



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algérienne Democratique Et  
Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère d'enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Chikh larbi tébessi

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master

# Amortissement vibratoire d'une poutre par l'effet de trou noir acoustique

Spécialité : Construction Mécanique

Par : Aimen REZAIGUIA & Islem MEBARKIA

Devant :

Dr. Hadj BELGHALEM	Président
Mr. Maalim MADANI	Examineur
Dr. Ramdane YOUNES	Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Le succès n'est pas de ne pas commettre d'erreurs.

Le succès est de ne pas répéter les mêmes erreurs.

Bernard Shaw

# Dédicace

Nous tiendrons à dédier ce travail à nos chers parents, que Allah prolonge leur vie.

Aux deux qui ont donné aux plaisirs de leur foie toute tendresse, aux deux qui ont tout patienté, qui ont pris soin de nous le droit aux soins et ils étaient notre soutien dans l'adversité, et ils étaient leurs prières pour que nous réussissions qui nous suivant pas à pas dans notre travail, à qui nous nous sentons à l'aise chaque fois que nous nous souvenons de leurs sourires sur nos visages, la source de tendresse, nos mères, les deux anges les plus chers au cœur et l'œil, que Dieu les récompense en notre nom avec la meilleure récompense dans les deux mondes.

Nous leur dédions cet humble travail afin d'apporter un peu de bonheur à nos frères dans leurs cœurs et nos sœurs qui ont partagé le fardeau de la vie avec nous et à toutes les personnes et les amies pour qui j'ai de l'amour et de l'appréciation.

## Remerciement

Nous remercions Allah pour sa grâce et son aide pour mener à bien cette recherche.

À ceux qui nous ont donné tout ce qu'ils avaient pour réaliser leurs espoirs, à ceux qui nous ont poussés à aller de l'avant.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre gratitude.

Nous voudrions tout d'abord adresser toute notre reconnaissance au directeur de ce mémoire, monsieur Ramdane YOUNES, pour son patience, son disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous sommes également heureux de remercier les professeurs membres du comité de discussion monsieur Hadj Belghanem et monsieur Maalim madani d'avoir accepté la discussion de la mémoire, jusqu'à ce que nous ouvrons les yeux sur ses lacunes.

Enfin, nous remercions les enseignants du département de Génie Mécanique et tous les professeurs de l'université de Tébessa, qui ont fourni l'expérience nécessaire à la réussite de notre étude universitaire.

# Résumé

Le trou noir acoustique dans les poutres est un phénomène qui se produit lorsqu'une onde acoustique est confinée dans une région très étroite d'une poutre, créant ainsi une analogie avec les trous noirs de l'espace.

Le trou noir acoustique dans les poutres trouve des applications importantes dans le domaine de l'acoustique et de la mécanique des structures. Il permet de contrôler et de manipuler les ondes sonores de manière précise et efficace. On peut l'utiliser pour créer des dispositifs d'isolation acoustique avancés, des guides d'ondes, des résonateurs de haute qualité, et même des capteurs ultrasensibles.

Le trou noir acoustique dans les poutres présente une grande importance en ingénierie et en recherche scientifique. Il permet de développer des technologies novatrices pour améliorer l'isolation phonique dans les bâtiments, réduire les vibrations indésirables dans les structures, concevoir des dispositifs de détection ultra-précis, et explorer de nouveaux domaines de la physique des ondes. Sa compréhension et son utilisation ouvrent des perspectives prometteuses pour de nombreux domaines, allant de l'architecture aux communications acoustiques en passant par la médecine.

L'objectif principal de ce travail est de mettre en évidence les risques associés aux vibrations dans les structures, puis d'évaluer l'efficacité du trou noir acoustique en tant que solution d'amortissement des vibrations et sa Convivialité.

Ce travail est divisé en quatre parties principales :

La première partie de ce travail se concentre sur l'étude des concepts fondamentaux des poutres et des plaques afin d'acquérir une compréhension générale des structures. Ensuite, nous abordons les notions générales relatives au trou noir acoustique afin de poser les bases de ce concept.

Dans la deuxième partie, notre objectif était de comprendre les concepts des vibrations et fréquences, car ils constituent notre problématique dans le domaine des structures. Ensuite, nous expliquons la méthode analytique que nous utilisons pour déterminer les fréquences des vibrations dans les poutres.

La troisième partie se concentre sur l'utilisation du logiciel SolidWorks pour effectuer des simulations numériques d'une poutre, à la fois sans trou noir et avec trou noir. Nous présentons et

---

démontrons l'efficacité du trou noir acoustique en analysant les résultats obtenus à partir de ces simulations.

Dans la quatrième partie, nous décrivons le montage expérimental utilisé pour déterminer les fréquences des vibrations des poutres de manière pratique. Cette approche nous permet d'acquérir une meilleure compréhension de la propagation des vibrations dans les structures et de comparer les résultats obtenus expérimentalement avec ceux obtenus analytiquement et numériquement.

**Mots clés:**

Trou noir acoustique, poutre, Analyse modale, vibration, dynamique des structures.

---

# Abstract

The acoustic black hole in beams is a phenomenon that occurs when an acoustic wave is confined to a very narrow region of a beam, creating an analogy with black holes in space.

The acoustic black hole in beams finds important applications in the field of acoustics and structural mechanics. It allows controlling and manipulating sound waves precisely and efficiently. It can be used to create advanced noise isolation devices, waveguides, high-quality resonators, and even ultra-sensitive sensors.

The acoustic black hole in beams is of great importance in engineering and scientific research. It enables the development of innovative technologies to improve sound insulation in buildings, reduce unwanted vibrations in structures, design ultra-precise detection devices, and explore new areas of wave physics. Its understanding and use open up promising prospects for many fields, ranging from architecture to acoustic communications and medicine.

The main objective of this work is to highlight the risks associated with vibrations in structures, and then to evaluate the effectiveness of the acoustic black hole as a vibration damping solution and its user-friendliness.

This work is divided into four main parts:

The first part of this work focuses on studying the fundamental concepts of beams and plates in order to gain a general understanding of the structures. Then, we approach the general notions relating to the acoustic black hole in order to lay the foundations of this concept.

In the second part, our objective was to understand the concepts of vibrations and frequencies, because they constitute our problems in the field of structures. Next, we explain the analytical method we use to determine the frequencies of vibrations in the beams.

The third part focuses on the use of SolidWorks software to perform numerical simulations of a beam, both without black hole and with black hole. We present and demonstrate the efficiency of the acoustic black hole by analyzing the results obtained from these simulations.

---

In the fourth part, we describe the experimental setup used to determine the frequencies of beam vibrations in a practical way. This approach allows us to acquire a better understanding of the propagation of vibrations in structures and to compare the results obtained experimentally with those obtained analytically and numerically.

**Key words:**

Acoustic black hole, beam, modal analysis, vibration, structural dynamics.



## ملخص

الثقب الأسود الصوتي في الحزم هو ظاهرة تحدث عندما تقتصر الموجة الصوتية على منطقة ضيقة جدًا من الحزمة ، مما يخلق تشابهًا مع الثقوب السوداء في الفضاء.

يجد الثقب الأسود الصوتي في الحزم تطبيقات مهمة في مجال الصوتيات والميكانيكا الإنشائية. يسمح بالتحكم في الموجات الصوتية ومعالجتها بدقة وكفاءة. يمكن استخدامه لإنشاء أجهزة متقدمة لعزل الضوضاء ، وأدلة موجية ، ومرنانات عالية الجودة ، وحتى أجهزة استشعار فائقة الحساسية.

للثقب الأسود الصوتي في الحزم أهمية كبيرة في الهندسة والبحث العلمي. إنه يمكّن من تطوير تقنيات مبتكرة لتحسين عزل الصوت في المباني ، وتقليل الاهتزازات غير المرغوب فيها في الهياكل ، وتصميم أجهزة كشف فائقة الدقة ، واستكشاف مجالات جديدة في فيزياء الأمواج. إن فهمها واستخدامها يفتح آفاقًا واعدة للعديد من المجالات ، بدءًا من الهندسة المعمارية إلى الاتصالات الصوتية والطب.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تسليط الضوء على المخاطر المرتبطة بالاهتزازات في الهياكل ، ثم تقييم فعالية الثقب الأسود الصوتي كحل لتخميد الاهتزاز وسهولة استخدامه.

ينقسم هذا العمل إلى أربعة أجزاء رئيسية:

يركز الجزء الأول من هذا العمل على دراسة المفاهيم الأساسية للحزم والألواح من أجل اكتساب فهم عام للهياكل. بعد ذلك ، نقترب من المفاهيم العامة المتعلقة بالثقب الأسود الصوتي من أجل وضع أسس هذا المفهوم.

في الجزء الثاني ، كان هدفنا هو فهم مفاهيم الاهتزازات والترددات ، لأنها تشكل مشاكلنا في مجال الهياكل. بعد ذلك ، نشرح الطريقة التحليلية التي نستخدمها لتحديد ترددات الاهتزازات في الحزم.

يركز الجزء الثالث على استخدام برنامج "سوليد وركس" لإجراء محاكاة عددية للحزمة ، سواء بدون ثقب أسود أو مع ثقب أسود. نقدم ونوضح كفاءة الثقب الأسود الصوتي من خلال تحليل النتائج التي تم الحصول عليها من هذه المحاكاة.

في الجزء الرابع ، نصف الإعداد التجريبي المستخدم لتحديد ترددات اهتزازات الحزمة بطريقة عملية. يتيح لنا هذا النهج اكتساب فهم أفضل لانتشار الاهتزازات في الهياكل ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها تجريبياً مع تلك التي تم الحصول عليها تحليلياً و عددياً.

### الكلمات المفتاحية:

ثقب أسود صوتي ، شعاع ، تحليل نمذجي ، اهتزاز ، ديناميكا هيكلية.

# Liste des figures:

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1</b> : Poutre en béton armée.....	5
<b>Figure 1.2</b> : Schéma de poutre à géométrie rectangulaire.....	5
<b>Figure 1.3</b> : Plaques (en acier).....	7
<b>Figure 1.4</b> : Poutre avec trou noir acoustique.....	8
<b>Figure 1.5</b> : Nombre TNA d'articles de revues à comité de lecture en 1988.....	8
<b>Figure 1.6a</b> : Géométrie TNA de type circulaire .....	11
<b>Figure 1.6b</b> : Géométrie TNA de type annulaire.....	11
<b>Figure 1.6c</b> : Géométrie TNA de type rectangulaire.....	11
<b>Figure 1.6d</b> : Géométrie de couche d'amortissement de type circulaire.....	11
<b>Figure 1.6e</b> : Géométrie de couche d'amortissement de type annulaire. ....	11
<b>Figure 1.6f</b> : Géométrie de couche d'amortissement de type rectangulaire.....	11
<b>Figure 1.7</b> : Exemple d'une plaque avec trou noir acoustique de type circulaire.....	11
<b>Figure 1.8</b> : Poutre de trou noir acoustique avec bord symétrique en forme de coin avec couche d'amortissement.....	14

## Chapitre 2

<b>Figure 2.1</b> : Poutre encastrée-libre (E-L).....	19
---	----

## Chapitre 3

<b>Figure 3.1</b> : Exemple de réalisation par Solidworks.....	25
<b>Figure 3.2</b> : Arbre de création Feature Manager.....	26

<b>Figure 3.3:</b> Property Manager.....	26
<b>Figure 3.4:</b> Configuration Manager. ....	27
<b>Figure 3.5:</b> Le visage principal de SolidWork. ....	27
<b>Figure 3.6:</b> La fenêtre principale de SolidWork.....	28
<b>Figure 3.7:</b> Barres d’outils. ....	28
<b>Figure 3.8:</b> Gestionnaire de commandes. ....	29
<b>Figure 3.9:</b> Barres d'outils contextuelles. ....	29
<b>Figure 3.10:</b> L’Étape 1. ....	29
<b>Figure 3.11:</b> L’Étape 2. ....	30
<b>Figure 3.12:</b> L’Étape 2. ....	30
<b>Figure 3.13:</b> L’Étape 3 simulation. ....	31
<b>Figure 3.14:</b> L’Étape 4 apply matériel. ....	31
<b>Figure 3.15:</b> L’Étape 5 Fixed geometry. ....	32
<b>Figure 3.16:</b> L’Étape 6 ‘’Run’’.....	32
<b>Figure 3.17 :</b> Déformées modales obtenues par solidWorks.....	33
<b>Figure 3.18 :</b> Fréquences et pulsations des modes.....	34
<b>Figure 3.19 :</b> Enlèvement du matière. ....	36
<b>Figure 3.20 :</b> Déformées modales obtenues par solidWorks avec TNA.....	37
<b>Figure 3.21 :</b> Fréquences et pulsations des modes avec TNA.....	38

## Chapitre 4

<b>Figure 4.1 :</b> Figure représentative du banc d’essais.....	41
<b>Figure 4.2 :</b> Poutre encastrée-libre (E-L). ....	41
<b>Figure 4.3 :</b> Photo de l’analyseur Brüel & kjaer Pulse 16.1 et les accéléromètres d’acquisition des signaux.....	42

<b>Figure 4.4</b> : Marteau d'impact type 8206.....	44
<b>Figure 4.5</b> : Accéléromètre CCLD TYPE 4533-B.....	44
<b>Figure 4.6</b> : Spectre de fonction de réponse en fréquence FRF.....	45

---

# Liste des tableaux

## Chapitre 2

**Tableau 2.1** : Les résultats de vibration dans le cas d'une poutre encastée libre ..... 22

## Chapitre 3

**Tableau 3.1** : Les vibrations d'une poutre (E-L) sans et avec trou noir..... 39

## Chapitre 4

**Tableau 4.1** : Les résultats globale d'une poutre (E-L)..... 46

# Table des matières

Dédicace.....	III
Remerciement.....	IV
Résumé.....	V
Abstract.....	VII
ملخص.....	IX
List des figures.....	X
List des Tableaux.....	XIII
Introduction générale.....	1

## Chapitre 1 : Généralités et synthèse bibliographique

1. Introduction .....	3
2. Généralités.....	3
2.1. Les poutres .....	3
2.2. Les plaques .....	4
3. Définition de trou noir acoustique .....	7
4. Le développement historique de trou noir acoustique (TNA).....	8
5. Les Formes de trous noirs acoustique.....	10
5.1. Le TNA circulaire .....	10
5.2. Le TNA annulaire.....	10
5.3. Le TNA rectangulaire .....	10
6. Le principe de trou noir acoustique.....	12
7. Synthèse bibliographique.....	12
8. Conclusion.....	16

## Chapitre 2 : Étude Analytiques des vibrations des poutres

1. Introduction.....	17
2. Notions sur la vibration.....	17
3. Notions sur la pulsation et la fréquence.....	18
4. Détermination de vibration d'une poutre analytiquement (cas encasté-libre).....	18
5. Conclusion.....	22

## **Chapitre 3 : Modélisation et analyse des vibrations d'une poutre par simulation numérique avec SolidWorks**

1. Introduction.....	24
2. Notion sur Solidworks.....	24
3. Détermination de vibration d'une poutre par Solidworks (poutre E-L sans trou noir).....	29
4. Détermination de vibration d'une poutres par Solidworks (poutre avec trou noir).....	34
5. La comparaison des résultats (Sans et avec trou noir) .....	38
6. Conclusion.....	39

## **Chapitre 4 : Étude Expérimentale**

1. Introduction.....	40
2. Plan expérimentale et matériel utilisé .....	40
2.1. Présentation du banc d'essais .....	40
2.2. La poutre .....	41
2.3. Matériel d'acquisition des mesures .....	42
2.4. Marteaux d'impact .....	43
2.5. Accéléromètre CCLD .....	44
3. La comparaison des résultats .....	45
4. Conclusion.....	46
Conclusions générales.....	47

# Introduction générale

Les vibrations indésirables sont un défi majeur dans les structures mécaniques, car elles peuvent entraîner des problèmes tels que la détérioration prématurée des composants, les défauts structurels et les perturbations des opérations. L'amortissement des vibrations est essentiel pour garantir la sécurité, la durabilité et les performances optimales des structures mécaniques. Une solution innovante et prometteuse pour atténuer les vibrations est l'utilisation de trous noirs acoustiques dans les structures.

L'effet de trou noir acoustique (TNA) a reçu une grande attention au cours de la dernière décennie pour ses performances d'amortissement élevées dans le contrôle des vibrations et son efficacité de conversion élevée dans la récupération d'énergie des structures intelligentes. La structure TNA a d'abord été appliquée à la poutre par Krylov [1], qui peut manipuler l'onde de flexion pour capturer l'énergie de l'onde de flexion en utilisant le changement d'épaisseur de la structure.

L'avantage clé des trous noirs acoustiques réside dans leur capacité à piéger et à dissiper efficacement l'énergie des vibrations indésirables. Lorsque les ondes acoustiques entrent en contact avec la structure périodique du trou noir acoustique, elles sont progressivement absorbées et converties en chaleur, réduisant ainsi l'amplitude des vibrations. Cette absorption sélective des fréquences vibratoires indésirables permet de cibler spécifiquement les modes de vibration problématiques, améliorant ainsi considérablement les performances de l'amortissement des vibrations.

De plus, les trous noirs acoustiques offrent une flexibilité de conception, ce qui signifie qu'ils peuvent être adaptés et optimisés pour différentes applications et conditions de fonctionnement. Ils peuvent être intégrés dans divers types de structures mécaniques, tels que les panneaux, les coques ou les poutres, afin de réduire les vibrations indésirables dans des domaines tels que l'industrie automobile, l'aérospatiale, la construction et bien d'autres encore.

*Est-ce que le trou noir acoustique ouvre la voie à des nouvelles solutions plus efficaces pour contrôler les vibrations ?*

Pour répondre à cette question, nous avons mené une étude sur les vibrations d'une poutre à la fois avec et sans l'utilisation d'un trou noir acoustique. Par la suite, nous avons effectué une comparaison des résultats obtenus pour évaluer l'efficacité de cette solution.



L'organisation des différents chapitres du mémoire traduit la démarche que nous avons suivie :

Le premier chapitre est dédié à une étude bibliographique et des notions générales des poutres et plaques. Nous commençons par présenter les concepts fondamentaux de ces structures, y compris leurs caractéristiques et leurs comportements mécaniques. Ensuite, nous explorons en détail le phénomène fascinant du trou noir acoustique. En outre, nous mettons en évidence le rôle crucial joué par ces structures dans le domaine de la résistance mécanique. Grâce à leur capacité à absorber et à dissiper efficacement les ondes acoustiques.

Le deuxième chapitre se concentre en détail sur le domaine des vibrations et des fréquences des poutres. Nous commençons par présenter les notions générales relatives à la vibration et nous détaillons les étapes nécessaires pour effectuer ces calculs analytiques, en mettant en évidence les formules mathématiques pertinentes et les concepts clé. En comprenant et en maîtrisant ces méthodes analytiques, les ingénieurs et les chercheurs peuvent prédire avec précision les fréquences de vibration d'une poutre donnée, ce qui est essentiel pour la conception et l'optimisation des structures afin de minimiser les effets indésirables liés aux vibrations, tels que la résonance et la fatigue.

Le troisième chapitre concentre sur l'utilisation de logiciel de conception assistée par ordinateur (Solidwork). Nous commençons par fournir une vue d'ensemble générale du logiciel Solidworks, puis nous explorons ensuite les étapes nécessaires pour modéliser une poutre dans Solidworks. Nous décrivons les outils et les fonctionnalités disponibles dans Solidworks pour créer une représentation numérique précisée de la poutre. Nous détaillons la procédure pour déterminer les fréquences de la poutre à l'aide du logiciel. Nous abordons également la modélisation avec un trou noir acoustique dans Solidworks, en présentant les modifications nécessaires pour intégrer cette caractéristique dans le modèle de la poutre. Nous discutons des paramètres spécifiques à prendre en compte pour représenter correctement le trou noir acoustique et son effet sur les vibrations de la poutre.

Le quatrième chapitre est consacré à la détermination pratique des vibrations des structures, en mettant l'accent sur les méthodes expérimentales utilisées pour mesurer et analyser les vibrations dans des conditions réelles. Nous commençons par présenter le montage expérimental, puis décrivons les étapes pratiques nécessaires pour effectuer une analyse des vibrations sur une poutre.

# Chapitre 1

## Généralités et synthèse bibliographique

### 1. Introduction

Le premier chapitre se focalise sur l'introduction des principes fondamentaux et une étude bibliographique des poutres et des plaques. Nous entamons en présentant les concepts essentiels de ces structures, y compris leurs caractéristiques et leurs comportements mécaniques. Ensuite, nous explorons minutieusement le phénomène captivant des trous noirs acoustiques. Nous examinons leur origine et les conditions propices à leur formation, ainsi que les diverses formes qu'ils peuvent revêtir et les types de trous noirs acoustiques existants. De plus, nous mettons en avant le rôle crucial joué par ces structures dans le domaine de la résistance mécanique. Grâce à leur capacité à absorber et à dissiper efficacement les ondes acoustiques, les trous noirs acoustiques offrent des opportunités prometteuses pour améliorer la robustesse et la durabilité des structures. Leur compréhension et leur utilisation judicieuse ouvrent de nouvelles perspectives dans les domaines de l'ingénierie et de la conception des matériaux.

### 2. Généralités

#### 2.1. Les poutres

Les poutres sont des éléments structurels utilisés dans la construction pour supporter des charges horizontales et verticales. Elles sont généralement fabriquées à partir de matériaux tels que le bois, l'acier ou le béton. Elles sont utilisées dans de nombreux types de structures, y compris les bâtiments, les ponts, les passerelles et les structures souterraines. Elles peuvent être conçues pour résister à des charges statiques ou dynamiques et peuvent être droites ou incurvées en fonction des besoins de la structure. Les poutres peuvent être soutenues de différentes manières, notamment par des murs, des colonnes ou d'autres poutres. La conception de la structure dépendra de facteurs tels que la charge à supporter, les conditions environnementales et les matériaux disponibles.

Les formes des poutres peuvent également varier, allant d'une section rectangulaire à une section en T ou en I, selon les besoins de la structure. Les poutres sont souvent utilisées en combinaison

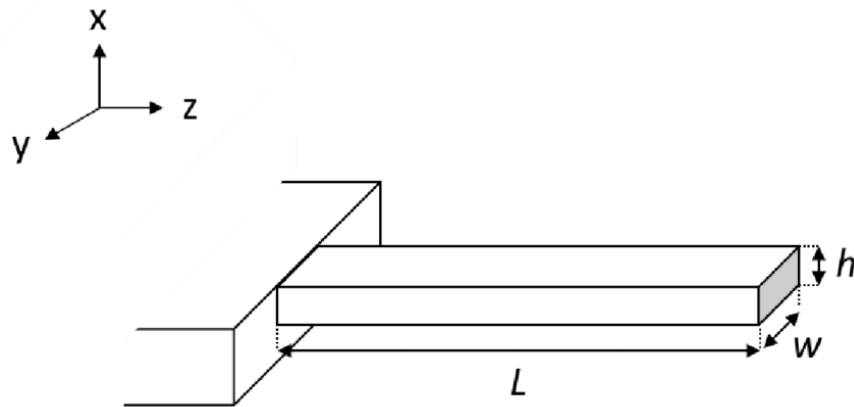
avec d'autres éléments structurels, tels que les poteaux et les dalles, pour former une structure solide et stable.

Les poutres ont plusieurs fonctions principales :

- **Soutien de charge** : Les poutres sont conçues pour soutenir le poids des éléments de construction situés au-dessus d'elles, ainsi que les charges qui leur sont appliquées, comme les murs, les planchers, les toits, les équipements, etc. Elles permettent ainsi de transférer ces charges vers les colonnes, les murs porteurs ou les fondations, assurant ainsi la stabilité globale de la structure.
- **Distribution des charges** : Les poutres permettent de distribuer les charges verticales sur une plus grande surface, réduisant ainsi les contraintes sur les éléments de construction adjacents et évitant les déformations excessives.
- **Rigidité et stabilité** : Les poutres contribuent à la rigidité et à la stabilité d'un bâtiment en résistant aux déformations et aux mouvements indésirables causés par les charges, les mouvements sismiques ou les vents.
- **Flexibilité de conception** : Les poutres offrent une grande flexibilité de conception, permettant de créer des structures complexes et variées, adaptées aux besoins spécifiques du projet de construction.
- **Économie de matériaux** : Les poutres permettent d'utiliser efficacement les matériaux de construction en répartissant les charges sur une plus grande surface et en minimisant la quantité de matériau nécessaire pour soutenir une charge donnée.
- **Adaptabilité** : Les poutres peuvent être modifiées ou renforcées pour s'adapter à des conditions de charge changeantes au cours de la durée de vie d'un bâtiment, ce qui permet de répondre aux besoins évolutifs de la structure.



**Figure 1.1 :** Poutre en béton armée.



**Figure 1.2 :** Schéma de poutre à géométrie rectangulaire.

## 2.2. Les plaques

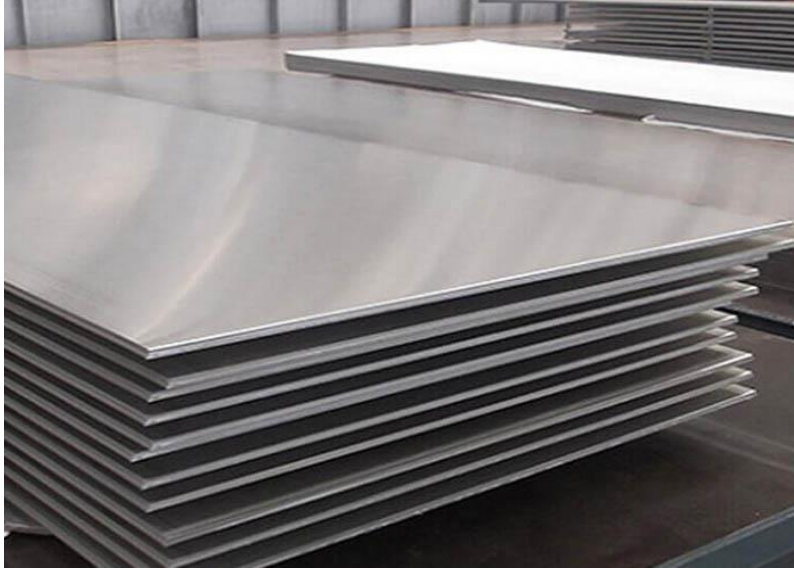
Les plaques sont des objets plats et rigides qui sont couramment utilisés dans de nombreux domaines de la vie quotidienne, de l'industrie et de la technologie. Elles peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux, tels que le métal, le plastique, le bois, la céramique ou le verre, et elles sont utilisées dans une grande variété d'applications en raison de leur polyvalence et de leur durabilité.

Les plaques sont utilisées dans de nombreux contextes différents. Par exemple, dans l'industrie automobile, les plaques sont utilisées comme composants dans la carrosserie des véhicules, les panneaux de commande et les systèmes de suspension. Dans le domaine de la construction, les plaques sont utilisées pour les revêtements de sol, les murs, les plafonds et les toits. Dans la cuisine, les plaques sont utilisées pour les assiettes, les plats de cuisson et les ustensiles de cuisson.

Les plaques peuvent avoir différentes formes et tailles en fonction de leur utilisation. Elles peuvent être rectangulaires, carrées, circulaires, ovales, ou même avoir des formes complexes selon les besoins. Les tailles des plaques peuvent varier de très petites, comme les plaques de circuit imprimé dans l'électronique, à très grandes, comme les plaques de revêtement de sol dans les bâtiments industriels.

Les plaques peuvent être fabriquées à partir d'une grande variété de matériaux, en fonction de leur application spécifique. Les plaques en métal, comme l'acier inoxydable, l'aluminium ou le cuivre, sont couramment utilisées dans l'industrie pour leur résistance et leur durabilité. Les plaques en plastique, comme le polycarbonate, le PVC ou l'acrylique, sont légères et résistantes à la corrosion, ce qui les rend idéales pour de nombreuses applications dans l'industrie et la technologie.

Les plaques en bois sont souvent utilisées dans la construction et l'ameublement pour leur aspect chaleureux et leur caractère renouvelable. Les plaques en céramique et en verre sont couramment utilisées dans la vaisselle et la décoration pour leur aspect esthétique et leur résistance à la chaleur.



**Figure 1.3 :** Plaques en acier.

### 3. Définition de trou noir acoustique

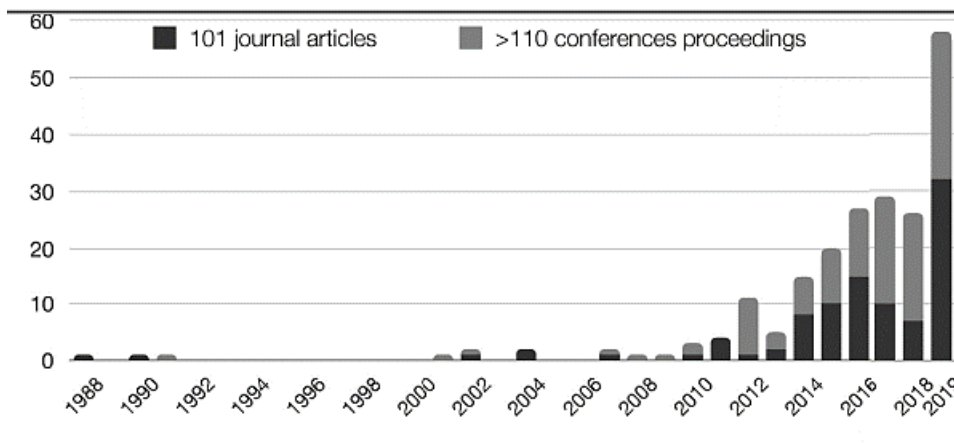
Le trou noir acoustique (TNA) est une technique de contrôle passif des vibrations récemment développée au sein des communautés Structural Dynamique et Vibro-acoustics. D'un point de vue générale, l'effet TNA est obtenu en enchâssant une inhomogénéité locale dans une structure à paroi mince, typiquement une poutre ou une plaque. Cette inhomogénéité se caractérise par une variation des propriétés géométriques (bien que des variations matérielles soient également possibles) selon un profil spatial en loi de puissance. La combinaison d'une diminution locale de la rigidité, due à la variation en loi de puissance de l'épaisseur de paroi, et d'une augmentation locale de l'amortissement. Nous pouvons ajouter une couches visco-élastique qui donne lieu à une réduction significative de la vitesse des vagues et à une remarquable amélioration des propriétés d'atténuation [2].



**Figure 1.4 :** Poutre avec trou noir acoustique.

#### 4. Le développement historique de trou noir acoustique (TNA)

Suite à l'étude initiale de Mironov [3]. Le champ TNA a connu une croissance régulière qui s'est rapidement accélérée au cours de la dernière décennie. La figure (1.5) montre le nombre d'articles de revues à comité de lecture ou d'actes de conférence par an depuis 1988. L'augmentation marquée du nombre de publications au cours des cinq dernières années est particulièrement frappante, ce qui témoigne de l'intérêt croissant des communautés d'ingénieurs sur ce sujet et ses applications.



**Figure 1.5 :** Nombre d'articles TNA de revues à comité de lecture en 1988.

Dans le développement historique du concept TNA, plusieurs phases peuvent être distinguées. Ces phases correspondent approximativement aux grandes idées à la base de l'effet TNA dont les applications peuvent se résumer ainsi :

- L'idée de départ consistait à utiliser une structure retardatrice pour construire une terminaison sans réflexion. Mironov a initialement proposé cette idée pour les ondes de flexion dans une poutre conique et l'a ensuite étendue à un tube acoustique avec une impédance de paroi variant axialement. Ces implémentations concernaient principalement l'effet TNA idéal sans dissipation. L'effet était purement réactif.
- Une première extension importante de l'idée de départ a consisté à adopter une couche absorbante pour contraster et, éventuellement, éliminer la réflexion d'onde liée à l'épaisseur non nulle (donc la vitesse d'onde non nulle) à l'extrémité de la terminaison TNA. L'idée d'exploiter une couche absorbante en conjonction avec l'effet TNA a été introduite par V. Krylov en 2004 et démontrée expérimentalement en 2007.
- Une autre étape importante dans le développement de l'effet TNA concerne l'extension du concept de coin absorbant aux configurations 2D. Plus précisément, un creux de profil de loi de puissance a été exploré comme moyen d'intégrer l'effet absorbant à l'intérieur de la surface de la plaque. Dans ce dernier cas, on parle d'un TNA encastré ou d'une indentation TNA. Plus tard, plusieurs études ont mis en évidence certaines caractéristiques de ce diffuseur conique, à savoir la focalisation des ondes, la faible réflectivité, l'amortissement local amélioré et la récupération d'énergie.
- Ces dernières années, l'étude des TNA embarqués s'est considérablement développée et de nombreux chercheurs ont abordé les aspects techniques les plus divers dont la réponse dynamique des poutres et plaques de différentes formes, les applications aux structures composites, l'effet des imperfections géométriques et matérielles, l'analyse paramétrique TNA, la synthèse de systèmes de métamatériaux avec des réseaux TNA périodiques, la non-linéarité hystérique (c'est-à-dire le trou noir acoustique non linéaire) et la propagation d'ondes guidées.

L'utilisation des TNA a également été explorée pour plusieurs applications pratiques, notamment l'atténuation des vibrations, le contrôle du rayonnement sonore, la récupération d'énergie, la personnalisation des ondes et la cochlée artificielle.



## 5. Les Forme de trous noirs acoustique

### 5.1. Le TNA circulaire

Le TNA circulaire (voir Figure 1.6a) est une forme conventionnelle pour contrôler les vibrations et le rayonnement sonore. Pendant que l'onde entrante se déplace vers le centre TNA, la vitesse de l'onde ralentit et le nombre d'onde ainsi que l'amplitude de l'onde augmentent rapidement à mesure que l'épaisseur locale diminue. Par conséquent, l'énergie des vagues sera piégée dans la région TNA.

Le rayon de la circulaire TNA est noté  $r_{abh}$  et l'épaisseur centrale est symbolisée par  $h_c$ . L'épaisseur du profil de le TNA circulaire est en outre exprimée comme :

$$h(r) = \left( (h_{uni} - h_c) \times \left( \frac{r}{r_{abh}} \right) \right)^m + h_c \quad (1.1)$$

Une couche visco-élastique circulaire ayant un rayon  $r_v$  et une épaisseur  $h_v$  (voir le cercle vert sur la figure 6.d) est fixé au centre TNA pour dissiper l'énergie vibratoire.

### 5.2. Le TNA annulaire

Le TNA annulaire a été utilisé pour isoler les vibrations dans et également proposé pour réduire le bruit dans le présent article. (comme la montre la figure 6.b), l'annulaire TNA a un rayon extérieur  $r_{ext}$  et un rayon intérieur  $r_{int}$ , ce qui donne le rayon central :

$$r_c = \left( \frac{r_{ext} + r_{int}}{2} \right) \quad (1.2)$$

et le rayon de TNA:

$$r_{abh} = \left( \frac{r_{ext} - r_{int}}{2} \right) \quad (1.3)$$

Une fine couche d'amortissement annulaire (voir Figure 6.e) avec un rayon extérieur  $r_{vo}$  et un rayon intérieur  $r_{vi}$  est collée au centre annulaire TNA.

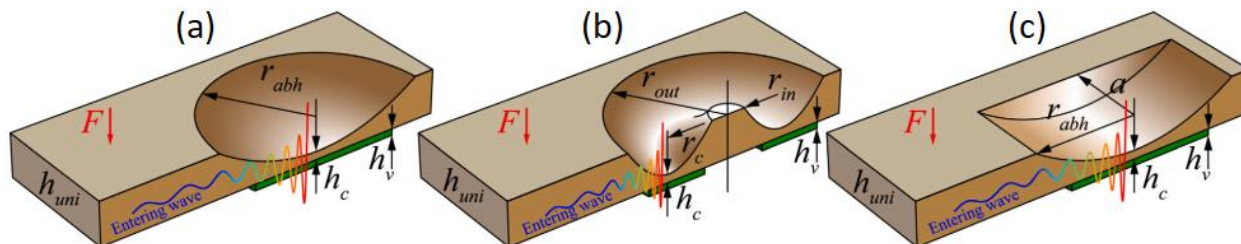
### 5.3. Le TNA rectangulaire

Le TNA rectangulaire a été tenté de supprimer les vibrations (comme le montre la figure 6.c), une rainure ayant une longueur  $2r_{abh}$  et largeur  $2a$  est en retrait d'un profil de loi de puissance dans la direction  $x$ .

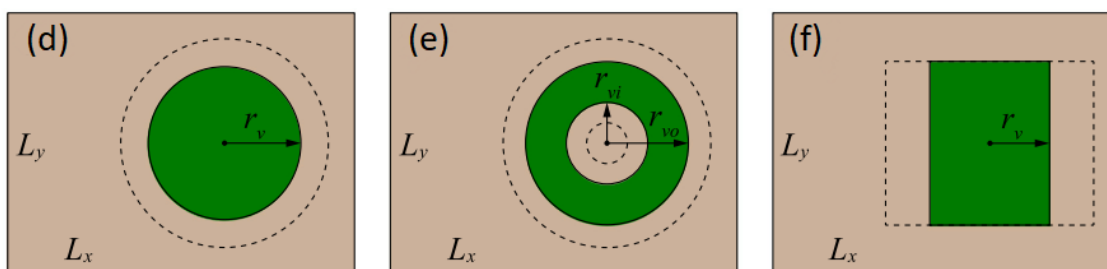
Une couche visco-élastique rectangulaire de demi-longueur  $r_v$ .

Chacun des trois TNA est inséré respectivement sur une plaque uniforme de dimension

$L_x \times L_y \times h_{uni}$  [4].



**Figure 1.6a:** Géométrie TNA de type circulaire,  
**b:** Géométrie TNA de type annulaire,  
**c:** Géométrie TNA de type rectangulaire.



**Figure 1.6d:** Géométrie de couche d'amortissement de type circulaire,  
**e:** Géométrie de couche d'amortissement de type annulaire,  
**f:** Géométrie de couche d'amortissement de type rectangulaire.



**Figure 1.7 :** Exemple d'une plaque avec trou noir acoustique de type circulaire.

## 6. Le principe de trou noir acoustique

Lorsqu'une onde élastique se déplace dans un TNA, sa vitesse subit une diminution régulière et continue. Dans le cas idéal, c'est-à-dire lorsque l'épaisseur de paroi disparaît au centre TNA, la vitesse de l'onde diminue jusqu'à zéro. Dans le cas où non-idéal, c'est-à-dire lorsque le TNA a une épaisseur résiduelle non nulle en son centre, la vitesse de l'onde décroît toujours doucement mais ne s'annule jamais. Dans ce dernier cas, qui est d'une grande importance pour les applications pratiques, le TNA est généralement combiné avec des milieux à pertes (par exemple des couches visco-élastiques) afin d'obtenir des facteurs de perte structurels considérablement améliorés. Si la vitesse d'une onde entrante peut disparaître à l'intérieur de le TNA, il s'ensuit que cet objet se comporte comme un piège à ondes qui extrait l'énergie élastique du milieu hôte sans, en principe, jamais la libérer. Plusieurs propriétés caractéristiques sont généralement observées dans les structures avec des TNA intégrés : réduction significative des niveaux de vibration et de rayonnement acoustique, faible coefficient de réflexion à l'emplacement de le TNA, vibrations localisées et modes piégés, et existence de fréquences de coupure. Contrairement aux méthodes de vibration passive basées sur des matériaux visco-élastiques, le TNA a été développé et appliqué pour réduire les vibrations et le bruit rayonné par la structure sans augmenter la masse totale du système. Plus récemment, des applications dans d'autres domaines, notamment la méta structures élastiques, la récupération d'énergie, les systèmes de vibro-impact et les systèmes cochléaires, ont également été étudiées [5].

## 7. Synthèse bibliographique

L'effet de trou noir acoustique (TNA) a reçu une grande attention au cours de la dernière décennie pour ses performances d'amortissement élevées dans le contrôle des vibrations et son efficacité de conversion élevée dans la récupération d'énergie des structures intelligentes. La structure TNA a d'abord été appliquée à la poutre par Krylov [6] qui peut manipuler l'onde de flexion pour capturer l'énergie de l'onde de flexion en utilisant le changement d'épaisseur de la structure.

Dans le domaine des poutres, Zeng et al. [7] ont établi un modèle dynamique d'une poutre cylindrique unidimensionnelle avec des caractéristiques TNA et des conditions aux limites arbitraires en utilisant une méthode semi-analytique. L'influence de la concentration d'énergie a été étudiée, et différents effets de concentration d'énergie entre les poutres cylindriques coniques et les poutres rectangulaires en forme de coin ont été analysés, ce qui fournit une orientation pour leur application dans le contrôle des vibrations et la collecte d'énergie.

Dans l'application de la récupération d'énergie, les TNA ont un énorme potentiel en raison de l'effet de focalisation de l'énergie. De plus, les caractéristiques de réduction et d'atténuation des vibrations des TNA ont également été intéressantes.

Cependant, tous les TNA mentionnés ci-dessus sont limités à des matériaux uniformes. Les matériaux composites dotés de propriétés physiques extraordinaires n'ont pas été appliqués aux structures de poutres avec TNA [8].

Les méthodes classiques d'amortissement passif des vibrations consistent généralement à utiliser une couche d'amortissement lourde ou des amortisseurs de masse accordés. Ces méthodes ont été largement étudiées et se sont avérées efficaces, mais leur mise en œuvre entraîne également une forte masse ajoutée qui est préjudiciable dans de nombreux domaines allant de l'industrie du transport à l'ingénierie aérospatiale. Par conséquent, le développement de techniques d'atténuation des vibrations sans masse ajoutée présente clairement un intérêt.

Par conséquent, hors des basses fréquences, le coefficient de réflexion de l'extrémité du faisceau est très faible et le faisceau affiche une réponse non-résonante, comme s'il était d'extension infinie.

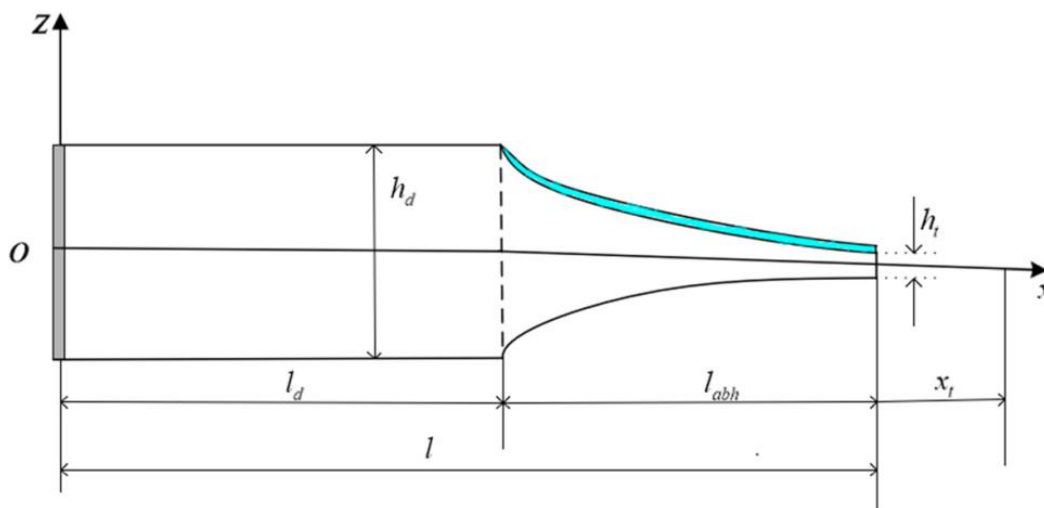
Des travaux théoriques et numériques ont été réalisés pour modéliser le coefficient de réflexion de la terminaison de faisceau TNA, pour étudier l'augmentation des rapports d'amortissement modal et du facteur de recouvrement modal, et pour optimiser la conception des structures TNA et de sa couche d'amortissement. Y compris de nouvelles formes de TNA telles que la spirale ou des distributions de TNA intégrées dans des structures en forme de plaque. D'autres études considèrent l'effet TNA comme un moyen de récupération d'énergie. Les preuves expérimentales de l'effet TNA utilisant une variété de structures en forme de poutre et en forme de plaque sont également nombreuses. Toutes ces études ont confirmé la grande efficacité de le TNA pour l'amortissement des vibrations. Cependant, un inconvénient connu et constant de toute mise en œuvre est que les TNA sont généralement inefficaces dans la gamme des basses fréquences. Comme explication rigoureuse, il existe une fréquence de coupure en dessous de laquelle le TNA peut perdre son efficacité. Bien que la fréquence de coupure puisse être réduite d'une manière ou d'une autre en modifiant les paramètres caractéristiques d'un TNA, elle reste malheureusement inévitable dans le cadre linéaire traditionnel de la conception TNA.

Pour améliorer son efficacité globale d'atténuation des vibrations, l'effet TNA doit être avantageusement associé à un autre effet capable d'adresser les basses fréquences. L'idée d'utiliser un mécanisme non-linéaire pour transférer l'énergie des basses fréquences - où le trou noir est inefficace - vers les hautes fréquences - où le trou noir est très efficace, a émergé récemment. La

non-linéarité géométrique comme moyen de réaliser ce transfert a été étudiée avec succès dans un travail précédent. Cependant, l'échelle de temps de ce mécanisme est grande par rapport aux périodes typiques des ondes basses fréquence ciblée, de sorte que les gains attendus restent limités et ne peuvent être obtenus immédiatement [9].

On utilise un vibro-impact comme mécanisme non-linéaire pour transférer rapidement de l'énergie dans le domaine des hautes fréquences, afin d'améliorer l'efficacité des trous noirs acoustiques. Les amortisseurs d'impact ont été introduits dans le passé en tant qu'oscillateurs d'impact pour les systèmes à un ou deux degrés de liberté et parfois appliqués à des structures continues telles que la poutre en porte-à-faux rotative avec un amortisseur d'impact unique.

Dans le même ordre d'idées, l'amortissement particulière a été étudié comme moyen de réduire les vibrations, où la capacité d'amortissement est apportée par la présence de nombreuses particules hébergées dans des trous percés dans la structure. Plus récemment, les vibro-impacts ont été utilisés dans un certain nombre d'études portant sur le concept de puits d'énergie non-linéaire (NES), défini comme un absorbeur de vibrations non-linéaire n'ayant pas de force de rappel linéaire [10].



**Figure 1.8 :** Poutre de trou noir acoustique avec bord symétrique en forme de coin avec couche d'amortissement.

Dans le domaine des plaques, Park et al. [11]. proposent un absorbeur de guide d'ondes (WGA) basé sur un TNA pour contrôler les vibrations dans les structures de plaques. Les résultats des simulations et des expériences montrent que de grandes réductions des pics de résonance pourraient être obtenues en dessous de 500 Hz en attachant quelques WGA légers à une plaque uniforme.

Le LRM comprend une cellule unitaire qui se répète périodiquement et réalise l'écart de résonance local grâce à l'interaction des ondes se propageant et des résonateurs.

Une configuration TNA en forme de plaque est proposée agissant comme un résonateur multifréquence lorsqu'elle est fixée à une plaque subissant des vibrations de flexion et, par conséquent, atténuant la vibration à large bande d'une plaque hôte. Les trous noirs acoustiques ont été utilisés avec succès comme dispositif complémentaire à un faisceau hôte pour réduire ses vibrations sous la forme d'un amortisseur de faisceau résonnant (TNA -RBD). Cependant, cette approche n'a pas été explorée sur une configuration plaque sur plaque, qui présente une dynamique plus riche par rapport à un type de faisceau de résonateurs. Une telle configuration peut être trouvée dans la combinaison du fuselage de l'avion et du panneau intérieur.

Le résonateur en forme de plaque intégré à un TNA peut surmonter certaines limitations des LRM qui ont tendance à agir sur une bande de fréquence plus large que la conception typique d'un seul résonateur, mais toujours plus étroite pour certaines applications. De plus, les LRM nécessitent également une grille de résonateurs tandis que l'approche basée sur le TNA proposée atténuera une gamme de fréquences plus large sans la nécessité de cette complexité géométrique accrue. Il est connu que l'utilisation d'une couche contrainte de matériau visco-élastique améliore l'amortissement du dispositif TNA par rapport à l'utilisation d'une couche externe. L'une des premières utilisations d'un TNA pour réduire les vibrations dans une structure a été de l'appliquer sur des structures qui présentaient déjà des effilements, comme le bord de fuite des aubes de turbine.

De plus, il faut être prudent afin de ne pas compromettre l'intégrité structurelle avec la réduction de l'épaisseur. Il est possible de pallier cela en utilisant des composés TNA. Des grilles de TNA composés dans des faisceaux ont été utilisées pour améliorer les performances à des fréquences plus basses. Pour les structures en forme de plaques, l'atténuation due à un angle d'incidence arbitraire des ondes nécessite encore des études complémentaires [12].

Le résonateur en forme de plaque intégré à un TNA peut surmonter certaines limitations des LRM qui ont tendance à agir sur une bande de fréquence plus large que la conception typique d'un seul résonateur, mais toujours plus étroite pour certaines applications. De plus, les LRM nécessitent également une grille de résonateurs tandis que l'approche basée sur le TNA proposée atténuera une gamme de fréquences plus large sans la nécessité de cette complexité géométrique accrue. Il est connu que l'utilisation d'une couche contrainte de matériau visco-élastique améliore l'amortissement du dispositif TNA par rapport à l'utilisation d'une couche externe.

L'une des premières utilisations d'un TNA pour réduire les vibrations dans une structure a été de l'appliquer sur des structures qui présentaient déjà des effilements, comme le bord de fuite des aubes de turbine. De plus, il faut être prudent afin de ne pas compromettre l'intégrité structurelle avec la réduction de l'épaisseur. Il est possible de pallier cela en utilisant des composés TNA. Des grilles de TNA composés dans des faisceaux ont été utilisées pour améliorer les performances à des fréquences plus basses. Pour les structures en forme de plaques, l'atténuation due à un angle d'incidence arbitraire des ondes nécessite encore des études complémentaires [13].

L'étude du comportement vibrationnel et du flux d'énergie d'une plaque connectée à un résonateur en forme de plaque équipé d'un trou noir acoustique 1D (TNA) est proposée en mettant l'accent sur les performances d'atténuation. Il est important de noter que le 1D fait référence à la description de le TNA. Un TNA 1D suit simplement un profil de loi de puissance. Dans ce cas, le profil de décomposition de le TNA est le long de la direction  $x$  de la plaque, extrudant sa forme dans la direction  $y$ . Comparativement, un TNA 2D est obtenu par la révolution de ce profil de coin le long d'un axe central, créant une « fosse » ou une calotte sphérique.

## 8. Conclusion

L'étude des trous noirs acoustiques dans les poutres a d'importantes applications pratiques, notamment dans le domaine de l'amortissement des vibrations et de la réduction du bruit. En incorporant des structures de trous noirs acoustiques dans la conception de systèmes mécaniques, les ingénieurs peuvent réduire les vibrations et le bruit générés par les machines et les équipements.

Dans l'ensemble, l'étude des trous noirs acoustiques dans les faisceaux a des implications à la fois fondamentales et pratiques, et continuera d'être un domaine de recherche actif en acoustique et en science des matériaux.

# Chapitre 2

## Étude Analytique des vibrations des poutres

### 1. Introduction

Le deuxième chapitre se concentre de manière approfondie sur le domaine des vibrations et des fréquences des poutres. Nous commençons par introduire les concepts généraux liés aux vibrations, puis nous détaillons les étapes nécessaires pour effectuer des calculs analytiques, en mettant en évidence les formules mathématiques pertinentes et les concepts clés. En maîtrisant ces méthodes analytiques, les ingénieurs et les chercheurs sont en mesure de prédire avec précision les fréquences de vibration d'une poutre donnée. Cette capacité est essentielle pour la conception et l'optimisation des structures afin de minimiser les effets indésirables associés aux vibrations, tels que la résonance et la fatigue.

### 2. Notions sur la vibration

En physique, le terme « vibration » désigne le mouvement d'un système qui reste voisin de son état de repos, de son état d'équilibre. Une masse accrochée à un ressort, un circuit électrique RLC, un haut-parleur ou une molécule diatomique représentent quelques exemples de systèmes qui sont les sièges de vibrations.

On distingue plusieurs types de vibrations :

**-Vibration longitudinale :** C'est une vibration qui se produit lorsque les particules d'un objet ou d'un système vibrent dans la direction de propagation de l'onde. Par exemple, les vibrations longitudinales se produisent dans les ressorts ou dans les colonnes d'air.

**-Vibration transversale :** C'est une vibration qui se produit lorsque les particules d'un objet ou d'un système vibrent perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde. Par exemple, les vibrations transversales se produisent dans les cordes de guitare ou des membranes.

**-Vibration torsionnelle :** C'est une vibration qui se produit lorsque des forces de torsion sont appliquées à un objet ou à un système mécanique. Les vibrations torsionnelles se produisent souvent dans les arbres, les poutres ou les arbres de transmission de puissance.

Les notions d'onde et de vibration même si elles semblent s'entremêler sont à distinguer.



En effet, la notion d'onde renvoie à une grandeur qui varie et se propage, dans le temps et dans l'espace (son, lumière, etc.). La notion de vibration, quant à elle, renvoie à l'oscillation d'un milieu (corde, ressort, etc.). Ces oscillations peuvent toutefois être mathématiquement représentées par une superposition d'onde [14].

### 3. Notions sur la pulsation et la fréquence

En physique, la fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit par unité de temps. Dans le Système international d'unités, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz).

La notion de fréquence s'applique aux phénomènes périodiques ou non. L'analyse spectrale transforme la description d'un phénomène en fonction du temps en description en fonction de la fréquence.

La fréquence est étroitement liée aux ondes. Par exemple, dans le domaine des ondes sonores, une fréquence plus élevée correspond à un son plus aigu, tandis qu'une fréquence plus basse correspond à un son plus grave. De manière similaire, dans le domaine des ondes électromagnétiques, une fréquence plus élevée correspond à une onde plus énergétique (comme les rayons X ou les rayons gamma), tandis qu'une fréquence plus basse correspond à une onde moins énergétique (comme les ondes radio). [15].

La pulsation d'un phénomène périodique est la valeur de la vitesse de rotation qu'aurait un système en rotation de même fréquence : pour une fréquence  $f$ , la pulsation est donc :

$$\omega = 2\pi.f \text{ (rad / s)} \quad (2.1)$$

### 4. Détermination de vibration d'une poutre analytiquement (cas encasté-libre)

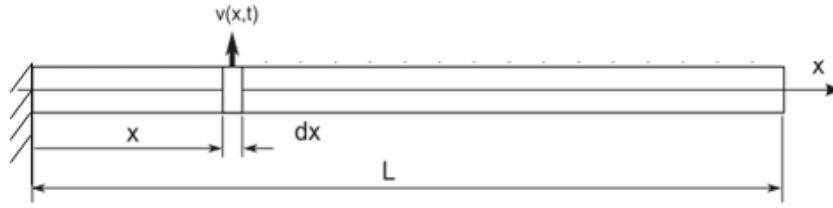
Une poutre en acier de longueur  $L=0.5$  m, de largeur  $b=0.03$  m et d'épaisseur  $h=0.005$  m, de section uniforme. La poutre est encastée-libre (E-L), est soumise à des vibrations transversales.

$\rho$  : la masse volumique =  $7850 \text{ kg/m}^3$

$E$  : module de young =  $2.10^{11} \text{ N/m}^2$

$$I : \text{moment d'inertie de flexion} = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.03 \times 0.005^3}{12} = 3.125 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

$$S : \text{section} = b \times h = 0.03 \times 0.005 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$



**Figure 2.1** : Poutre encastree-libre (E-L).

Sachant que la réponse de cette poutre a pour expression :

Les fréquences  $\omega$  sont déterminées par l'application des conditions aux limites.

$$v(x, t) = (A \sin \omega t + B \cos \omega t)(C \sin \beta x + D \cos \beta x + E \sinh \beta x + F \cosh \beta x) \quad (2.2)$$

Les conditions aux limites de la poutre encastree-libre sont :

À  $x=0$  : Encastrement (déplacement + pente)

$$\begin{cases} v(0, t) = 0 \\ \frac{\delta v}{\delta x}(0, t) = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

À  $x=L$  : Libre (Effort tranchant cisailent + Moment fléchissant)

$$\begin{cases} \frac{\delta}{\delta x} \left( EL_f \frac{\delta^2 v}{\delta x_1^2} \right) (L, t) = 0 \\ EL_f \frac{\delta^2 v}{\delta x_1^2} (L, t) = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Les fréquences sont déterminées par l'application des conditions aux limites. On a quel que soit l'instant  $t$  :

$$\begin{cases} \Phi(x) = C \sin \beta x + D \cos \beta x + E \sinh \beta x + F \cosh \beta x \\ \Phi'(x) = C \beta \cos \beta x - D \beta \sin \beta x + E \beta \cosh \beta x + F \beta \sinh \beta x \\ \Phi''(x) = -C \beta^2 \sin \beta x - D \beta^2 \cos \beta x + E \beta^2 \sinh \beta x + F \beta^2 \cosh \beta x \\ \Phi'''(x) = -C \beta^3 \cos \beta x - D \beta^3 \sin \beta x + E \beta^3 \cosh \beta x + F \beta^3 \sinh \beta x \end{cases} \quad (2.5)$$

CL:

$$\begin{cases} \Phi(0) = C \sin \beta 0 + D \cos \beta 0 + E \sinh \beta 0 + F \cosh \beta 0 = 0 \\ \Phi'(0) = C \beta \cos \beta 0 - D \beta \sin \beta 0 + E \beta \cosh \beta 0 + F \beta \sinh \beta 0 = 0 \\ \Phi''(L) = -C \beta^2 \sin \beta L - D \beta^2 \cos \beta L + E \beta^2 \sinh \beta L + F \beta^2 \cosh \beta L = 0 \\ \Phi'''(L) = -C \beta^3 \sin \beta L - D \beta^3 \cos \beta L + E \beta^3 \cosh \beta L + F \beta^3 \sinh \beta L = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

$\beta \neq 0$

Donc :

$$\begin{cases} D + F = 0 \\ C + E = 0 \\ -C \sin \beta L - D \cos \beta L + E \sinh \beta L + F \cosh \beta L = 0 \\ -C \sin \beta L - D \cos \beta L + E \cosh \beta L + F \sinh \beta L = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Les solutions autres que les solutions identiquement nulles impliquent que le déterminant du système soit nul.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta L & -\cos \beta L & \sinh \beta L & \cosh \beta L \\ -\cos \beta L & \sin \beta L & \cosh \beta L & \sinh \beta L \end{bmatrix} \begin{pmatrix} C \\ D \\ E \\ F \end{pmatrix} = 0 \quad (2.8)$$

$\text{Det}(A) = 0$

$$\begin{aligned} & 0 \times \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\cos \beta L & \sinh \beta L & \cosh \beta L \\ \sin \beta L & \cosh \beta L & \sinh \beta L \end{bmatrix} - 1 \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -\sin \beta L & \sinh \beta L & \cosh \beta L \\ -\cos \beta L & \cosh \beta L & \sinh \beta L \end{bmatrix} \\ & + 0 \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta L & -\cos \beta L & \cosh \beta L \\ -\cos \beta L & \sin \beta L & \sinh \beta L \end{bmatrix} - 1 \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta L & -\cos \beta L & \sinh \beta L \\ -\cos \beta L & \sin \beta L & \cosh \beta L \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} & -\left[ (\sinh^2 \beta L - \cosh^2 \beta L) - (-\sin \beta L \times \sinh \beta L + \cos \beta L \times \cosh \beta L) \right] \\ & - \left[ (-\cos \beta L \times \cosh \beta L - \sin \beta L \times \sinh \beta L) + (-\sin^2 \beta L - \cos^2 \beta L) \right] = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} & -(\sinh^2 \beta L - \cosh^2 \beta L) + \sin \beta L \times \sinh \beta L - \cos \beta L \times \cosh \beta L \\ & -(-\cos \beta L \times \cosh \beta L - \sin \beta L \times \sinh \beta L) - \sin^2 \beta L - \cos^2 \beta L = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$2 + 2 \cos \beta L \times 2 \cosh \beta L = 0$$

Alors:

$$1 + \cos \beta L \times \cosh \beta L = 0 \quad (2.12)$$

Les fréquences, compte tenu de l'expression de  $\beta$  :

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} \quad \alpha = \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}$$

Donc :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{\rho S \omega^2}{EI}} \quad \omega_n = \frac{(\beta_n L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}$$

Les premières valeurs de  $(\beta_n L)^2$  pour les conditions aux limites les plus courantes sont présentées dans le tableau suivant :

$(\beta_1 L)^2$	$(\beta_2 L)^2$	$(\beta_3 L)^2$
3,516	22,03	61,69

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.03 \times 0.005^3}{12} = 3.125 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

$$S = b \times h = 0.03 \times 0.005 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\omega_1 = \frac{(\beta_1 L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} = \frac{3.516}{0.5^2} \sqrt{\frac{2 \times 10^{11} \times 3.125 \times 10^{-10}}{7850 \times 1.5 \times 10^{-4}}} = 102.45 \text{ rad/s}$$

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{102.45}{2\pi} = 16.3 \text{ Hz}$$

$$\omega_2 = \frac{(\beta_2 L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} = \frac{22.03}{0.5^2} \sqrt{\frac{2 \times 10^{11} \times 3.125 \times 10^{-10}}{7850 \times 1.5 \times 10^{-4}}} = 641.95 \text{ rad/s}$$

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{641.95}{2\pi} = 102.71 \text{ Hz}$$

$$\omega_3 = \frac{(\beta_3 L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} = \frac{61.69}{0.5^2} \sqrt{\frac{2 \times 10^{11} \times 3.125 \times 10^{-10}}{7850 \times 1.5 \times 10^{-4}}} = 1797.64 \text{ rad/s}$$

$$f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi} = \frac{1797.64}{2\pi} = 284.24 \text{ Hz}$$

$$i > 3 \quad \beta_i L \cong (2i-1) \frac{\pi}{2}$$

$(\beta_4 L)^2$	$(\beta_5 L)^2$	$(\beta_6 L)^2$
120.78	199.65	298.25

$$\omega_4 = \frac{(\beta_4 L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} = \frac{120.78}{0.5^2} \sqrt{\frac{2 \times 10^{11} \times 3.125 \times 10^{-10}}{7850 \times 1.5 \times 10^{-4}}} = 3519.52 \text{ rad/s}$$

$$f_4 = \frac{\omega_4}{2\pi} = \frac{3519.52}{2\pi} = 560.43 \text{ Hz}$$

$$\omega_5 = \frac{(\beta_5 L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} = \frac{199.65}{0.5^2} \sqrt{\frac{2 \times 10^{11} \times 3.125 \times 10^{-10}}{7850 \times 1.5 \times 10^{-4}}} = 5817.78 \text{ rad/s}$$

$$f_5 = \frac{\omega_5}{2\pi} = \frac{5817.78}{2\pi} = 926.4 \text{ Hz}$$

$$\omega_6 = \frac{(\beta_6 L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} = \frac{298.25}{0.5^2} \sqrt{\frac{2 \times 10^{11} \times 3.125 \times 10^{-10}}{7850 \times 1.5 \times 10^{-4}}} = 8690.97 \text{ rad/s}$$

$$f_6 = \frac{\omega_6}{2\pi} = \frac{8690.97}{2\pi} = 1383.91 \text{ Hz}$$

Le tableau 2.1 présente les résultats des vibrations pour une poutre encastée-libre. Ces résultats fournissent des informations précieuses sur les différentes fréquences de vibration observées dans cette configuration spécifique de la poutre. L'analyse de ces données permet de mieux comprendre le comportement vibratoire de la poutre.

Nombre	$\omega$ (rad/s)	f (Hz)
1	102.45	16.3
2	641.95	102.71
3	1797.64	284.24
4	3519.52	560.43
5	5817.78	926.4
6	8690.97	1383.91

**Tableau 2.1 :** Les résultats de vibration dans le cas d'une poutre encastée libre.

## 5. Conclusion :

En conclusion, l'analyse du domaine de fréquence d'une poutre est essentielle pour comprendre son comportement vibratoire et sa réponse aux charges dynamiques. La connaissance de la fréquence naturelle de la poutre permet de déterminer la fréquence à laquelle elle peut être excitée et

---

de prévoir les effets de la résonance sur la structure. Les méthodes d'analyse de fréquence peuvent également être utilisées pour concevoir des systèmes d'isolation vibratoire pour réduire les vibrations indésirables de la poutre. En somme, une compréhension approfondie du domaine de fréquence d'une poutre est essentielle pour la conception, la maintenance et la sécurité des structures.

# Chapitre 3

## Modélisation et analyse des vibrations d'une poutre par simulation numérique avec SolidWorks

### 1. Introduction

Le troisième chapitre se focalise sur l'utilisation du logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) SolidWorks. Il commence par une présentation générale de ce logiciel, puis explore les étapes nécessaires pour modéliser une poutre dans SolidWorks. Les outils et les fonctionnalités de SolidWorks sont décrits en détail pour créer une représentation numérique précise de la poutre. La procédure pour déterminer les fréquences de vibration de la poutre à l'aide du logiciel est expliquée. De plus, la modélisation des vibrations avec un trou noir acoustique dans SolidWorks est abordée, en présentant les ajustements requis pour intégrer cette caractéristique dans le modèle de la poutre. Les paramètres spécifiques à prendre en compte pour représenter correctement le trou noir acoustique et son impact sur les vibrations de la poutre sont discutés.

### 2. Notion sur Solidworks

Le logiciel de CAO SolidWorks® est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises.

Les pièces constituent les éléments de base du logiciel SOLIDWORKS. Les assemblages contiennent des pièces ou d'autres assemblages, appelés des sous-assemblages.

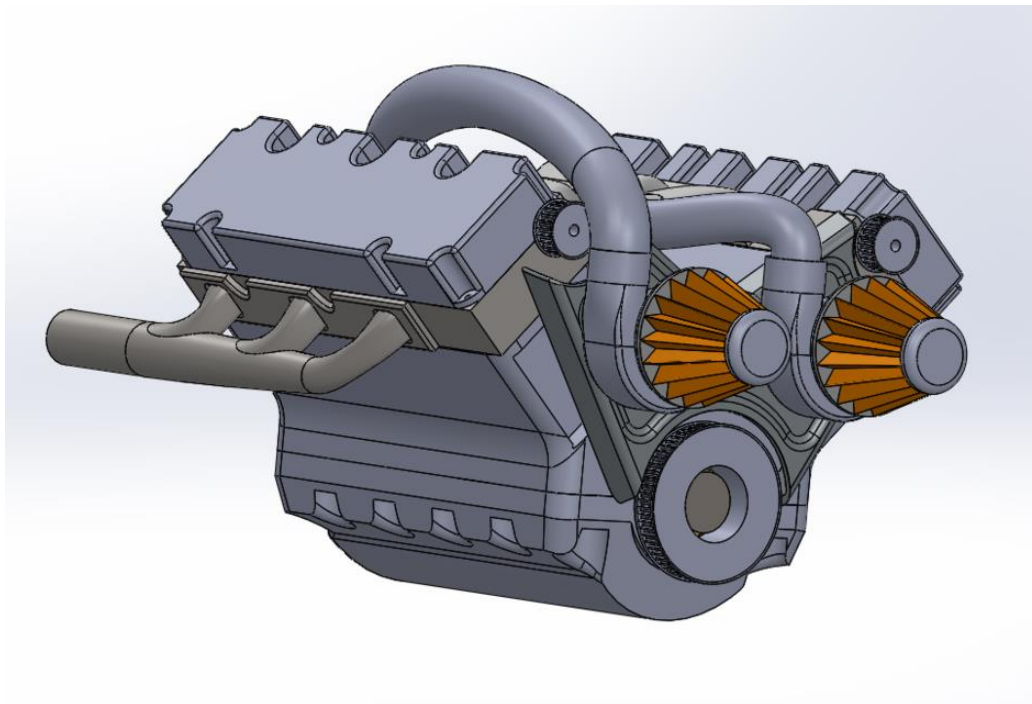
Un modèle SOLIDWORKS est constitué de géométrie 3D qui définit ses arêtes, faces et surfaces. Le logiciel SOLIDWORKS vous permet de concevoir rapidement des modèles précis. Les modèles SOLIDWORKS sont :

- basés sur la modélisation 3D.
- basés sur les composants.

SOLIDWORKS adopte l'approche de modélisation 3D. Lorsque vous concevez une pièce, vous créez un modèle 3D, de l'esquisse initiale au résultat final. À partir de ce modèle, vous pouvez créer

des mises en plan 2D ou contraindre des composants constitués de pièces ou de sous-assemblages afin de créer des assemblages 3D. Vous pouvez aussi créer des mises en plan 2D d'assemblages 3D.

Un modèle conçu à l'aide de SOLIDWORKS peut être visualisé dans ses trois dimensions, c'est-à-dire dans son aspect final après fabrication.



**Figure 3.1 :** Exemple de réalisation par Solidworks.

L'application SOLIDWORKS offre des outils et des fonctionnalités d'interface utilisateur qui vous aident à créer et à éditer efficacement les modèles.

Les fenêtres de documents SOLIDWORKS sont constituées de deux panneaux. Le panneau de gauche, ou Manager Pane, contient :

#### **Arbre de création FeatureManager:**

Affiche la structure de la pièce, de l'assemblage ou de la mise en plan. Sélectionnez un élément dans l'arbre de création Feature Manager afin d'éditer l'esquisse sous-jacente, d'éditer la fonction, et de supprimer ou d'annuler la fonction ou le composant, par exemple.



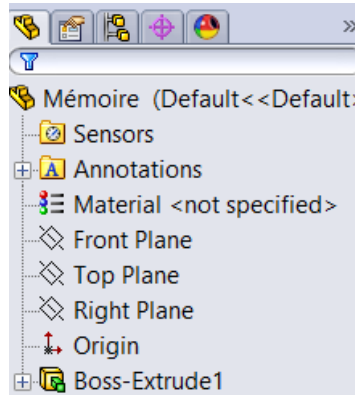


Figure 3.2 : Arbre de création Feature Manager.

### Property Manager:

Fournis des paramètres pour de nombreuses fonctionnalités, telles que des esquisses, des fonctions de congé et des contraintes d'assemblage.

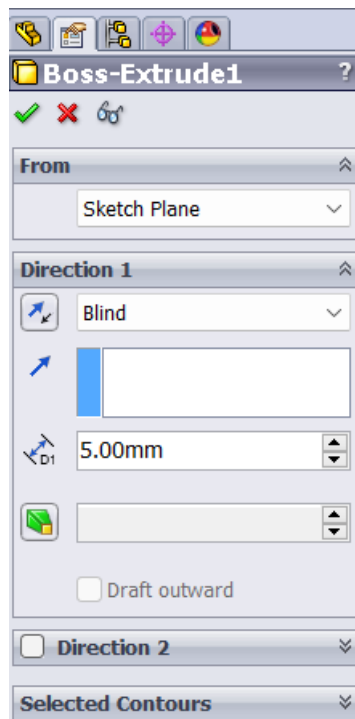
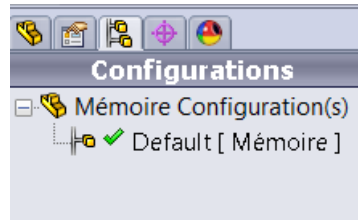


Figure 3.3 : Property Manager.

### Configuration Manager:

Permet de créer, de sélectionner et d'afficher plusieurs configurations de pièces et d'assemblages dans un document. Les configurations sont des variations d'une pièce ou d'un assemblage dans un

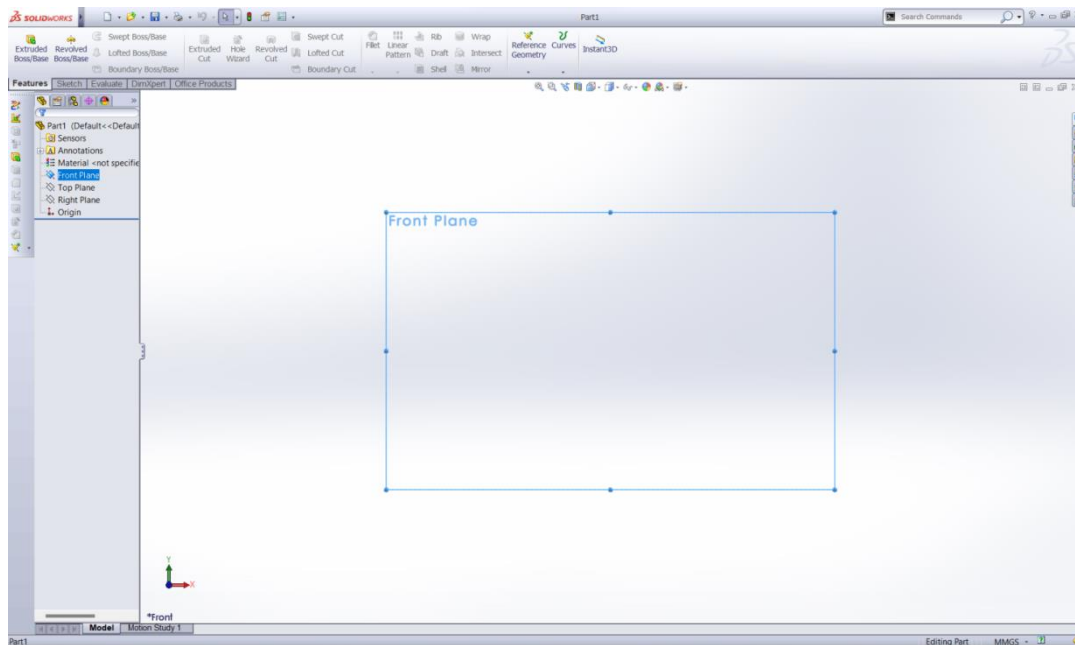
document unique. Vous pouvez par exemple utiliser des configurations de boulon pour indiquer des longueurs et des diamètres différents.



**Figure 3.4 :** Configuration Manager.

Vous pouvez fractionner le panneau gauche pour y afficher plusieurs onglets à la fois. Par exemple, vous pouvez afficher l'arbre de création Feature Manager dans la partie supérieure et l'onglet Property Manager d'une fonction que vous souhaitez appliquer dans la partie inférieure.

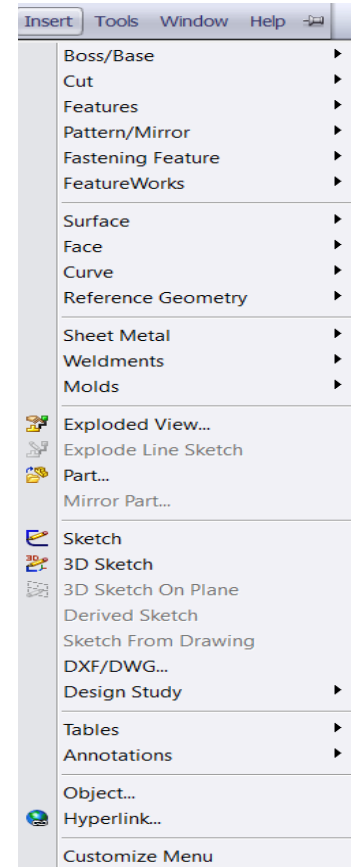
Le panneau droit contient la zone graphique dans laquelle vous pouvez créer et manipuler une pièce, un assemblage ou une mise en plan.



**Figure 3.5 :** La fenêtre principale de SolidWork.

**Menus :**

Vous pouvez accéder à toutes les commandes de SOLIDWORKS à partir de menus. Les menus SOLIDWORKS utilisent les conventions Windows, notamment les sous-menus et les coches indiquant qu'un élément est actif. Vous pouvez également accéder à des menus contextuels en cliquant sur le bouton droit de la souris.



**Figure 3.6 :** Menus de SolidWorks.

**Barres d'outils :**

Vous pouvez accéder aux fonctionnalités de SOLIDWORKS à partir des barres d'outils. Ces dernières sont organisées par fonctionnalité. Vous disposez ainsi, à titre d'exemple, des barres d'outils Esquisse et Assemblage. Chaque barre d'outils comprend des icônes individuelles représentant des outils spécifiques tels que Rotation de la vue, Répétition circulaire et Cercle.



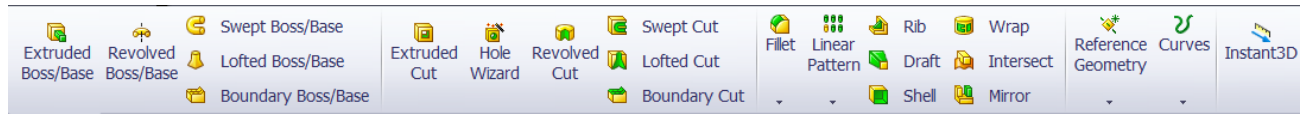
**Figure 3.7 :** Barres d'outils.

**Gestionnaire de commandes :**

Le Gestionnaire de commandes est une barre d'outils contextuelle qui se met à jour de manière dynamique en fonction du type de document actif.

Lorsque vous cliquez sur un onglet sous le Gestionnaire de commandes, il est mis à jour pour afficher les outils correspondants. Chaque type de document, tel que pièce, assemblage ou mise en plan, comporte des onglets différents définis pour ses tâches. Le contenu des onglets, comme celui

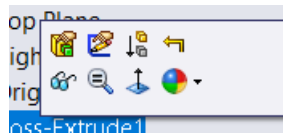
des barres d'outils, est personnalisable. Ainsi, si vous cliquez sur l'onglet **Fonctions**, la barre d'outils associée aux fonctions apparaît. Le Gestionnaire des commandes peut être personnalisé par l'ajout ou la suppression d'outils. Des info-bulles apparaissent lorsque vous placez le pointeur sur une icône.



**Figure 3.8 :** Gestionnaire de commandes.

### Barres d'outils contextuelles :

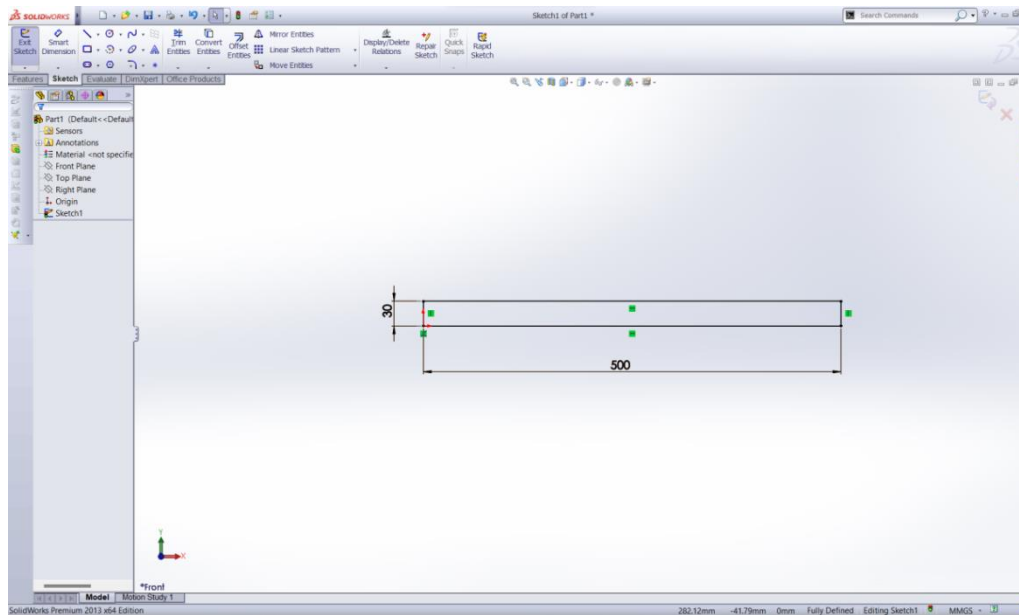
Des barres contextuelles apparaissent lorsque vous sélectionnez des éléments dans la zone graphique ou dans l'arbre de création Feature Manager. Elles permettent d'accéder à des actions fréquentes pour ce contexte. Des barres d'outils contextuelles sont disponibles pour les pièces, les assemblages et les esquisses [16].



**Figure 3.9 :** Barres d'outils contextuelles.

## 3. Détermination de vibration d'une poutre par Solidworks (poutre E-L sans trou noir)

1) Dessiner une forme rectangulaire de longueur  $L=0.5$  m et de largeur  $b=0.03$  m.



**Figure 3.10 :** L'Étape 1.

2) Extrusion de la matière par un epaisseur de  $h=0.005$  m.

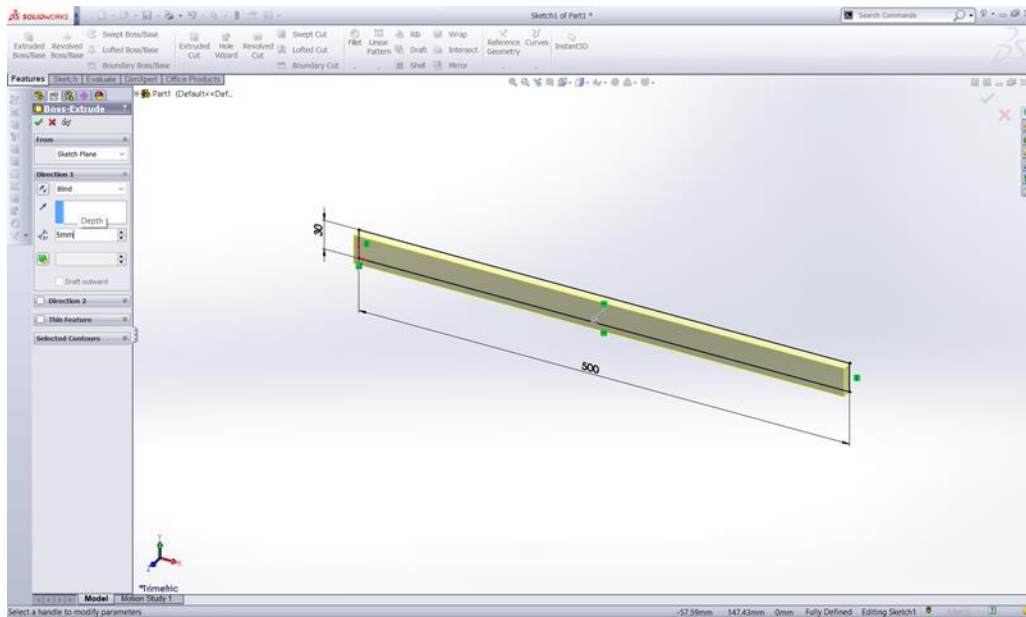


Figure 3.11 : L'Étape 2.

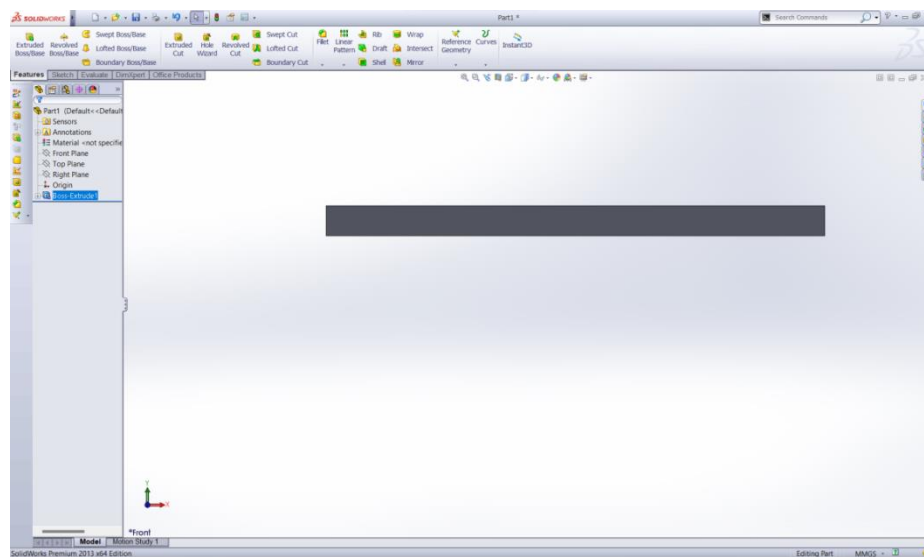
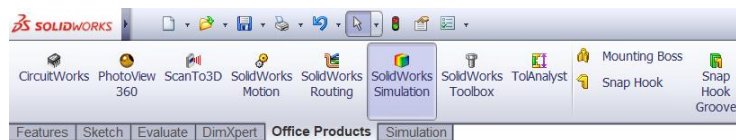


Figure 3.12 : L'Étape 2.

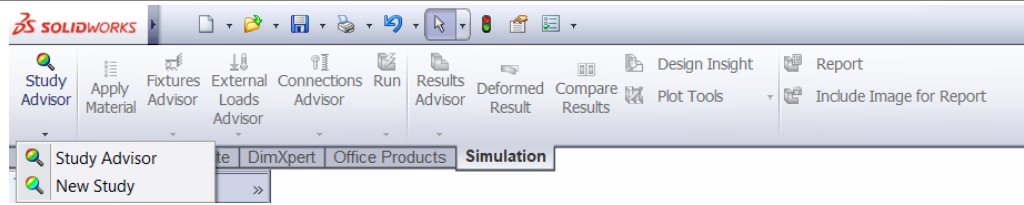
3) Dans le gestionnaire des commandes, choisisons :

- Solidworks simulation



- Simulation

- New study



- Frequency

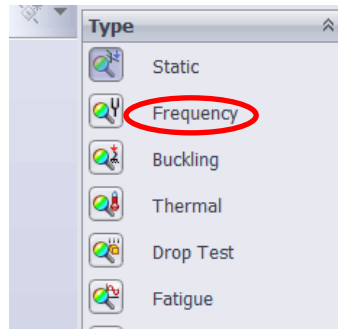


Figure 3.13 : L'Étape 3 simulation.

4) Dans le gestionnaire des commandes, choisisons :

-Apply matériel.

-Acier de  $E = 2.10^{11} \text{ N/m}^2$

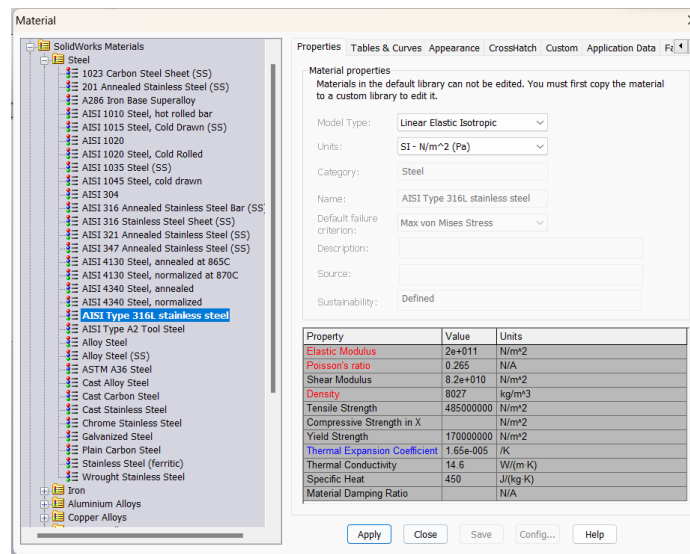
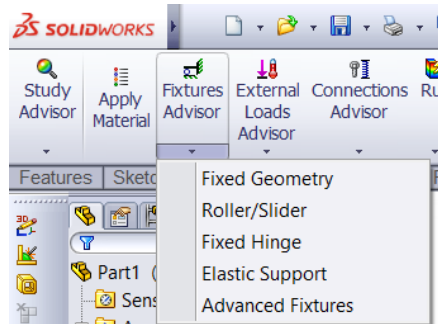


Figure 3.14 : L'Étape 4 "Apply matériel".

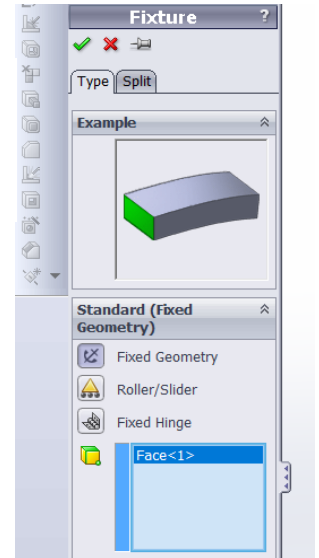
5) Dans le gestionnaire des commandes, choisisons:

-Fixtures advisor.

-Fixed geometry.



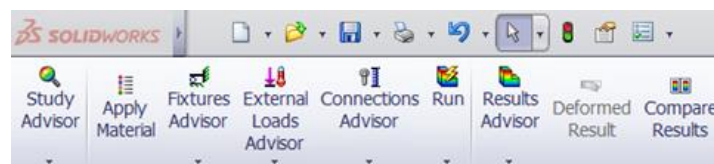
-Choisir la face qui nous voulons fixer.



**Figure 3.15 :** L'Étape 5 "Fixed geometry".

6) Utilisons la flèche sous l'icône "Run this study" et choisissons "Mesh Density" pour spécifier la densité du maillage. Ensuite, appuyons à nouveau sur "Run this study" pour lancer la simulation.

Une fois la simulation terminée, nous pourrons visualiser les résultats. Nous pourrons voir les dix fréquences calculées ainsi que les formes de modes correspondantes.



**Figure 3.16 :** L'Étape 6 "Run".

La Figure 3.17 présente les six premières déformées modales obtenues à l'aide de SolidWorks. Ces déformées modales représentent les modes de vibration les plus significatifs de la poutre étudiée. Chaque déformée modale représente une configuration spécifique de déformation de la poutre lorsqu'elle est soumise à des vibrations.

La Figure 3.17 fournit une illustration visuelle claire des premiers modes de vibration de la poutre. L'examen attentif de ces déformées modales permet de déterminer les fréquences associées à chaque mode de vibration et de quantifier l'amplitude et la localisation des déformations.

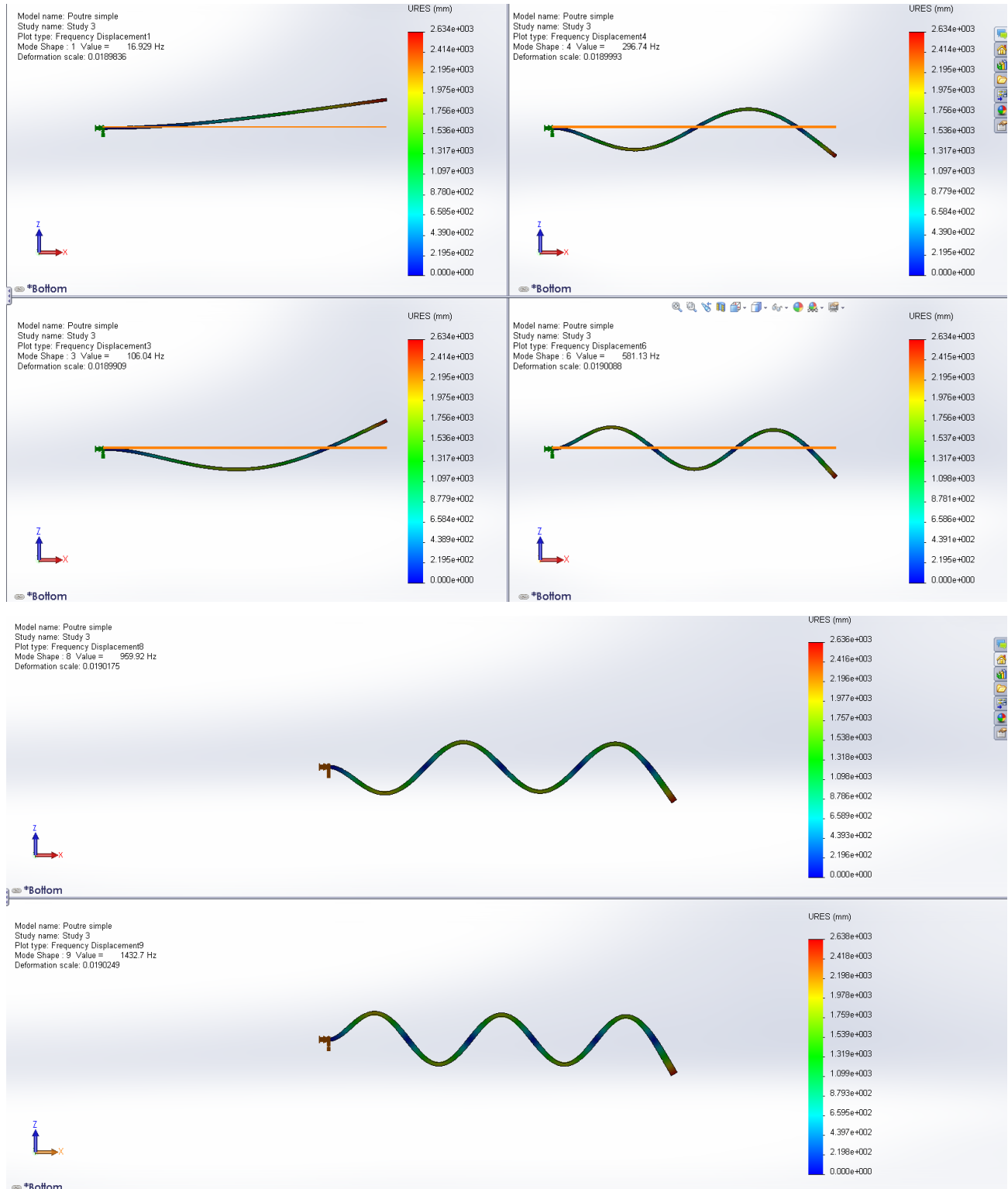
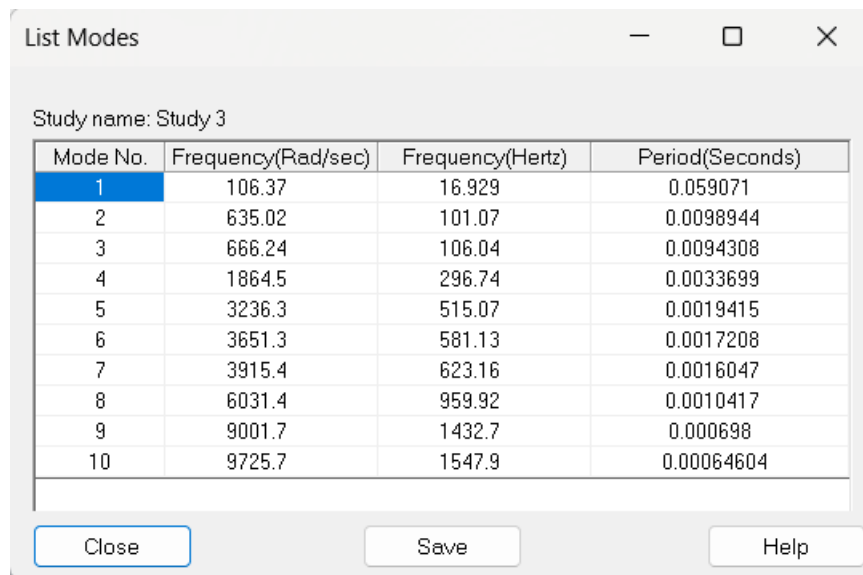


Figure 3.17 : Déformées modales obtenues par solidWorks.



Le Tableau 3.18 présente les fréquences et les pulsations associées aux différents modes de vibration de la poutre étudiée. Les fréquences sont exprimées en hertz (Hz), tandis que les pulsations sont données en radians par seconde (rad/s).

L'analyse des fréquences et des pulsations des modes de vibration est cruciale pour comprendre le comportement dynamique de la poutre. Chaque mode de vibration correspond à une fréquence spécifique à laquelle la poutre vibre de manière prédominante. Les pulsations, quant à elles, représentent la vitesse angulaire des vibrations.



Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)
1	106.37	16.929	0.059071
2	635.02	101.07	0.0098944
3	666.24	106.04	0.0094308
4	1864.5	296.74	0.0033699
5	3236.3	515.07	0.0019415
6	3651.3	581.13	0.0017208
7	3915.4	623.16	0.0016047
8	6031.4	959.92	0.0010417
9	9001.7	1432.7	0.000698
10	9725.7	1547.9	0.00064604

**Figure 3.18** : Fréquences et pulsations des modes.

#### 4. Détermination de vibration d'une poutre par Solidworks (poutre E-L avec trou noir)

Dans le cas de la poutre avec trou noir acoustique, nous suivons les mêmes étapes que pour la poutre simple afin de déterminer les vibrations. Cependant, il existe une seule différence importante.

La différence réside dans la modélisation du trou noir acoustique dans notre simulation. Nous devons prendre en compte les caractéristiques spécifiques du trou noir acoustique, telles que ses dimensions, sa position et son comportement acoustique. Ces informations sont essentielles pour une représentation précise du trou noir acoustique dans notre modèle.

En ajustant les paramètres du trou noir acoustique dans notre modèle, nous pouvons observer comment il influence les vibrations de la poutre. L'animation de la poutre avec le trou noir acoustique permet de visualiser les déformations et les vibrations induites par cette caractéristique particulière. Cela nous permet d'évaluer l'efficacité de cette solution dans l'amortissement des vibrations et d'analyser son impact sur le comportement vibratoire de la poutre.

Dans le cas de la poutre avec trou noir acoustique, la différence réside dans la création d'une couche hétérogène en enlevant de la matière, déterminée par les dimensions  $l_{abh}$  et  $h_{abh}$ .

Pour déterminer cette dimension, il faut calculer plusieurs variables :

- Les dimensions et les caractéristiques de la structure.
- La longueur d'onde correspondante à la fréquence critique.
- Le mode de résonance correspondant à l'harmonique du trou noir acoustique.
- La vitesse du son dans le matériau
- La fréquence correspondante à l'harmonique souhaitée.
- La masse volumique.
- La Rigidité.
- La longueur de la pièce à épaisseur variable. [17-19].

Certaines variables implique des étapes plus complexes comme la longueur de la pièce variable.

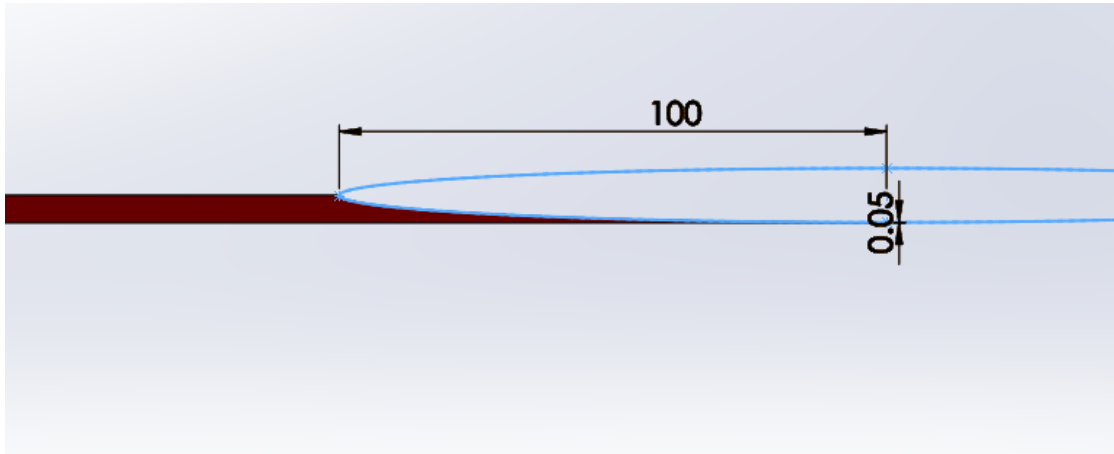
Si nous simplifier ces étapes et nous mettre ces variables aux condition aux limit , les équations de  $l_{abh}$  et  $h_{abh}$  devient :

$$l_{abh} = \frac{l}{5} = \frac{500}{5} = 100mm \quad (3,1)$$

$$h_{abh} = \frac{h}{100} = \frac{5}{100} = 0.05mm \quad (3,2)$$

En utilisant les dimensions spécifiées, nous créons une forme elliptique dans le plan x-z en enlevant de la matière de la poutre.

En effectuant cette opération, nous modifions la géométrie de la poutre en créant une cavité elliptique dans la région déterminée par les dimensions données. Cette cavité peut être conçue pour correspondre à la forme désirée en fonction des spécifications du trou noir acoustique.



**Figure 3.19 :** Enlèvement du matériau.

La Figure 3.20 présente les déformées modales obtenues à l'aide de SolidWorks pour la poutre avec trou noir acoustique (TNA). Les déformées modales représentent les modes de vibration caractéristiques de la poutre avec TNA.

L'observation et l'analyse des déformées modales permettent de visualiser les formes de vibration spécifiques induites par la présence du trou noir acoustique. Chaque déformée modale représente une configuration particulière de déformation de la poutre avec TNA lorsqu'elle est soumise à des vibrations.

La Figure 3.20 permet de visualiser les déformations résultant des différents modes de vibration de la poutre avec TNA. Ces informations sont précieuses pour comprendre comment le trou noir acoustique affecte les vibrations de la poutre et comment il contribue à l'amortissement des vibrations indésirables.

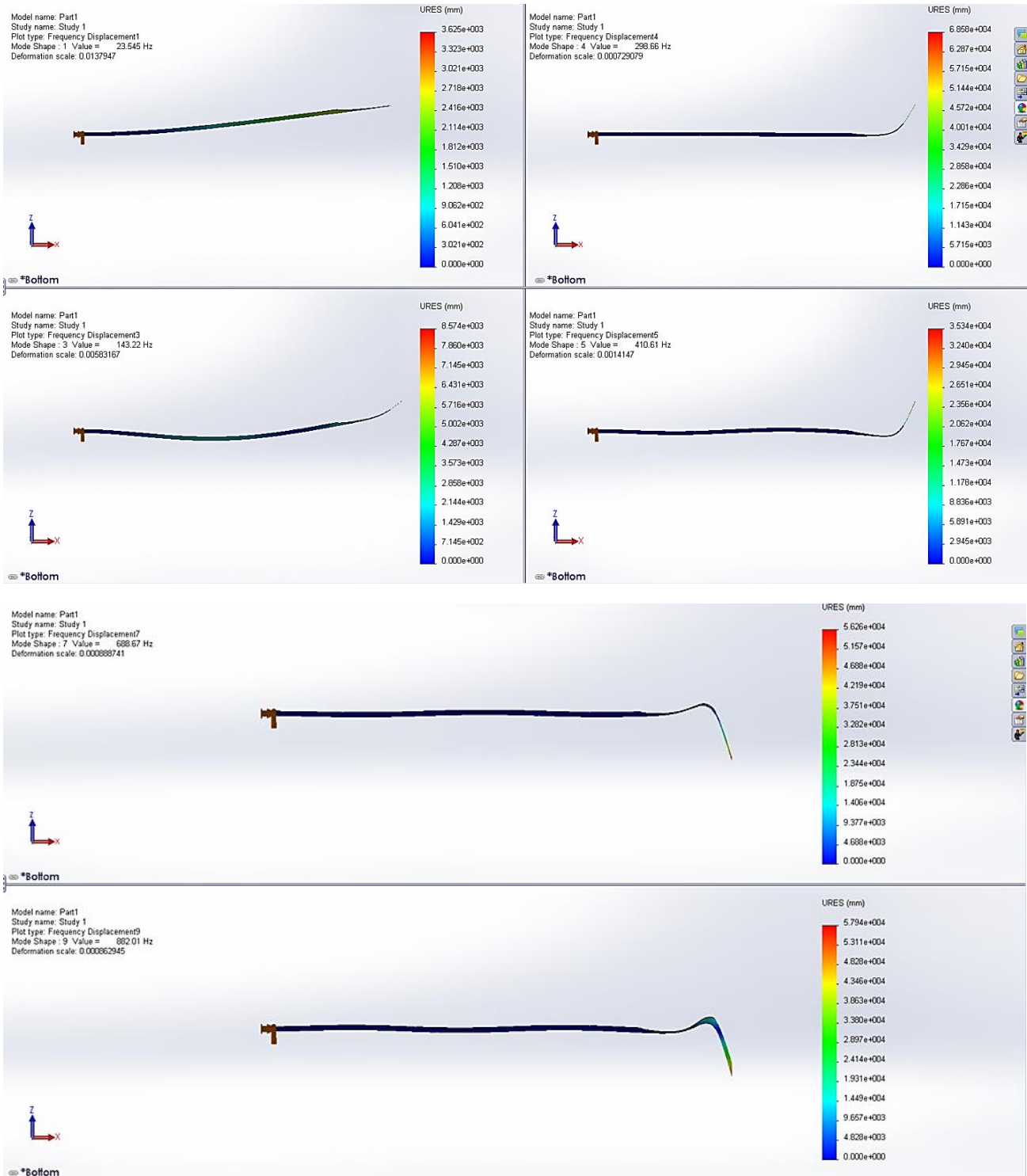
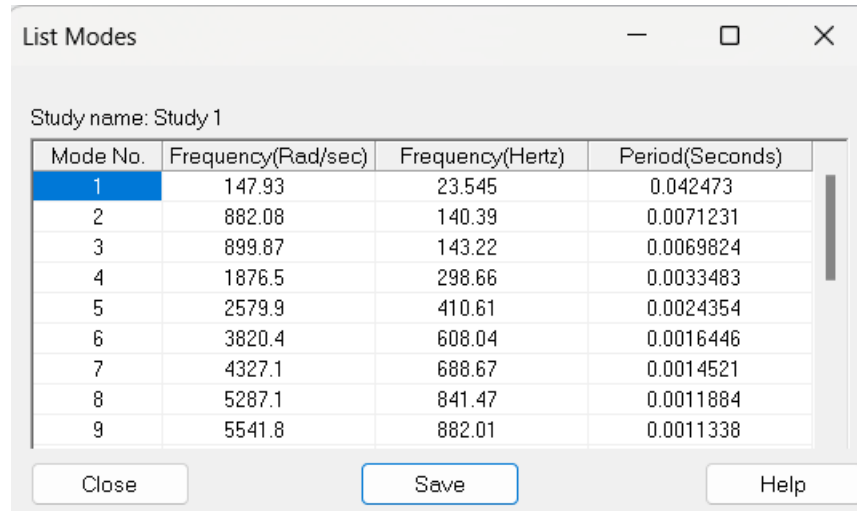


Figure 3.20 : Déformées modales obtenues par solidWorks avec TNA.



Study name: Study 1

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)
1	147.93	23.545	0.042473
2	882.08	140.39	0.0071231
3	899.87	143.22	0.0069824
4	1876.5	298.66	0.0033483
5	2579.9	410.61	0.0024354
6	3820.4	608.04	0.0016446
7	4327.1	688.67	0.0014521
8	5287.1	841.47	0.0011884
9	5541.8	882.01	0.0011338

Buttons: Close, Save, Help

**Figure 3.21 :** Fréquences et pulsations des modes avec TNA.

### 5. La comparaison des résultats (Sans et avec trou noir)

Le Tableau 3.1 présente les fréquences de vibration d'une poutre (E-L) sans et avec trou noir. Les fréquences sont mesurées en hertz (Hz) et sont fournies pour les six premiers modes de vibration.

En comparant les résultats, on observe que les fréquences de vibration de la poutre sans trou noir sont généralement plus basses que celles de la poutre avec trou noir. Cela indique que l'introduction du trou noir acoustique a un effet significatif sur le comportement vibratoire de la poutre.

Dans les trois premiers modes de vibration, les fréquences augmentent considérablement avec l'ajout du trou noir acoustique. Cela suggère que le trou noir acoustique contribue à une augmentation de la rigidité de la poutre, ce qui entraîne des fréquences de vibration plus élevées.

Dans les modes de vibration suivants (4, 5 et 6), les fréquences avec trou noir varient de manière plus complexe par rapport à la poutre sans trou noir. Dans certains cas, les fréquences avec trou noir sont inférieures à celles sans trou noir, tandis que dans d'autres cas, elles sont supérieures. Cela peut être dû à des interactions complexes entre les modes de vibration et les caractéristiques spécifiques du trou noir acoustique dans la poutre.

En résumé, le Tableau 3.1 met en évidence les différences significatives entre les fréquences de vibration d'une poutre sans et avec trou noir. Ces résultats soulignent l'impact du trou noir acoustique sur le comportement vibratoire de la poutre et mettent en évidence son rôle dans l'ajustement des propriétés dynamiques de la structure.

Nombre	Sans trou noir (Hz)	Avec trou noir (Hz)
1	16.93	23.54
2	106.04	143.22
3	296.74	298.66
4	581.13	410.61
5	959.92	688.67
6	1432.7	882.01

**Tableau 3.1 :** Fréquences d'une poutre (E-L) sans et avec trou noir.

## 6. Conclusion

En conclusion, la simulation des vibrations d'une poutre avec un trou noir acoustique a fourni des résultats significatifs et prometteurs.

Dans le cas de la poutre sans trou noir acoustique, les vibrations se propagent de manière régulière et génèrent une résonance à certaines fréquences spécifiques. Cependant, cela peut entraîner des problèmes tels que des niveaux de bruit élevés et des perturbations indésirables.

En introduisant un trou noir acoustique dans la poutre, nous avons observé une modification significative du comportement vibratoire. Le trou noir acoustique agit comme un absorbeur d'énergie, réduisant efficacement les vibrations et les niveaux sonores. Cela peut être extrêmement bénéfique dans des applications où le contrôle du bruit et des vibrations est essentiel, tels que les systèmes de suppression du bruit dans les avions, les véhicules et les structures sensibles.

La simulation nous a permis de mieux comprendre l'impact d'un trou noir acoustique sur les vibrations d'une poutre et d'évaluer son efficacité dans la réduction du bruit et des vibrations. Cela ouvre la voie à des développements futurs dans la conception et l'optimisation de structures pour atteindre des performances acoustiques améliorées.

En résumé, l'utilisation d'un trou noir acoustique dans une poutre a le potentiel d'améliorer considérablement la réduction du bruit et des vibrations. Cela offre de nouvelles possibilités pour le développement de solutions innovantes visant à créer des environnements plus silencieux et plus confortables.

# Chapitre 4

## Étude Expérimentale

### 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la détermination pratique des vibrations des structures en mettant l'accent sur les méthodes expérimentales. Nous commençons par présenter le dispositif expérimental utilisé pour mesurer et analyser les vibrations de notre poutre dans des conditions réelles.

Nous décrivons ensuite les étapes pratiques nécessaires pour mener à bien l'analyse des vibrations. Cela comprend la préparation de la poutre, l'installation des capteurs de vibration, la mise en place du dispositif d'excitation, et la collecte des données de vibration.

### 2. Plan expérimentale et matériel utilisé

#### 2.1. Présentation du banc d'essais

Après avoir présenté les objectifs de l'étude, nous passons à la description du banc d'essais utilisé pour mener à bien l'analyse des vibrations.

Tout d'abord, nous décrivons la configuration de la poutre utilisée dans l'expérience, qui est fixée en tant que poutre encastree-libre. Cette configuration spécifique est choisie pour permettre l'étude des vibrations dans ce scénario particulier.

Ensuite, nous expliquons l'installation des capteurs de vibration, plus précisément des accéléromètres, sur la poutre. Ces capteurs sont positionnés stratégiquement pour mesurer les vibrations et enregistrer les données pertinentes.

Nous abordons également la mise en place du dispositif d'excitation, qui dans ce cas est un marteau d'impact. Ce dernier est utilisé pour appliquer une force d'impact sur la poutre, ce qui génère des vibrations. Cela permet d'obtenir des données expérimentales sur les vibrations de la poutre dans des conditions réelles.

Enfin, nous mentionnons l'utilisation d'un analyseur pulse pour collecter et enregistrer les données de vibration. Cet analyseur est un instrument essentiel pour mesurer et analyser les caractéristiques des vibrations, telles que les fréquences et les amplitudes.



**Figure 4.1 :** Figure représentative du banc d'essais

## 2.2. La poutre

La poutre est en acier de longueur  $L=0.5$  m, de largeur  $b=0.03$  m et d'épaisseur  $h=0.005$  m, de section uniforme. Elle est encadrée-libre (E-L).



**Figure 4.2 :** Poutre encadrée-libre (E-L).



### 2.3. Matériel d'acquisition des mesures

Système multi-analyseur type 3160-A-042, de marque Brüel & Kjør **figure 4.3** 4 entrées/2 sorties. Tous les canaux d'entrée et de sortie ont une plage de fréquence de DC à 51,2 kHz. Cet analyseur fonctionne aussi bien comme un système de test avec un seul module, ou comme une partie d'un grand système de mesure LAN-XI. La combinaison des canaux d'entrées et de sortie fait l'un des modules d'acquisition de données les plus polyvalents disponibles, tandis que les panneaux avant interchangeables donnent la flexibilité d'utiliser une grande variété de capteurs.

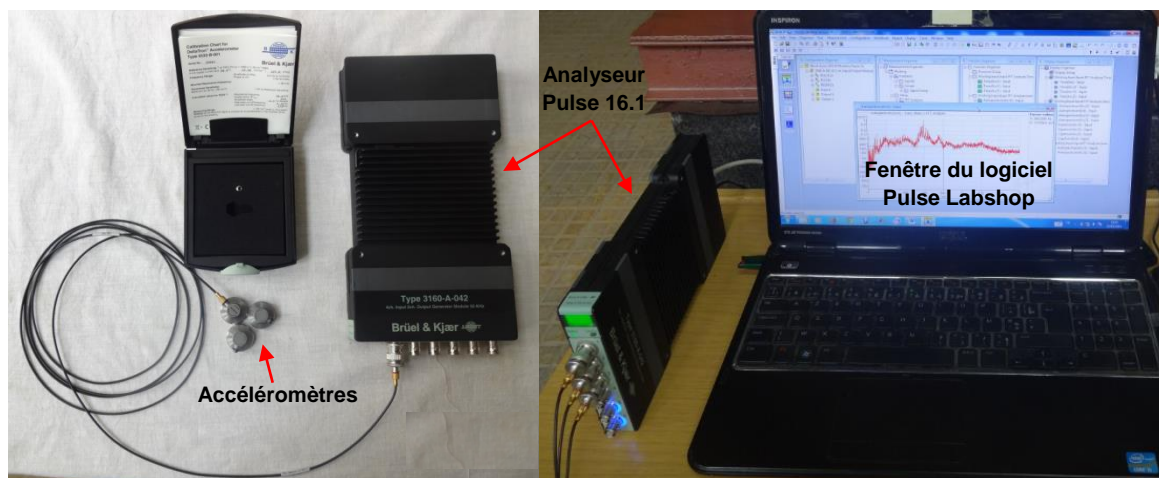
Utilisations :

- Mesures générales acoustiques et vibratoires.
- Canaux de sortie du générateur pour l'excitation des systèmes pour les mesures acoustiques et vibratoires.
- Idéal pour les mesures audio et électro-acoustiques.
- Mesures mono-module.
- Mesures multi-modules / système distribué.
- Enregistrement autonome (sans PC) en utilisant le logiciel LAN-XI Notar <sup>TM</sup>.

Caractéristiques :

- 4 canaux d'entrée
- 2 canaux de sortie du générateur
- Gammes de fréquence de 0 à 51.2KHz
- La technologie Dyn-X
- La technologie REq-X
- Support transducteurs TEDS (Transducer Electronic Data Sheet)
- Panneaux avant interchangeables

Equipé par le logiciel d'acquisition et de traitement Pulse Labshop 16.1, les outils standard Pulse Labshop sont : l'analyse FFT, Analyse CPB en temps réel analyse 1/n octave, analyse d'ordre, analyse d'enveloppe, analyse cepstrale....



**Figure 4.3 :** Photo de l'analyseur Brüel & Kjær Pulse 16.1 et les accéléromètres d'acquisition des signaux.

## 2.4. Marteaux d'impact

Le marteau du choc, également connu sous le nom de marteau d'impact, est un outil utilisé dans les travaux de construction et de réparation. Il est conçu pour délivrer une force d'impact concentrée sur une surface spécifique. Le marteau du choc se compose généralement d'une tête en acier lourd et d'un manche solide.

Le type 8206 du marteau d'impact est conçu avec une masse de tête de 100g et offre une sensibilité de 22,7 mV/N. Un accéléromètre CCLD est utilisé pour mesurer la réponse de la structure lors de l'utilisation du marteau d'impact.

### Utilisations possibles

- Mesures de force d'impact sur des structures de petite à moyenne taille
- Mesure des fonctions de réponse en fréquence en utilisant des techniques d'excitation par impact
- Dans le cadre d'un système d'essai de structures dynamiques pour l'analyse modale et la prédiction de la réponse structurelle

Contrairement à l'utilisation d'un excitateur électrodynamique, un marteau d'impact n'applique pas de charge de masse supplémentaire à l'objet testé et offre une solution très portable pour l'excitation.



**Figure 4.4 :** Marteau d'impact type 8206.

## 2.5. Accéléromètre CCLD

L'accéléromètre CCLD TEDS polyvalent, Type 4533-B, offre une large gamme de fréquences, un faible niveau de bruit et une faible sensibilité aux influences environnementales

**Scenarios d'utilisation :** Mesure de vibrations généralistes.

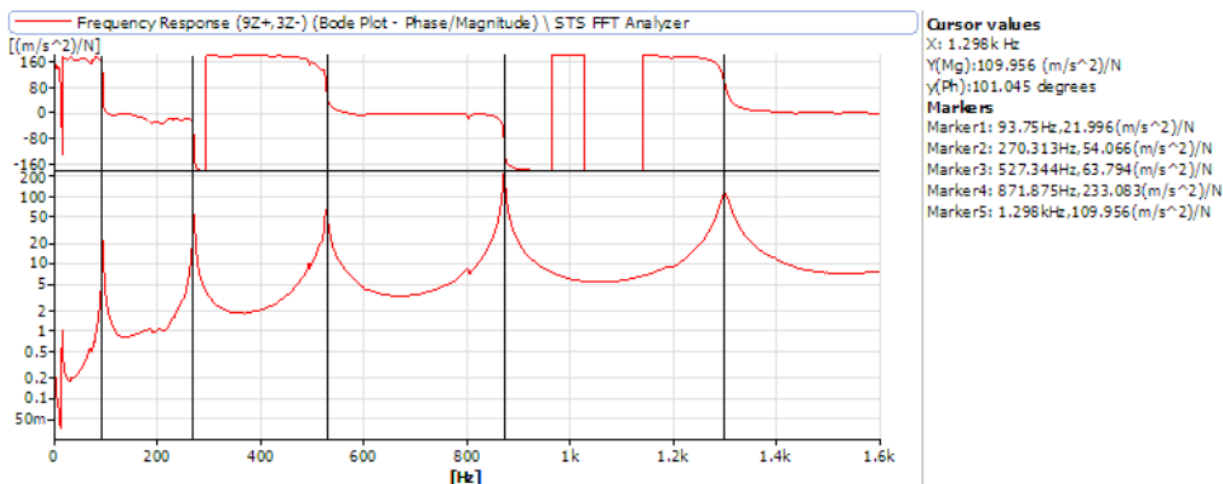
Chaque unité est dotée d'un boîtier en titane léger, résistant et hermétique, d'une base isolante et d'un orifice de montage fileté 10-32 UNF adapté à une utilisation dans différentes conditions environnementales .Le Type 4533-B dispose d'un connecteur latéral.



**Figure 4.5 :** Accéléromètre CCLD TYPE 4533-B.

La **figure 4.5** présente le spectre de fonction de réponse en fréquence (FRF) pour la poutre testée. Elle affiche les six premières fréquences obtenues lors de l'analyse des vibrations de la poutre. Les fréquences mesurées sont mentionnés dans le tableau 4.1

Ces fréquences représentent les modes de vibration principaux de la poutre dans le cas d'une configuration encastée-libre.



**Figure 4.6 :** Spectre de fonction de réponse en fréquence FRF.

### 3. La comparaison des résultats

Le Tableau 4.1 présente une comparaison des fréquences propres obtenues à partir des analyses analytiques, numériques et expérimentales. Ces fréquences propres correspondent aux différents modes de vibration de la poutre étudiée.

Pour le mode 1, les résultats analytiques et expérimentaux sont assez proches, avec une légère différence entre eux. Le résultat de la simulation se situe entre les deux.

Pour le mode 2, les résultats de la simulation et expérimentaux sont plus élevés que le résultat analytique. Cela peut être dû à des simplifications ou des imprécisions dans le modèle utilisé pour la simulation.

Pour les modes 3, 4, 5 et 6, les résultats de la simulation sont généralement plus élevés que les résultats analytiques et expérimentaux.

Pour calculer l'erreur entre les différentes méthodes (analytique, simulation et expérimentale), vous pouvez utiliser la formule de l'erreur relative :

$$\text{Erreur relative} = \left| \frac{(\text{Valeur mesurée} - \text{Valeur de référence})}{\text{Valeur de référence}} \times 100 \right|$$

Il est important de noter que les résultats de la simulation et de l'expérience peuvent être influencés par divers facteurs tels que les conditions aux limites, les propriétés matérielles et les sources d'erreur expérimentale. Il est donc courant d'observer des écarts entre les résultats des différentes méthodes.

Mode	Fréquences propres (Hz)			Erreur relative	
	Analytique	Simulation	Expérimentale	Simulation vs Analytique	Expérimental vs Analytique
1	16.3	16.93	16	3.87 %	1.84 %
2	102.71	106.04	94	3.24 %	8.48 %
3	284.24	296.74	270.5	4.40 %	4.83 %
4	560.43	581.13	527	3.69 %	5.97 %
5	926.4	959.92	871.5	3.62 %	5.93 %
6	1383.91	1432.7	1300	3.53 %	6.06 %

**Tableau 4.1 :** Comparaison entre les résultats analytiques, numériques et expérimentaux.

#### 4. Conclusion

En conclusion, les modes de vibration dans une poutre sont un aspect essentiel de l'analyse des structures et de la mécanique des solides. Les modes de vibration représentent les différentes formes de déformation que peut prendre une poutre lorsqu'elle est excitée par une force externe ou une perturbation.

L'étude des modes de vibration permet de comprendre le comportement dynamique d'une poutre, ce qui est crucial dans de nombreux domaines d'ingénierie tels que l'aérospatiale, la construction navale, l'architecture et la conception des structures.

La connaissance des modes de vibration d'une poutre est essentielle pour éviter les résonances indésirables, qui peuvent entraîner des défaillances structurelles et des problèmes de performance. En identifiant les modes de vibration prédominants, les ingénieurs peuvent concevoir des structures robustes capables de résister aux charges dynamiques et d'optimiser leur comportement vibratoire. la comparaison entre les résultats analytiques, numériques et expérimentaux permet de mieux comprendre le comportement vibratoire de la structure étudiée. Elle met en évidence les forces et les limites de chaque méthode d'analyse, et peut aider à valider ou à ajuster les modèles numériques en fonction des résultats expérimentaux. Cela permet d'améliorer la fiabilité des prévisions et de mieux concevoir les structures pour minimiser les effets indésirables des vibrations.

# Conclusions générales

En conclusion, l'étude des vibrations des trous noirs dans les poutres est un domaine de recherche passionnant et en constante évolution. Les vibrations dans cette structure est influencée par la présence d'un trou noir, ce qui offre des perspectives intéressantes pour étudier les caractéristiques de ces objets.

L'efficacité des trous noirs acoustiques dans une poutre a démontré des résultats prometteurs. Les trous noirs acoustiques sont des dispositifs qui permettent de contrôler et de manipuler les ondes acoustiques à l'intérieur d'une structure. L'insertion de ces trous noirs acoustiques a montré une capacité significative à absorber et à dissiper les vibrations indésirables.

L'une des principales mesures de l'efficacité d'un trou noir acoustique est sa capacité à influencer les fréquences naturelles de la poutre. Les fréquences naturelles d'une poutre sans trou noir, sans dispositifs absorbants, sont généralement bien définies et dépendent des caractéristiques géométriques et matérielles de la poutre. Cependant, l'introduction de trous noirs acoustiques modifie ces fréquences en créant des modes de résonance supplémentaires.

La comparaison entre les résultats analytiques, numériques et expérimentaux dans le cas de la poutre sans trou noir acoustique offre une meilleure compréhension du comportement vibratoire de la structure étudiée. Elle met en évidence les avantages et les limites de chaque méthode d'analyse, et permet d'évaluer la précision des modèles numériques en les comparant aux résultats expérimentaux. Cette démarche contribue à renforcer la fiabilité des prévisions et à améliorer la conception des structures en minimisant les effets indésirables des vibrations.

Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de trous noirs acoustiques peut déplacer les fréquences naturelles de la poutre vers des valeurs plus basses. Cela indique une meilleure capacité de la poutre à absorber les vibrations et à réduire les phénomènes de résonance indésirables.

Il convient de souligner que l'efficacité des trous noirs acoustiques peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que la conception et l'agencement des trous, ainsi que les propriétés matérielles de la poutre. Des études supplémentaires sont nécessaires pour optimiser ces paramètres et améliorer encore l'efficacité des trous noirs acoustiques.

La simulation nous a permis de mieux comprendre l'impact d'un trou noir acoustique sur les vibrations d'une poutre et d'évaluer son efficacité dans la réduction du bruit et des vibrations. Cette approche ouvre la voie à de futures avancées dans la conception et l'optimisation de structures pour atteindre des performances acoustiques améliorées.

En résumé, l'intégration d'un trou noir acoustique dans une poutre présente un potentiel considérable pour améliorer la réduction du bruit et des vibrations. Cela offre de nouvelles opportunités pour développer des solutions novatrices visant à créer des environnements plus silencieux et plus confortables.

Les résultats obtenus démontrent :

- La localisation des vibrations majoritairement dans la partie de la structure où nous avons appliqué le trou noir acoustique.
- L'amortissement significatif des vibrations grâce à l'utilisation du trou noir acoustique.
- L'efficacité remarquable du trou noir acoustique, combinée à sa facilité d'utilisation, en tant que l'une des meilleures solutions modernes d'amortissement.
- L'économie offerte par le trou noir acoustique en tant que solution d'amortissement.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche tel que :

- L'exploration de l'interaction des ondes sonores avec la matière autour des trous noirs.
- La recherche sur la possibilité d'une signature sonore distinctive des trous noirs.
- L'étude des analogies entre les trous noirs acoustiques et les trous noirs gravitationnels.

# Références bibliographiques

1. Pekeris, C.L.: Theory of propagation of sound in a half-space of variable sound velocity under conditions of formation of a shadow zone. *J. Acoust. Soc. Am.* 18, 295–315 (1946).
2. Pelat, Adrien, et al. "The acoustic black hole: A review of theory and applications." *Journal of Sound and Vibration* 476 (2020): 115316.
3. A. Pelat, F. Gautier, F. Semperlotti, and S. Conlon. Passive control of vibrations using acoustic black holes. *INTERNOISE 2017 - 48rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World Through Noise Control*, Hong-Kong, China, 2017.
4. Deng, Jie, and Ling Zheng. "Noise reduction via three types of acoustic black holes." *Mechanical Systems and Signal Processing* 165 (2022): 108323.
5. Pelat, Adrien, et al. "The acoustic black hole: A review of theory and applications." *Journal of Sound and Vibration* 476 (2020): 115316.
6. Krylov, V.V.: Conditions for validity of the geometrical-acoustics approximation in application to waves in an acute-angle solid wedge. *Soviet Phys. Acoust.* 35(2), 176–180 (1989)
7. Zeng, P., Zheng, L., Deng, J., et al.: Flexural wave concentration in tapered cylindrical beams and wedge-like rectangular beams with power-law thickness. *J. Sound Vib.* 452, 82–96 (2019).
8. LI, X. and DING, Q. Analysis on vibration energy concentration of the one-dimensional wedged shaped acoustic black hole structure. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(10), 2137–2148 (2018).
9. Zhen, Yaxin, Tong Gu, and Ye Tang. "Vibration control and energy accumulation of one-dimensional acoustic black hole structure with damping layer." *Archive of Applied Mechanics* 92, no. 6 (2022): 1777-1788.
10. Bowyer, E.P., Krylov, V.V.: Sound radiation of rectangular plates containing tapered indentations of power-law profile. *J. Acoust. Soc. Am.* 132(3), 2041 (2012).



11. Park, S., Lee, J.Y., Jeon, W.: Vibration damping of plates using waveguide absorbers based on spiral acoustic black holes. *J. Sound Vib.* 521, 116685 (2022).
12. Pelat A, Gautier F, Conlon SC, Semperlotti F (2020) The acoustic black hole: a review of theory and applications. *J Sound Vib* 476:115316.
13. Pelat A, Denis V, Gautier F (2015) Experimental and theoretical study of the reflection coefficient of an abh beam termination. *INTERNOISE 2015: 46th Int. Congr. Noise Control Eng.*, San Francisco, USA.
14. Nathalie MAYER, (2017) Vibration : qu'est-ce que c'est , <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-vibration-16296/> Consulter le 3/6/2023
15. Clemence, G. M. "Unités de mesure du temps et de la fréquence." *Ciel et Terre*, Vol. 73, p. 257 73 (1957): 257.
16. Dassault systemes,introduction SolidWorks, [https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS\\_Introduction\\_FR.pdf](https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_FR.pdf) Consulter le 3/6/2023
17. Zhen, Yaxin, Tong Gu, and Ye Tang. "Vibration control and energy accumulation of one-dimensional acoustic black hole structure with damping layer." *Archive of Applied Mechanics* 92.6 (2022): 1777-1788.
18. Gérard A. Maugin "Structural Acoustics and Vibration: Mechanical Models, Variational Formulations and Discretization".
19. Denis, Vivien, et al. "Amortissement de vibrations de poutres par effet Trou Noir: caractérisation expérimentale et modèles numériques." *Acoustique et Techniques: trimestriel d'information des professionnels de l'acoustique* 83 (2016): 5-11.