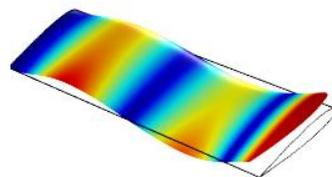
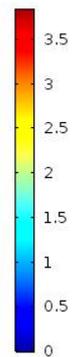


f4= 19.202 Hz

A: Modale
 Déplacement total 5
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 28.672 Hz
 Unité: m

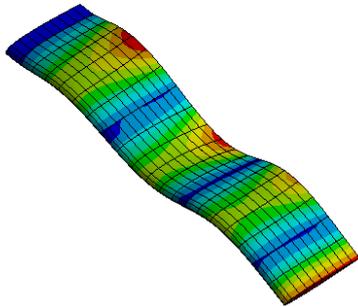
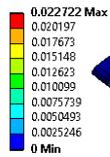


f5= 28.672 Hz

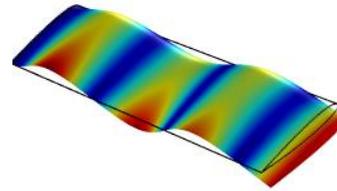
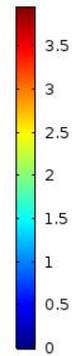


f5= 28.574 Hz

A: Modale
 Déplacement total 6
 Type: Déplacement total
 Fréquence: 55.431 Hz
 Unité: m



f6= 55.431 Hz



f6= 55.253 Hz

Tableau 5.11 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du profil d'aile matériau Aluminium .

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERROR(%) |
|------|-----------|------------|----------|
| 1 | 1.6589 | 1.6529 | 0.34 |
| 2 | 10.332 | 10.294 | 0.35 |
| 3 | 13.128 | 13.118 | 0.08 |
| 4 | 19.234 | 19.202 | 0.13 |
| 5 | 28.672 | 28.574 | 0.33 |
| 6 | 55.431 | 55.253 | 0.30 |

Dans le cas du profil d'aile, l'utilisation de l'aluminium a conduit à une diminution significative des fréquences naturelles par rapport aux autres matériaux étudiés. Toutefois, on remarque que l'écart entre les résultats obtenus via ANSYS et COMSOL reste très faible, ce qui confirme la fiabilité des deux logiciels.

- **Matériau : Acier inoxydable**

Tableau 5.12 Comparaison des fréquences naturelles des six premiers modes via ANSYS et COMSOL Matériau Acier inoxydable.

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERROR(%) |
|------|-----------|------------|----------|
| 1 | 1.6585 | 1.647 | 0.70 |
| 2 | 10.27 | 10.263 | 0.07 |
| 3 | 13.083 | 13.065 | 0.14 |
| 4 | 19.372 | 19.42 | 0.25 |
| 5 | 28.513 | 28.506 | 0.02 |
| 6 | 55.153 | 55.181 | 0.05 |

L'utilisation de l'acier inoxydable dans le cas du profil d'aile n'a pas entraîné de variations notables des fréquences naturelles. Les résultats obtenus sont restés globalement stables, ce qui laisse penser que ce matériau exerce une influence limitée sur le comportement modal de la structure étudiée.

- **Matériau : Époxy Carbone Tissé**

Tableau 5.13 Calcul de l'erreur entre les résultats d'Ansys et de Comsol pour le cas du Époxy Carbone Tissé.

| Mode | ANSYS(Hz) | COMSOL(Hz) | ERROR(%) |
|------|-----------|------------|----------|
| 1 | 2.4786 | 2.4638 | 0.095 |
| 2 | 13.684 | 13.914 | 0.091 |
| 3 | 18.874 | 19.175 | 0.15 |
| 4 | 25.369 | 26.147 | 0.24 |
| 5 | 35.463 | 34.238 | 0.12 |
| 6 | 62.575 | 64.159 | 0.31 |

L'introduction du matériau en époxy carbone tissé a entraîné des modifications notables des fréquences naturelles, traduisant l'influence directe de ses propriétés mécaniques sur le comportement modal de la structure analysée.

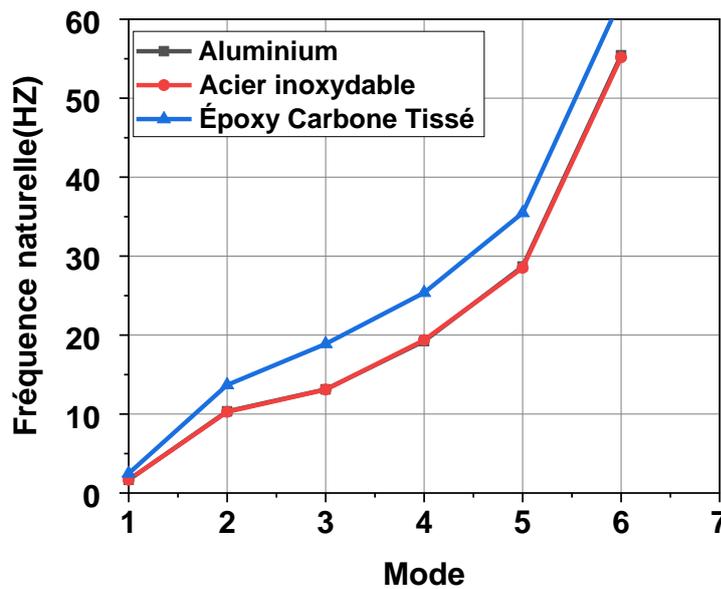


Figure 5.12 Influence du matériau sur le comportement modal de profil d'aile

L'utilisation de l'époxy carbone tissé dans la structure de l'aile a entraîné une diminution significative des fréquences propres. En revanche, les résultats obtenus avec l'aluminium et l'acier inoxydable sont très proches, voire pratiquement identiques

5.4.2 Effet de la Température de l'altitude

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet de la température ambiante sur le comportement vibratoire du profil d'aile, en comparant deux conditions atmosphériques typiques :

- 20°C, correspondant à une température au sol,
- -50°C, représentant les conditions thermiques à une altitude de 11 000 mètres.

Cette analyse permettra de mieux comprendre l'influence des variations climatiques sur les fréquences naturelles de la structure.

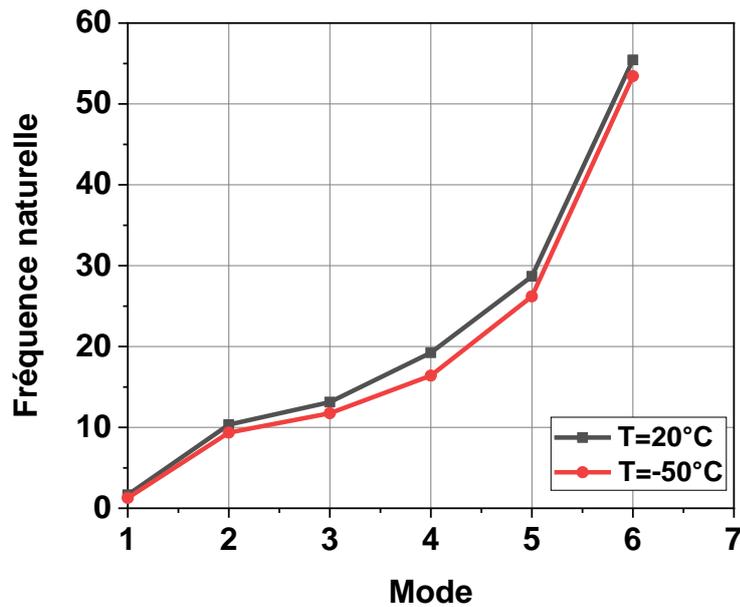


Figure 5.13 Effet de la Température de l'altitude

L'effet de la température liée à l'altitude ne s'est pas révélé très significatif. En effet, la variation observée des fréquences propres reste relativement faible. Une légère diminution a été notée dans le cas de -50°C , mais sans impact majeur sur le comportement vibratoire global de l'aile.

5.4.3 Effet de la Masse

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet de la masse du carburant Jet A1 sur le profil d'aile. Pour cela, nous allons considérer trois cas de température différents représentant des conditions de fonctionnement variées : 20°C (température ambiante), -50°C (température en altitude élevée) et 50°C (température en conditions extrêmes ou au sol dans un environnement chaud). Ces variations nous permettront d'analyser l'influence thermique du carburant sur le comportement vibratoire de l'aile.

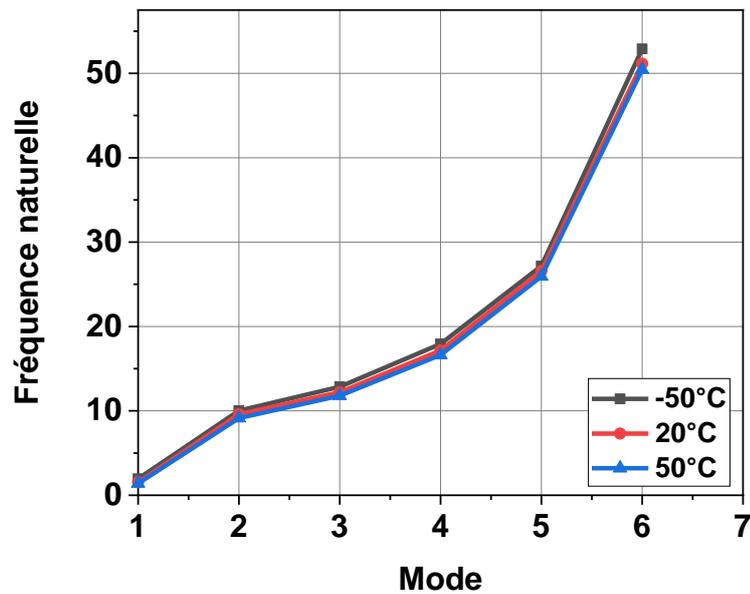


Figure 5.14 Effet de la Masse

On observe que les variations de fréquence dues aux changements de température du carburant Jet A1 restent relativement faibles dans la plage considérée (de -50°C à 50°C). Cette stabilité s'explique par le fait que, dans cette gamme de températures modérées, les propriétés mécaniques des matériaux (tels que l'aluminium ou les composites) ne subissent que de légères modifications. Ainsi, la rigidité globale de la structure reste quasi inchangée, ce qui limite l'impact sur les fréquences naturelles.

5.4.4 Effet de l'épaisseur

Dans cette phase de l'étude, trois épaisseurs ont été retenues : 10 mm, 15 mm et 20 mm, afin d'analyser l'effet de ce paramètre géométrique sur les fréquences naturelles du profil d'aile. Ces valeurs ont été choisies car le modèle représente une structure creuse servant de réservoir, ce qui justifie l'usage d'épaisseurs plus importantes que celles généralement utilisées pour les profils aérodynamiques classiques, dans le but de mieux représenter les conditions réelles en termes de rigidité et de masse.

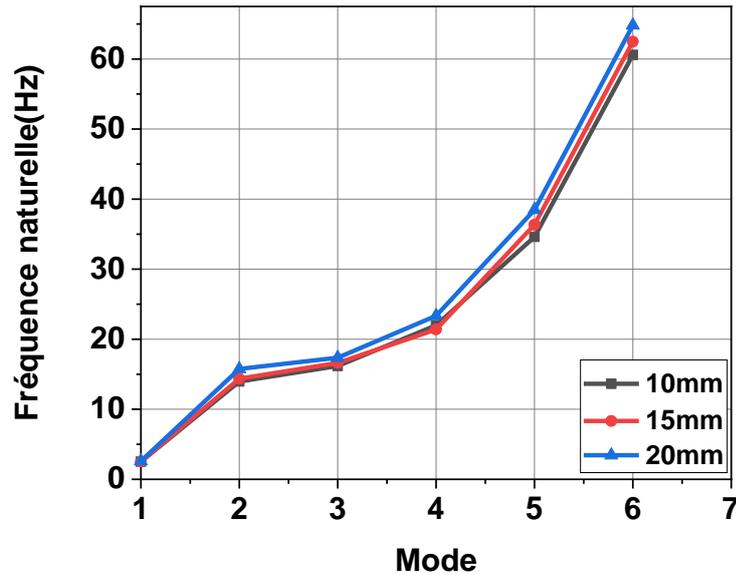


Figure 5.15 Influence de l'épaisseur sur les fréquences naturelles du profil d'aile

L'analyse des fréquences naturelles obtenues pour les différentes épaisseurs choisies (10 mm, 15 mm et 20 mm) du profil d'aile creux révèle une évolution progressive des valeurs. L'augmentation de l'épaisseur induit un léger accroissement des fréquences, traduisant un renforcement de la rigidité structurelle. Toutefois, cet effet reste modéré, suggérant que l'épaisseur, bien qu'influente, n'engendre pas de changements drastiques dans le comportement modal du modèle, mais agit plutôt comme un facteur d'ajustement subtil du comportement dynamique global.

Après avoir constaté que l'effet du changement d'épaisseur n'était pas suffisamment significatif sur l'aile de longueur 10 000 mm, la longueur a été réduite à 5 000 mm tout en conservant le même profil d'aile et les mêmes propriétés mécaniques des matériaux.

Cette modification a pour objectif d'étudier l'influence de l'épaisseur sur une géométrie plus courte, où l'interaction entre les paramètres géométriques et la réponse dynamique devient plus marquée. Cela permet une analyse plus précise de l'impact des variations géométriques, en particulier de l'épaisseur, sur le comportement vibratoire naturel de l'aile intégrant le réservoir

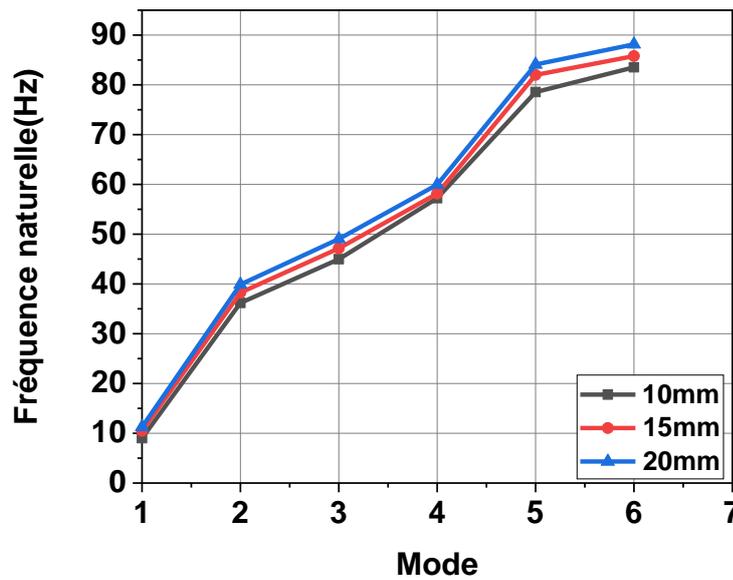


Figure 5.16 Influence de l'épaisseur sur les fréquences naturelles du profil d'aile 5000 mm

Suite à la réduction de la longueur de l'aile à 5 000 mm, des différences nettes ont été observées par rapport au modèle initial de 10 000 mm. Les fréquences propres ont présenté des variations plus importantes, traduisant une sensibilité accrue du modèle géométrique à l'effet de l'épaisseur. De plus, les écarts entre les résultats pour les différentes épaisseurs (10 mm, 15 mm et 20 mm) sont devenus plus marqués, indiquant que les dimensions plus petites de l'aile amplifient l'influence des paramètres géométriques sur la réponse dynamique. Ce changement souligne l'importance d'étudier des modèles aux dimensions variables afin d'évaluer plus précisément l'impact des caractéristiques géométriques, notamment dans le cas des structures plus courtes où les variations mécaniques sont plus perceptibles dans les fréquences propres.

5.4.5 Effet des taux de remplissage sur les fréquences naturelles

Afin d'étudier l'influence du taux de remplissage sur le comportement dynamique du profil d'aile, des simulations ont été réalisées pour différentes quantités de carburant contenues dans le réservoir interne. Le fluide utilisé est le Jet A-1, dont la densité est de 804 kg/m^3 . En se basant sur les dimensions géométriques du réservoir (corde de 2000 mm et envergure de 10 000 mm avec une épaisseur moyenne estimée), le volume utile a été déterminé. À partir de ce volume, les masses de carburant correspondantes aux taux de remplissage de 20 %, 40 %, 60

%, 80 % et 100 % ont été calculées. Ces valeurs ont ensuite été intégrées dans l'analyse modale pour évaluer leur impact sur les fréquences propres de la structure

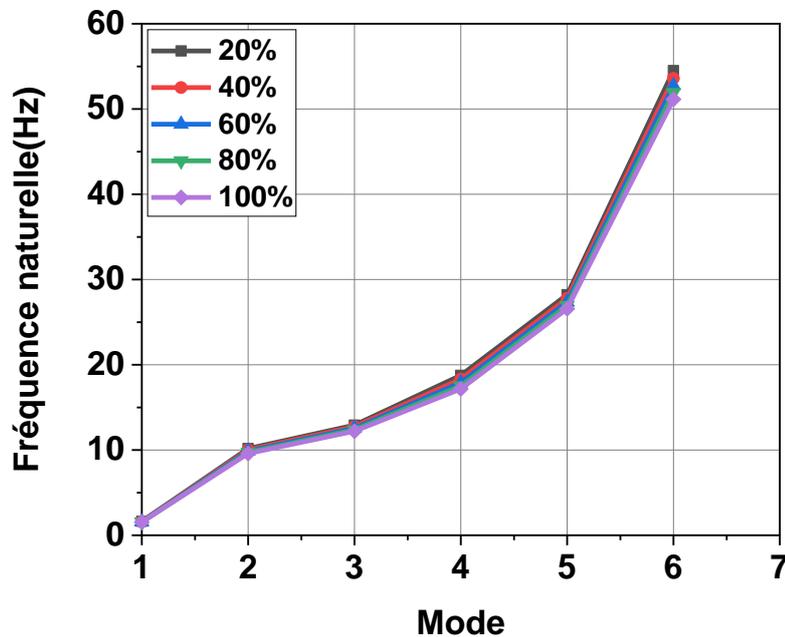


Figure 5.17 Influence du taux de remplissage sur les fréquences naturelles du profil d'aile

À la suite de l'intégration des différentes masses de carburant correspondant aux taux de remplissage de 20 %, 40 %, 60 %, 80 % et 100 %, les résultats obtenus montrent que l'effet de cette variation sur les fréquences propres du profil d'aile reste relativement limité. Bien que l'ajout de masse induise théoriquement une diminution des fréquences naturelles, les écarts observés entre les cas simulés demeurent faibles. Cela peut s'expliquer par le fait que le carburant est réparti de manière homogène à l'intérieur du réservoir, situé près de l'axe neutre de la structure, ce qui limite son influence sur la dynamique globale. Ainsi, malgré l'augmentation progressive de la masse interne, les modes propres du système conservent des valeurs proches, indiquant une stabilité du comportement vibratoire face à ces variations de remplissage.

5.4.6 Effet de l'angle dièdre sur les fréquences naturelles

Dans cette partie de l'étude, l'attention a été portée sur l'effet de l'angle de dièdre sur la réponse dynamique de l'aile. L'angle de dièdre est défini comme l'angle formé entre l'aile et le plan horizontal de l'avion. Il joue un rôle essentiel dans la conception aérodynamique en

contribuant à la stabilité latérale de l'appareil, c'est-à-dire sa stabilité autour de l'axe longitudinal. En augmentant l'angle de dièdre, l'aile s'élève par rapport au plan horizontal, ce qui modifie la répartition de la masse et de la raideur, influençant ainsi directement les fréquences propres de la structure. Pour analyser cet effet, trois valeurs d'angle de dièdre ont été introduites : 10° , 15° et 20° , tout en maintenant constantes les autres propriétés géométriques et mécaniques de l'aile. Ces angles ont été appliqués au modèle 3D à l'aide du logiciel SolidWorks, en générant différentes configurations du même profil, inclinées selon les valeurs définies.

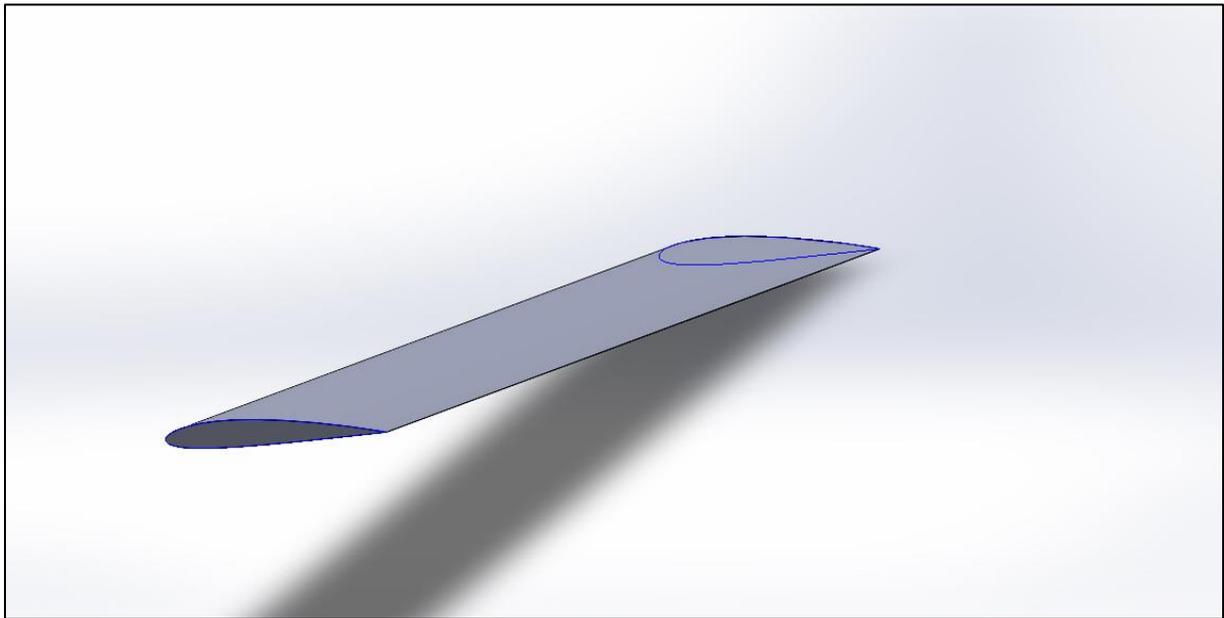


Figure 5.18 Angle dièdre 10°

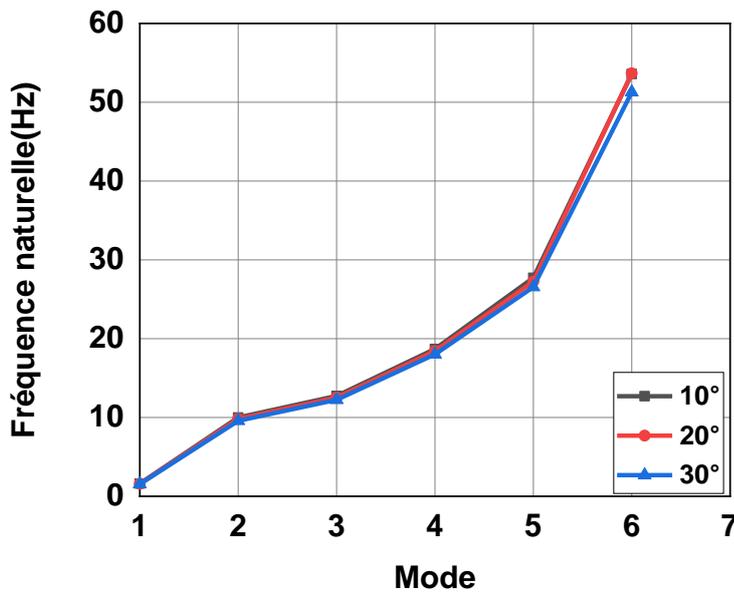


Figure 5.19 influence Influence de l'angle dièdre positif sur les fréquences naturelles

Les résultats issus de l'analyse modale montrent que l'augmentation de l'angle de dièdre entraîne une diminution progressive des fréquences propres du réservoir intégré dans l'aile. Par exemple, la première fréquence (Mode 1) passe de 1.6589 Hz à 0° à 1.5376 Hz à 20°, soit une baisse d'environ 7,3%. Cette tendance s'explique par la réduction de la raideur latérale due à l'inclinaison de l'aile, ce qui rend la structure moins résistante aux vibrations.

L'effet est encore plus marqué pour les modes supérieurs ; à titre d'exemple, le Mode 6 diminue de 55.431 Hz à 51.278 Hz, soit une chute de près de 7,5%, ce qui indique que ces modes sont plus sensibles aux variations géométriques.

Afin d'approfondir l'analyse du comportement dynamique du réservoir, l'étude sera étendue à des angles de dièdre négatifs, en plus des angles positifs. Cette approche permettra d'évaluer l'influence de configurations moins conventionnelles sur les fréquences propres de la structure. Les valeurs considérées dans cette étude sont :

-20°, -15°, -10°, 0°, +10°, +15°, et +20°.

Ces angles couvrent un large éventail de cas, allant d'une configuration fortement inclinée vers le bas à une configuration fortement inclinée vers le haut, offrant ainsi une vision globale de l'effet du dièdre sur le comportement vibratoire du profil d'aile.

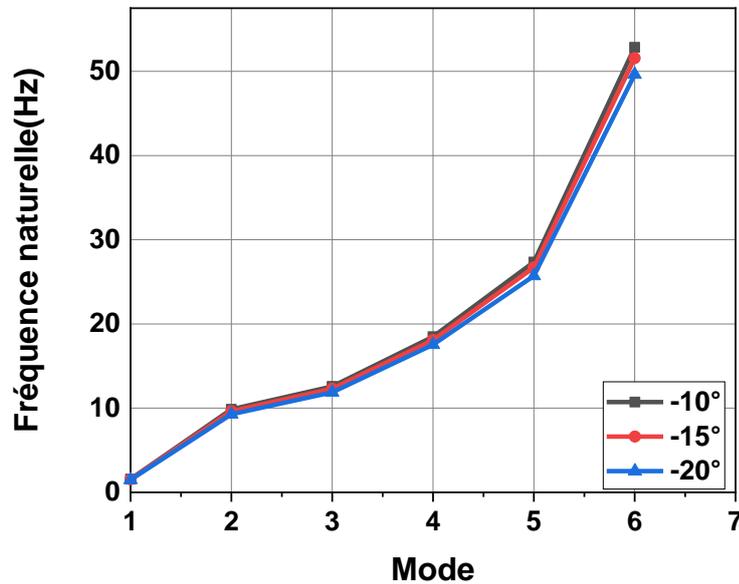


Figure 5.20 Influence de l'angle dièdre négatif sur les fréquences naturelles

L'introduction d'angles de dièdre négatifs (-15° et -20°) a entraîné une diminution plus marquée des fréquences propres par rapport aux cas à dièdre nul ou positif.

Cette baisse s'explique par une réduction de la rigidité latérale de la structure, due à l'orientation descendante des ailes, ce qui accroît la flexibilité latérale et diminue la résistance aux vibrations. L'effet est particulièrement notable sur les modes supérieurs, ce qui témoigne d'une plus grande sensibilité des formes modales complexes aux variations géométriques induites par le dièdre négatif.

Ainsi, le choix d'un angle négatif doit être considéré avec prudence, car il peut compromettre la stabilité dynamique globale du réservoir.

5.4.7 Effet de la répartition du remplissage des réservoirs dans l'aile

Dans cette section, nous allons étudier l'effet de la répartition du remplissage de deux réservoirs intégrés de manière symétrique dans l'aile. Plusieurs configurations ont été simulées afin de représenter différentes conditions de fonctionnement : une première où les deux réservoirs sont complètement pleins (100% – 100%), une seconde où l'un est plein à 100% et l'autre à 60% (100% – 60%), une troisième à (100% – 30%), et enfin une dernière configuration avec un seul réservoir plein et l'autre vide (100% – 0%). Ces différentes situations permettront d'évaluer l'influence de la répartition non uniforme du carburant sur les fréquences propres de la structure, et d'identifier les cas les plus critiques du point de vue vibratoire.

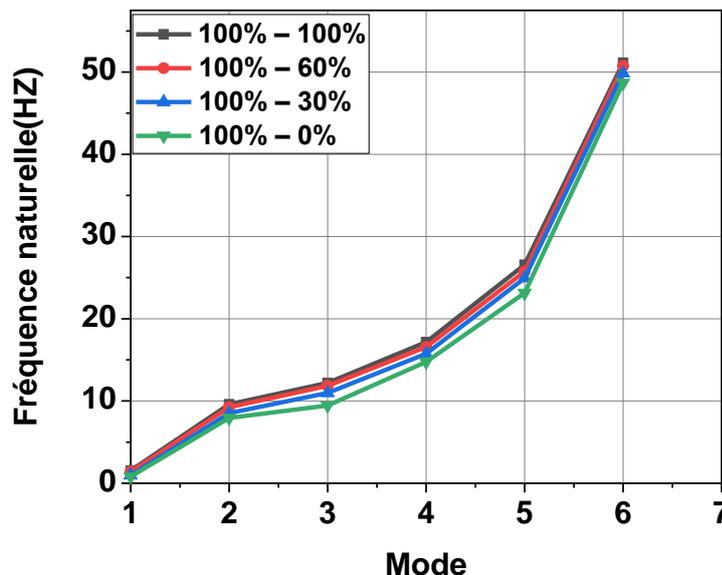


Figure 5.21 Effet de la répartition du remplissage

On observe une diminution progressive des fréquences propres à mesure que la différence de remplissage entre les deux réservoirs augmente. Lorsque la configuration passe de 100% – 100% à 100% – 60%, une légère baisse des fréquences est constatée. Cette baisse devient plus marquée avec la configuration 100% – 30%, et atteint son maximum dans le cas asymétrique 100% – 0%. Cette évolution s'explique par la modification de la répartition des masses à l'intérieur de la structure, ce qui engendre un déséquilibre dynamique accentué, affectant ainsi le comportement vibratoire global de l'aile.

5.4.8 Effet de l'inversion de la répartition du remplissage

Afin de compléter l'étude précédente, nous avons également simulé les mêmes configurations de remplissage en inversant la position des réservoirs. Autrement dit, les taux de remplissage (60%, 30% ou 0%) qui étaient initialement appliqués à un seul réservoir ont été transférés à l'autre. Cette approche permet d'analyser si la position du réservoir rempli influe différemment sur le comportement vibratoire global de l'aile, notamment en cas de dissymétrie de masse. Cela nous permettra de déterminer si l'effet du déséquilibre dépend uniquement du taux de remplissage ou également de sa localisation.

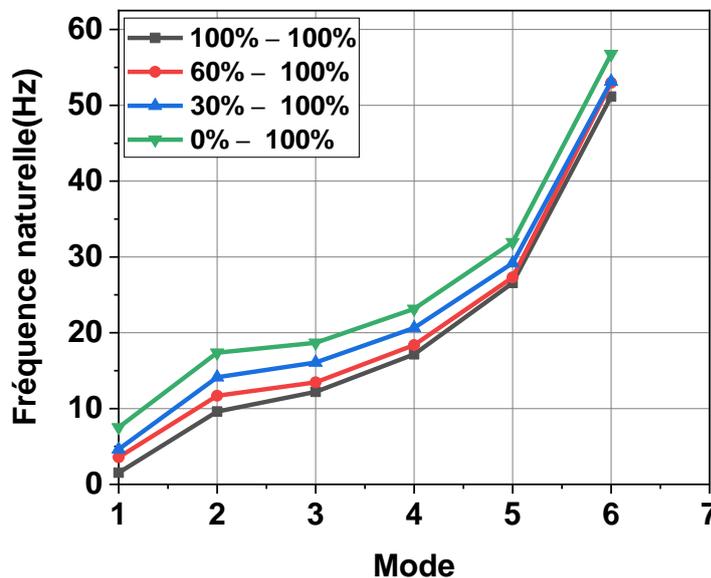


Figure 5.22 Effet de l'inversion de la répartition du remplissage

On observe une augmentation progressive des fréquences propres au fur et à mesure que le réservoir vidé se trouve du côté opposé à la zone fixée (encastrement). Cette configuration entraîne une réduction de la masse proche de la zone libre, ce qui rend la structure globalement plus rigide et donc plus résonante. Ainsi, le fait de libérer le réservoir éloigné du point d'appui contribue directement à l'élévation des fréquences vibratoires.

5.4.9 Influence du profil NACA sur les fréquences propres

Dans cette partie, nous analysons l'effet de la géométrie du profil aérodynamique NACA sur le comportement vibratoire d'un réservoir en forme d'aile. Afin d'étudier cette influence, nous avons modélisé quatre profils différents appartenant à la même série, à savoir : NACA 0012, NACA 2412, NACA 4412 et NACA 23012.

Ces profils ont été choisis en raison de leurs caractéristiques distinctes en termes de cambrure et d'épaisseur relative, ce qui permet de mesurer avec précision l'impact de ces variations géométriques sur les fréquences naturelles.

Cette approche comparative vise à déterminer si le choix du profil aérodynamique, à lui seul, peut induire des écarts significatifs au niveau des modes propres et donc du comportement dynamique global de la structure.

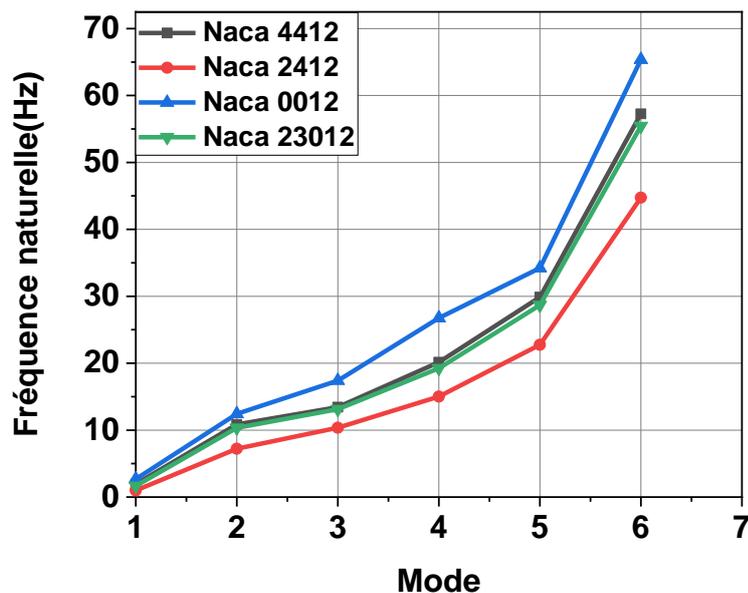


Figure 5.23 Influence du profil NACA

L'analyse comparative des quatre profils de la série NACA révèle que le NACA 0012 présente les fréquences propres les plus élevées parmi les configurations étudiées.

Il est suivi par les profils NACA 4412 et NACA 23012, dont les résultats sont très proches en termes de fréquences naturelles.

Le NACA 2412, quant à lui, enregistre les valeurs les plus faibles.

Cette hiérarchie peut s'expliquer par la distribution géométrique des profils. Le NACA 0012, étant un profil symétrique, assure une meilleure répartition des efforts structurels, ce qui contribue à une rigidité plus uniforme et donc à des fréquences plus élevées.

Les profils NACA 4412 et NACA 23012, bien qu'ils soient cambrés, présentent une géométrie relativement équilibrée qui leur confère une réponse dynamique assez similaire.

En revanche, le NACA 2412 combine une cambrure modérée avec une répartition de masse moins favorable, ce qui peut réduire localement la rigidité de la structure et expliquer les fréquences plus basses observées.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une analyse modale approfondie sur différents types de structures à savoir un réservoir cylindrique, un réservoir sphérique, ainsi qu'un profil d'aile en utilisant deux environnements de simulation numérique reconnus : ANSYS et COMSOL. L'objectif principal était d'étudier l'évolution des fréquences propres en fonction de plusieurs paramètres physiques, géométriques et de conditions de remplissage, afin de mieux cerner les facteurs qui influencent la réponse dynamique de ces structures.

L'étude a porté sur plusieurs aspects essentiels : l'effet du matériau (en considérant différentes propriétés mécaniques comme l'élasticité et la densité), l'effet de l'épaisseur (en modifiant l'inertie structurelle), l'effet du remplissage pour différents taux (20 %, 40 %, 60 %, et 100 %), ainsi que pour le profil d'aile, des cas spécifiques comme l'effet dièdre et le remplissage asymétrique.

Les résultats obtenus montrent que la sensibilité des fréquences propres varie considérablement selon le type de structure étudiée et les paramètres modifiés. Dans certaines configurations, notamment lorsque des changements importants sont introduits dans la masse

ou dans la rigidité (par exemple avec un remplissage important ou un changement de matériau), on observe une diminution notable des fréquences naturelles, traduisant une perte de rigidité dynamique. À l'inverse, dans d'autres cas, comme certaines variations d'épaisseur ou des taux de remplissage faibles, l'impact sur la réponse modale reste limité.

L'utilisation conjointe d'ANSYS et COMSOL nous a permis non seulement de comparer les capacités des deux logiciels à simuler les comportements vibratoires, mais aussi de valider nos résultats par une approche croisée. Cette complémentarité a renforcé la fiabilité des observations et permis de confirmer les tendances identifiées.

En conclusion, ce chapitre a mis en évidence l'importance d'une modélisation fidèle et complète des conditions physiques et géométriques dans l'analyse modale. Il a également souligné la complexité du comportement dynamique des structures soumises à des variations de configuration, et la nécessité de considérer ces effets dès les premières phases de conception pour garantir des performances mécaniques optimales, en particulier dans les domaines sensibles à la vibration comme l'aéronautique et le stockage sous pression.

Conclusion générale

Conclusion générale

Aujourd'hui, les réservoirs occupent une place centrale dans l'ingénierie moderne. Ils sont au cœur de nombreuses applications industrielles et technologiques, qu'il s'agisse de systèmes de propulsion, de stockage de carburants, ou de dispositifs de régulation thermique et hydrodynamique. Leur comportement dynamique sous diverses sollicitations représente un enjeu majeur, particulièrement face aux phénomènes vibratoires. Ces derniers, lorsqu'ils ne sont pas maîtrisés, peuvent engendrer des résonances destructrices, des instabilités mécaniques ou une usure prématurée. Comprendre les fréquences propres, les modes vibratoires, et les réponses structurelles devient alors une nécessité incontournable dans la conception et l'optimisation de ces systèmes.

Dans ce travail, nous avons mené une étude approfondie, structurée autour de cinq chapitres fondamentaux, où chaque aspect a été traité avec rigueur, clarté, et un souci de précision. Nous avons ainsi couvert tous les éléments clés permettant une compréhension globale et technique du comportement vibratoire des réservoirs.

Nous avons commencé, dans le premier chapitre, par la mise en place du socle théorique, en abordant en détail les notions essentielles telles que les vibrations libres, les systèmes dynamiques, les fréquences propres, ainsi que les modes propres de structures. Cela nous a permis de poser une base solide pour la suite de l'analyse.

Le deuxième chapitre nous a permis de nous concentrer sur les différents types de réservoirs utilisés dans l'étude. Nous avons analysé plusieurs géométries représentatives, comme les réservoirs cylindriques, sphériques, et à forme d'aile, en expliquant les raisons de leur choix selon les contextes industriels. Ce chapitre nous a permis de mieux situer l'intérêt de chaque géométrie, en tenant compte de ses avantages et de ses contraintes vibratoires.

Dans le troisième chapitre, nous avons développé toute la modélisation mathématique, en détaillant les équations qui régissent le comportement dynamique des réservoirs, les conditions aux limites, et les hypothèses nécessaires pour la simplification et la résolution. Nous avons également abordé les méthodes numériques utilisées pour obtenir les réponses modales et spectrales.

Conclusion générale

Ensuite, le quatrième chapitre a été entièrement dédié à la simulation numérique, où nous avons mis en œuvre notre démarche à l'aide de deux logiciels puissants : ANSYS et COMSOL Multiphysics. Nous avons présenté chaque étape de la modélisation, depuis la création géométrique jusqu'à la configuration des maillages, en passant par les paramètres physiques, les matériaux, les cas de chargement, et les types d'analyses effectuées.

Le cinquième chapitre, enfin, a été consacré à l'analyse des résultats. Nous avons exploré de façon systématique l'influence de plusieurs paramètres clés sur le comportement vibratoire des réservoirs : le type de matériau, l'épaisseur de la paroi, le niveau de remplissage, la symétrie, l'effet dièdre, ainsi que la longueur. Nous avons également effectué des comparaisons détaillées entre les résultats issus de ANSYS et ceux de COMSOL, révélant une cohérence très forte entre les deux environnements de calcul. Cette validation croisée nous a permis de renforcer la confiance dans nos simulations et d'extraire des conclusions solides quant aux facteurs ayant le plus grand impact sur les fréquences naturelles des réservoirs.

Par cette étude, nous avons pu clore l'analyse en montrant que certains paramètres influencent fortement les réponses vibratoires, tels que la densité des matériaux ou la géométrie générale du réservoir, tandis que d'autres comme certaines petites variations géométriques ou des effets secondaires ont un impact relativement limité. Cette hiérarchisation des influences est essentielle pour guider les futures conceptions optimisées, tout en maîtrisant les coûts de production et les performances mécaniques.

En conclusion, cette recherche nous a permis de traiter, analyser et comprendre en profondeur le comportement vibratoire des réservoirs modernes à travers une approche complète, multidisciplinaire, et appuyée par des outils numériques robustes. Les connaissances acquises ici ouvrent la voie à des perspectives d'optimisation concrètes dans les domaines de la conception, de la maintenance prédictive, et de l'innovation structurelle.

- **Perspectives d'avenir**

Dans le prolongement de ce travail, plusieurs pistes de recherche pourraient être explorées afin d'enrichir davantage l'analyse dynamique des réservoirs et des structures aéronautiques. Il serait particulièrement intéressant d'étudier l'interaction fluide-structure (interaction fluide-structure – IFS) afin de prendre en compte les effets dynamiques induits par le mouvement du carburant à l'intérieur du réservoir lors des vibrations.

Conclusion générale

De plus, l'analyse modale pourrait être étendue à d'autres formes géométriques de réservoirs, plus complexes ou inspirées des nouvelles conceptions utilisées dans l'aéronautique et l'aérospatiale.

Par ailleurs, il serait pertinent d'appliquer la même démarche d'analyse modale à d'autres parties critiques de l'avion, telles que le train d'atterrissage, les volets ou encore les structures internes, afin de mieux comprendre leur comportement vibratoire sous différentes conditions de vol.

Ces perspectives ouvrent la voie à des recherches plus avancées intégrant des modèles multiphysiques, des matériaux composites innovants, ainsi que des conditions opérationnelles plus représentatives du réel.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Sutton, G. P., & Biblarz, O. (2010). Rocket Propulsion Elements. Wiley.
- [2] Humble, R. W., Henry, G. N., & Larson, W. J. (1995). Space Propulsion Analysis and Design. McGraw-Hill.
- [3] Meirovitch, L. (1986). Elements of Vibration Analysis. McGraw-Hill.
- [4] Craig, R. R., & Kurdila, A. J. (2006). Fundamentals of Structural Dynamics. Wiley.
- [5] Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). The Finite Element Method. Butterworth-Heinemann.
- [6] Rao, S. S. (2011). Mechanical Vibrations. Pearson Education.
- [7] ANSYS Inc. (2019). ANSYS Mechanical APDL – Structural Analysis Guide.
- [8] COMSOL AB. (2020). COMSOL Multiphysics Reference Manual.
- [9] Blevins, R. D. (1979). Formulas for Natural Frequency and Mode Shape. Van Nostrand Reinhold.
- [10] Cours et travaux dirigés de mécanique vibratoire, USTHB.
- [11] Design and Modal Analysis of Cryogenic Rocket Propellant Tank (L. Ramola, N. Sankareswaran.)
- [12] Jullien, Jean-François. (2004). Aérodynamique et mécanique du vol, Ellipses.
- [13] Jazar, Reza N. (2010). Theory of Vibration with Applications, Springer.
- [14] ESA & CNES Publications – études sur les réservoirs cryogéniques et les vibrations en environnement spatial.
- [15] SolidWorks Simulation Help – Dassault Systèmes.

- [16] Abdul Khaleelullah, Sk. J. Basha & H. K. Rangavittal "Design and Analysis of Propellant Tanks Support Structure for an Advanced Spacecraft" (journal of applied research in mechanical engineering – 2011).
- [17] Donald E. Jaekle Jr. "Design and manufacturing of propellant tank assembly" (journal of AIAA – 2007).
- [18] George p. Sutton "Rocket propulsion elements" department of aeronautics (7th edition book) 2001.
- [19]https://uel.unisciel.fr/physique/syst_oscillants/syst_oscillants_ch04/co/apprendre_ch4_10.html
- [20]https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9servoir_externe_de_la_navette_spatiale_am%C3%A9ricaine
- [21]<https://www.nccuk.com/news/demonstrating-the-future-of-composite-space-tank-technology/>
- [22] <https://www.aircraftsystemstech.com/2017/06/types-of-aircraft-fuel-tanks.html?m=1>
- [23] <https://fr.f3lix-tutorial.com/what-is-vibration/vibration-spectrum>