

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية

N°d'enregistrement

...../...../.....

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك
Département de d'automatique et d'électromécanique
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : électromécanique
Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

ANALYSE MODALE ET FREQUENCES NATURELLES D'UNE POUTRE EN VIBRATION

Présenté par :

HATA Bakir
CHAALANE Daoud

Soutenue publiquement le:14/06/2026

Devant le jury composé de :

BELAGHIT Abdelhakem	MCB	Univ. Ghardaïa	Président
AISSAOUI Fares	MCA	Univ. Ghardaïa	Examineur
KHIRENNAS Messaoud	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
BOUSNANE Toufik	MCB	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant de présenter ce travail, nous tenons à remercier Dieu tout puissant, Louange à lui, par la grâce duquel les bonnes actions sont accomplies et par le succès duquel les objectifs sont atteints.

Je tiens à remercier chaleureusement en premier lieu notre encadreur Dr. BOUSNANE Toufik, pour sa disponibilité constante à nous aider et le temps qu'il m'a consacré et pour ses précieuses contributions qui ont enrichi ce travail, et qui a bien voulu nous encadrer.

Je remercie plus particulièrement Dr. ZITANI Brahim qui m'a encouragé durant tout le parcours de ma formation et pour ses immenses connaissances, ainsi que Dr. MERZOUGUE Houcine pour son curiosité scientifique, et également tous les enseignants du Département d'Automatique et d'Electro-Mécanique de la Faculté des Sciences et de la Technologie de l'Université de Ghardaïa pour la bonne formation de base que nous avons bénéficiés, qui nous ont généreusement fourni leurs connaissances et leurs conseils.

Je remercie mon collègue CHAALANE Daoud quia préparé avec moi ce mémoire, nous partageons cette réussite, ainsi que mes amis de la promotion 2026, surtout Bellakbir Dris, El-Amine Taha, Messaili Abdellah, ... qui m'ont assisté dans les moments les plus difficiles, vous êtes un soutien et une aide inoubliables.

En fin tous ceux qui nous ont soutenus, encouragés et apporté leur aide tout au long de ce par cours.

HATABakir

Dédicaces

Avec toute ma profonde gratitude, Je dédie ce modeste travail:

À ma mère, ma force silencieuse, vous êtes la source de ma survie et de ma réussite, tes prières ont été la lumière qui a illuminé mon chemin, vous avez porté bien plus que ce que les mots peuvent dire, que Dieu vous récompense et m'accorde tout le meilleur.

À la mémoire de mon père,
Que Dieu t'accorde sa miséricorde infinie et t'enveloppe de sa lumière.

À ma vertueuse épouse qui a œuvrée pour ma réussite, et a été mon soutien et mon réconfort après toutes les fatigues, et À mes chers enfants, la prunelle de mes yeux, à mes frères et sœurs, compagnons de cœur et de chemin, que Dieu vous protège et vous bénisse.

Et en particulier À mon Directeur de la **Direction de l'Energie et des Mines de la Wilaya de Ghardaïa Mr AY Abdelouaheb** pour son soutien précieux tout au long de ma dernière année de formation.

À tous mes collègues de notre Direction.

Merci À tous.

HATABakir

Remerciements

Au nom de Dieu, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.

***Louange à Dieu** pour Son aide constante, pour le don du savoir et du travail assidu, et pour le succès qu'Il nous a accordé. Toute louange et toute action de grâce Lui sont dues, comme il sied à Sa majesté et à Sa grandeur.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail, fruit d'efforts inlassables et d'une riche expérience académique.

*Je remercie tout particulièrement ma **famille**, qui m'a soutenu tout au long de ce parcours, et notamment mes parents, pour leur amour sincère, leur patience et leur soutien indéfectible.*

*J'exprime ma profonde gratitude à tous mes **professeurs** pour leurs conseils et leur soutien tout au long de mes études, et plus particulièrement à mon directeur de thèse, le professeur **Bousnane Toufik**, pour sa présence constante, ses précieux conseils et son soutien inestimable. Je remercie également mes **collègues** et **amis** pour leur soutien mutuel et leur fructueuse collaboration, notamment mon binôme de recherche **Hata Bakir** pour son engagement et son dévouement tout au long de ce projet. Son travail acharné et son soutien indéfectible ont été essentiels à sa réussite. À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, au succès de ce projet, j'adresse mes sincères remerciements et mes prières.*

Je prie pour que Dieu bénisse cette initiative et, par sa volonté, qu'elle constitue un pas important vers un avenir prometteur.

Chaalane Daoud

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents bien-aimés.

À ma mère

*Symbole de tendresse et de dévouement, dont le soutien, l'amour
et les prières m'ont toujours accompagné.*

À mon père

*Pour ses sacrifices, son amour, et son engagement constant pour
mon bien-être*

Et ma réussite.

À mes frères et sœurs

*Je vous souhaite un avenir plein de bonheur, de santé et de
réussite.*

Chaalane Daoud

الملخص

تقدم هذه المذكرة التحليل النمطي الذي يركز على تحليل الاستجابة الاهتزازية لعارضة معدنية مثبتة من أحد طرفيها وحررة من الطرف الآخر، منجز بالنموذج الرقمي و بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج الحساب Abaqus ، و تركز هذه الدراسة أساسا على حساب الترددات الطبيعية لاهتزاز العارضة وتحديد أنماط التشوهات الخاصة بها ، والهدف الرئيسي من هذا هو تجنب العجز و الانهيار التام للعتبة الذي يحدث عند تطابق الترددات الطبيعية مع الترددات الإثارة الخارجية للعتبة. قد تم إعطاء عناية خاصة للتردد الأساسي لأنه يمثل نمط الاهتزاز الأكثر عرضة للاستثارة (أعلى إمكانية لحدوث خطر). يقدم هذا العمل تأثير تغيير أبعاد العارضة و الخصائص الميكانيكية لمعدنها على تردداتها الطبيعية.

كلمات البحث: الاهتزاز، عارضة معدنية، التحليلي النمطي، التردد الأساسي، النمط الأساسي، طريقة العناصر المحدودة.

Résumé

Ce mémoire présente l'analyse modale qui consiste à étudier la réponse vibratoire d'une poutre métallique encastrée à l'une de ses extrémités et libre à l'autre, réalisée par la modélisation numérique via la méthode des éléments finis sous le code de calcul **ABAQUS**. L'étude consiste principalement à déterminer les fréquences propres de la poutre et à identifier ses modes de déformation associés. L'objectif principal est d'éviter le phénomène de la résonance de la poutre qui induit par la coïncidence des fréquences propres calculées avec les fréquences d'excitation externes de la poutre. Une attention particulière est portée à la fréquence fondamentale car elle représente le mode de vibration le plus susceptible d'être excité (risque plus élevé). Ce travail analyse l'influence de la variation des dimensions et des propriétés mécaniques du métal de la poutre sur ses fréquences propres.

Mots clé : vibration, poutre métallique, analyse modale, fréquence fondamentale, mode fondamental, méthode des éléments finis (MEF).

Abstract

This thesis presents the modal analysis, which consists of studying the vibration response of a metal beam, clamped at one end and free at the other, performed through numerical modelling using the finite element method (FEM) with the **ABAQUS** software. The study mainly consists of determining the natural frequencies of the beam and identifying its associated deformation modes. The primary objective is to avoid the phenomenon of resonance, which is induced by the coincidence of the calculated natural frequencies with the external excitation frequencies of the beam. Particular attention is paid to the fundamental frequency as it represents the vibration mode most likely to be excited (highest risk). This work analyses the influence of variations in the dimensions and mechanical properties of the beam's metal on its natural frequencies.

Keywords: Vibration, metal beam, modal analysis, fundamental frequency, fundamental mode, finite element method (FEM).

Sommaire

Liste de figure	I
Liste de tableaux	II
Mots-clés Techniques	III
Abréviation Techniques	IV
Introduction générale	
Introduction générale	1
CHAPITRE I: Généralités sur la vibration des structures	
I.1. Introduction	3
I.2. Analyse modale	3
I.3. Vibration d'une structure	4
I.3.1 Système mécanique	5
I.3.2 Système électrique	5
I.4. Sources des vibrations et leurs types	6
I.4.1 Vibrations périodiques de type sinusoïdal simple ou sinusoïdal complexe	7
I.4.2 Vibrations périodiques de type impulsionnel	7
I.4.3 Vibrations aléatoires de type impulsionnel	7
I.5. Classification des vibrations	8
I.5.1 Vibrations libres et vibrations forcées	8
I.5.2 Vibrations amorties et vibrations non amorties	9
I.5.3 Vibrations régulières et vibrations non régulières	9
I.6. Caractéristiques des vibrations	9
I.6.1 Amplitudes(A)	10
I.6.2 Fréquence(F)	12
I.6.3 Période (T)	12
I.6.4 Mode de vibration	12
I.7. Surveillance des vibrations	13
I.8. Techniques d'analyse des vibrations des structures	14
I.8.1 Analyse expérimentale	14

I.8.2 Tests vibratoires in-situ (sur site)	14
I.9. Outils de l'analyse vibratoire de structures	14
I.9.1 Capteur	15
I.9.2 Amplificateur	17
I.9.3 Equipement d'analyse	17
I.10. Effets des vibrations des structures	17
I.10.1 Déformations permanentes	18
I.10.2 Fatigue des matériaux	18
I.10.3 Résonance de la structure	18
I.11. Méthodes de réduction des vibrations des structures	18
I.12. Fréquence naturelle (Fréquence propre) d'une structure	19
I.12.1 Fréquences naturelles dans le génie mécanique	19
I.12.2 Fréquences naturelles dans le génie civil	20
I.13. Techniques de calcul de fréquences naturelles	20
I.13.1 Méthodes expérimentales	20
I.13.2 Méthodes numériques	20
I.14. Fréquence de résonance d'une structure	21
I.15. Stratégie pour éviter la résonance mécanique d'une structure	22
I.16. Importance de la poutre métallique	22
I.17. Choix de la forme de poutre	22
I.18. Risques associés aux poutres	23
I.19. Matériaux utilisés dans la fabrication des poutres métalliques	23
I.19.1 Poutres en acier	23
I.19.2 Poutres en aluminium	24
CHAPITRE II : Modélisation numérique par la méthode des éléments finis	
II.1. Introduction	26
II.2. Principe de la simulation numérique	26
II.3. Avantages de la simulation numérique	27

II.4. Principaux logiciels de simulation numérique par la MEF	28
II.5. Présentation de logiciel choisi–ABAQUS/CAE (version6.14).....	29
II.5.1 Définition de l'ABAQUS	29
II.5.2 Produits ABAQUS	30
II.5.3 Etapes d'analyse par l'ABAQUS	33
II.5.4 Symboles des unités utilisées dans l'ABAQUS	34
II.6. Modélisation de la poutre métallique sur ABAQUS.....	35
II.6.1 Organisation de l'interface ABAQUS.....	35
II.6.2 Passage successif dans les modules.....	36
II.6.3 Etude de la première étape d'analyse	37
 CHAPITREIII: Résultats	
III.1. Introduction	42
III.2. Conditions aux limites et Maillage.....	43
III.3. Fréquences naturelles obtenues	43
III.4. Modes propres obtenues.....	44
III.5. Influence de la variation de la longueur	45
III.6. Influence de la variation de la section.....	46
III.7. Influence de la variation des propriétés mécaniques.....	47
 Conclusion Générale	
Conclusion Générale.....	48
Bibliographie.....	49

Liste de figures

Figure I.1: Vibration d'une poutre non amortie.....	6
Figure I.2: Représentation graphique d'une vibration.....	6
Figure I.3: Organigramme des caractères de vibration	8
Figure I.4: Système masse-ressort	9
Figure I.5: Représentation des différentes amplitudes (vibration sinusoïdale)	11
Figure I.6: Amplitudes d'un signal vibratoire quelconque	11
Figure I.7: Utilisation des différentes méthodes d'analyse dans le monde	13
Figure I.8: Eléments constituant la chaîne de mesure	15
Figure I.9: Exemples de proximètres.....	16
Figure I.10: Schéma de principe d'un vélocimètre	16
Figure I.11: Schéma de fonctionnement d'un accéléromètre	17
Figure II.1: Interface utilisateur du logiciel ABAQUS/CAE.....	36
Figure II.2: Création et mise de données du modèle	36
Figures II.3: Dimension de la section de la poutre métallique étudiée.....	37
Figures II.4: Propriétés mécaniques de la poutre.....	37
Figures II.5: Création d'assemblage des éléments de la poutre	38
Figures II.6: Type de Step de la poutre.....	38
Figures II.7: Conditions aux limites de la poutre	39
Figures II.8: Type de maillage des éléments de la poutre	40
Figures II.9: Etape du module de Job	40
Figures II.10: Calculs effectués	41
Figure III.1: Schéma de présentation du modèle de poutre étudiée	42
Figure III.2: Modèle de la poutre métallique étudiée	43
Figures III.3: Type de maillage des éléments de la poutre	43
Figures III.4: Modes propres obtenus.....	44
Figures III.5: Influence de la variation de la longueur sur les fréquences naturelles	45
Figures III.6: Influence de la variation de la section sur les fréquences naturelles.....	46
Figures III.7: Influence de la variation des propriétés mécaniques sur les fréquences naturelles	47

Liste de tableaux

Tableaux I.1 : Natures de vibrations selon les variations des amplitudes en fonction du temps.....	7
Tableau I.2: Désignation symbolique des aciers.....	24
Tableau II.1: Symboles et unités utilisés dans ABAQUS	35
Tableau III.1: Différent métaux utilisés dans le modèle de poutre étudiée	42
Tableau III.2: Influence de la variation de la longueur sur les fréquences naturelles	45
Tableau III.3: Influence de la variation de la section sur les fréquences naturelles.....	46
Tableau III.4 : Influence de la variation des propriétés mécaniques sur les fréquences naturelles	47

Mots-clés Techniques

Vibration:	Variation, au cours du temps, d'une grandeur (déplacement, ou vitesse, ou accélération) caractérisant son mouvement ou sa position, lorsque cette grandeur devient alternativement supérieure et inférieure à une valeur moyenne ou de référence.
Analyse modale:	Technique d'ingénierie essentielle qui consiste à étudier le comportement vibratoire libre d'une structure sans aucune force d'excitation externe. Elle permet d'identifier ses caractéristiques intrinsèques, telles que ses fréquences naturelles et ses modes propres de déformation.
Fréquence naturelle: (Fréquence propre)	Vitesse à laquelle une structure vibre naturellement sans force excitatrice externe.
Mode naturel: (Mode propre)	Forme géométrique de la déformation naturelle prise par une structure lorsqu'elle vibre à une fréquence naturelle.
Fréquence fondamentale:	La plus basse fréquence naturelle d'une structure (appelée première fréquence naturelle f_1), est généralement la plus faible énergie pour faire vibrer la structure. Si cette fréquence coïncide avec une fréquence d'excitation externe, la structure peut vibrer de manière excessive entraînant une fatigue rapide ou une défaillance structurale.
Mode fondamental:	Forme géométrique de la déformation naturelle prise par une structure lorsqu'elle vibre à une fréquence fondamentale.
Résonance:	Phénomène de vibration excessive d'une structure. Elle se produit lorsqu'une force d'excitation externe applique une fréquence égale à l'une des fréquences propres (ou naturelles) de la structure. Cette amplification peut entraîner des dommages graves ou la rupture de la structure.
Défaillance :	Cessation de l'aptitude (incapacité) d'une structure à accomplir une fonction requise. Qu'elle soit causée par des facteurs internes ou externes, cette incapacité peut entraîner une dégradation majeure ou la rupture de la structure.
Fatigue:	Endommagement progressif sous chargements cycliques (ex: démarrages ou arrêts de pompes).
Rigidité:	Résistance à la déformation élastique, est caractérisée par la valeur du module d'élasticité du matériau (Module d'Young noté ' E ').
Poutre métallique:	Élément structurel horizontal ou incliné, généralement de forme allongée. Elle est conçue pour supporter les charges verticales et horizontales appliquées à la structure et les transférer aux appuis ou aux fondations. Elle est également utilisée pour résister aux efforts de flexion, de cisaillement et au flambement générés par ces charges.

Abréviations Techniques

A:	Amplitude: distance maximale de chaque côté du point d'équilibre que l'objet peut parcourir.
Ac:	Amplitude crête: amplitude maximale par rapport au point d'équilibre.
Acc:	Amplitude crête à crête (peak to peak) : différence entre les amplitudes maximale et minimale du mouvement.
Aeff:	Amplitude efficace: aussi appelée RMS (Root Mean Square), mesure la plus intéressante des amplitudes de vibration.
F:	Fréquence: nombre de cycles effectués par un objet vibrant pendant une seconde, exprimée en Hertz (Hz).
T:	Période : temps pris par un objet pour compléter un cycle complet de vibration, exprimé en seconde.
MEF:	Méthode d'analyse des structures par Eléments Finis qui permet d'obtenir une grande précision et de prédire les réactions d'une structure avant même sa construction physique. Elle offre une alternative pour les structures plus complexes où les solutions analytiques ne sont pas possibles.
S235:	Acier non allié ordinaire (standard), offre une limite d'élasticité minimale de 235 MPa.
Acier Inoxydable 304L:	Alliage d'acier caractérisé par sa faible "Low" teneur en carbone (inférieur à 0,03%), sa grande résistance à la corrosion et son excellente soudabilité.
6061-T6:	Alliage d'aluminium composé principalement d'aluminium et d'éléments d'addition (magnésium et silicium). Il est caractérisé par sa légèreté, sa grande résistance à la corrosion et son excellente soudabilité.
Module d'élasticité (E): (Module de Young)	Mesure de la rigidité d'un matériau.(valeur typique pour les aciers: 210 GPa).
Coefficient de Poisson (ν) :	Mesure la déformation transversale d'un matériau lorsqu'il est étiré ou compressé. (valeur typique pour la plupart des métaux : 0,3).
ABAQUS:	Code de calcul numérique (logiciel informatique) d'analyse basé sur la méthode des éléments finis (MEF). Il est utilisé pour simuler des problèmes très variés en mécanique et pour prédire la réponse physique des structures soumises à des chargements ou à diverses conditions environnementales.
ABAQUS/CAE :	Module de modélisation et pré-traitement du code de calcul numérique ABAQUS.
ABAQUS/Explicit:	Module des analyses dynamiques rapides (excitations, explosions, ...) du code de calcul numérique ABAQUS.

Introduction Générale

Introduction Générale

L'analyse modale occupe une place fondamentale en ingénierie structurelle, car elle permet de déterminer les caractéristiques dynamiques intrinsèques d'une structure, telles que les fréquences naturelles et les modes propres de déformation associés, cette étude est indispensable pour prévenir les phénomènes de résonance et garantir la stabilité de cette structure. L'intégration de la modélisation numérique via la méthode des éléments finis elle permet de simuler avec précision le comportement vibratoire de la structure sous diverses conditions aux limites sans nécessiter de tests physiques précoces.

Dans le cas spécifique d'une poutre métallique, composant élémentaire de nombreuses structures, parfois sont soumises aux excitations vibratoires créées par l'influence des conditions opératoires permanentes sévères entourant ces poutres telles que les effets engendrés par les moteurs tournant, les véhicules en mouvement, les machines déséquilibrées, les turbines, les compresseurs, ... etc.

Ces vibrations ne sont pas souhaitables, car elles apparaissent dans toutes ces poutres et elles ont une influence considérable sur leurs sécurités et leurs durées de vie. Souvent de petites vibrations insignifiantes peuvent être amplifiées et devenant des sources des déformations importantes et menant à l'endommagement et la résonance, comme exemple, l'effondrement spectaculaire du pont suspendu Tacoma Narrows (à l'état américain de Washington) en 1940 résultait d'une résonance causée par de fortes rafales de vent.

L'analyse modale est effectuée actuellement par des simulations numériques pour permettre de tester virtuellement de nombreuses variantes géométriques ou de matériaux. Cette approche réduit considérablement les coûts et le temps de développement des prototypes physiques complexes. Les ingénieurs peuvent optimiser la rigidité et la masse d'une structure et améliorer sa conception pour assurer sa sécurité et sa performance dans les environnements vibratoires exigeants, elle est largement utilisée surtout dans l'aéronautique et l'automobile pour concevoir des produits plus légers, plus robustes et plus sûrs.

Ce mémoire se concentre sur l'analyse modale à l'aide de la modélisation numérique par la méthode des éléments finis sous le code de calcul ABAQUS d'une poutre métallique encastrée à l'une de ses extrémités et libre à l'autre, pour déterminer les fréquences naturelles et les modes propres de déformation associés, et aussi chercher à comprendre comment la géométrie et le matériau influencent la signature vibratoire de la poutre. La connaissance préalable de sa fréquence propre est indispensable avant de sa conception.

Notre mémoire est divisé en trois chapitres :

- **Le premier chapitre** présente une bibliographie qui comporte des généralités sur la vibration des structures.
- **Le deuxième chapitre** présente une revue bibliographique sur le code de calcul ABAQUS, et la modélisation numérique par la méthode des éléments finis d'une poutre métallique encastree à l'une de ses extrémités et libre sur l'autre.
- **Le troisième chapitre** présente les résultats de la simulation numérique réalisée.

CHAPITRE I

Généralités sur la vibration des structures

I.1. Introduction

La surveillance vibratoire est l'outil préventif de maintenance au niveau des unités industrielles, et est la technique la plus utilisée pour réaliser un diagnostic fiable des équipements et contrôler l'évolution des paramètres de vibrations, elle repose sur l'utilisation des méthodes de surveillance et des moyens crédibles de contrôle pour effectuer des analyses vibratoires de façon rapide.

L'analyse de vibration des structures est un élément clé dans le domaine de l'ingénierie et est essentiel pour concevoir des structures sûres et efficaces, notamment dans le domaine des structures y compris les poutres métalliques, comme la construction d'un hangar, d'un pont, ...,et même celles qui sont considérées des supports de machines tournantes comme le moteur, la turbine, le compresseur, Donc il est primordial de comprendre comment et pourquoi ces structures vibrent et différencier entre la sécurité et la catastrophe.

En pratique et dans le domaine de la mécanique de conception, il est très difficile d'éviter les vibrations, elles se produisent généralement en raison des effets dynamiques, des tolérances de fabrication, des jeux entre les pièces, et parfois aussi de frottement entre les composants de la structure et des forces de déséquilibre.

Cependant, les vibrations mécaniques effectuent un travail utile. Par exemple, nous générons exprès des vibrations dans :

- Les compacteurs à béton,
- Les marteaux perforateurs,
- Les divers engins de battage, ... etc.

Souvent, de petites vibrations insignifiantes peuvent engendrer les fréquences de résonance de certaines autres pièces structurelles et être amplifiées et devenant des sources majeures de bruit et d'endommagement.

Dans ce chapitre, on a présenté les généralités fondamentales de la vibration des structures en se basant sur les notions nécessaires de la vibration, et on a montré une vue complète sur les techniques et les moyens de diagnostic et d'analyse vibratoire.

I.2. Analyse modale

L'analyse modale est une technique d'ingénierie utilisée pour étudier la réponse vibratoire d'une structure ou d'un système mécanique ou électrique, afin d'évaluer les caractéristiques de la fréquence de vibration. Elle peut être effectuée par des simulations

expérimentales (essais vibratoires) ou par des simulations numériques (modélisations numériques) par la méthode des éléments finis (MEF) sous un code de calcul (logiciel informatique). Elle permet d'éviter la résonance d'une structure par l'optimisation de sa conception, de garantir sa stabilité et de prédire son comportement dynamique sous diverses charges. Elle est essentielle à la résolution de plusieurs problèmes de vibration.

Généralement la mesure simultanée de la réponse vibratoire d'une structure basée sur la force d'excitation en différents points permettant le calcul de sa réponse en fréquence. [2]

I.3. Vibration d'une structure

Selon la norme NFE 90-001 : Une vibration est une variation avec le temps d'une grandeur qui caractérise le mouvement d'une structure ou de la position d'un système mécanique lorsque la grandeur est alternativement plus grande ou plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.

Le nombre de cycles complets du mouvement dans une période de temps d'une seconde est appelé fréquence (hertz Hz). [4].

En présence de dissipation de l'énergie, et c'est le cas de toute structure ou de tout système réel, les amplitudes du mouvement convergent jusqu'à l'équilibre dynamique dans le cas d'un système forcé, et jusqu'à l'équilibre statique dans le cas d'un système libre [3].

Tout système mécanique constitue un assemblage d'une masse et d'un élément flexible (un ressort par exemple), ou leur équivalence dans un système électrique (inductance, condensateur) peut faire des mouvements vibratoires.

Dans la plupart des cas, le système mécanique est équipé d'un amortisseur, et le système électrique intègre une résistance. [6]

En général, on peut représenter un système vibratoire par les schémas suivants :

- **Système mécanique :**



Masse



Ressort

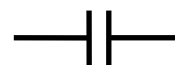


Amortisseur

- **Système électrique :**



Bobine



Condensateur



Résistance

D'une autre manière, on peut dire que tout système vibratoire mécanique ou électrique contient trois moyens ci-dessous. [6]

I.3.1. Système mécanique

- Moyen pour stocker l'énergie cinétique, c'est la masse.
- Moyen pour stocker l'énergie potentielle, c'est le ressort.
- Moyen de dissipation de l'énergie, c'est l'amortisseur.

I.3.2. Système électrique

- Moyen pour stocker l'énergie électrique, c'est le condensateur.
- Moyen pour stocker l'énergie magnétique, c'est la bobine.
- Moyen de dissipation de l'énergie, c'est la résistance électrique.

L'analyse statique des structures mécaniques donne des résultats importants sur la résistance des structures soumises à des sollicitations externes. En outre, l'analyse dynamique des structures s'avère indispensable pour contrôler leurs vibrations car ces dernières sont : [11].

1. A l'origine de la rupture de pièces mécaniques d'une structure notamment la rupture par fatigue en dépassant la contrainte élastique.
2. La source des défauts de fabrication lors de l'usinage des pièces mécaniques.

L'analyse des vibrations dans les structures mécaniques, doit ainsi porter sur les points essentiels suivants :

1. L'environnement vibratoire (les forces externes).
2. La structure elle-même.
3. La réponse vibratoire de la structure suite à l'application des forces externes.

Cas d'une poutre :

L'analyse vibratoire des poutres à une grande importance dans la conception des structures, ainsi que pour évaluer leurs performances. [3]

La figure (I.1) ci-dessous représente la fréquence de vibration d'une poutre en fonction du temps.

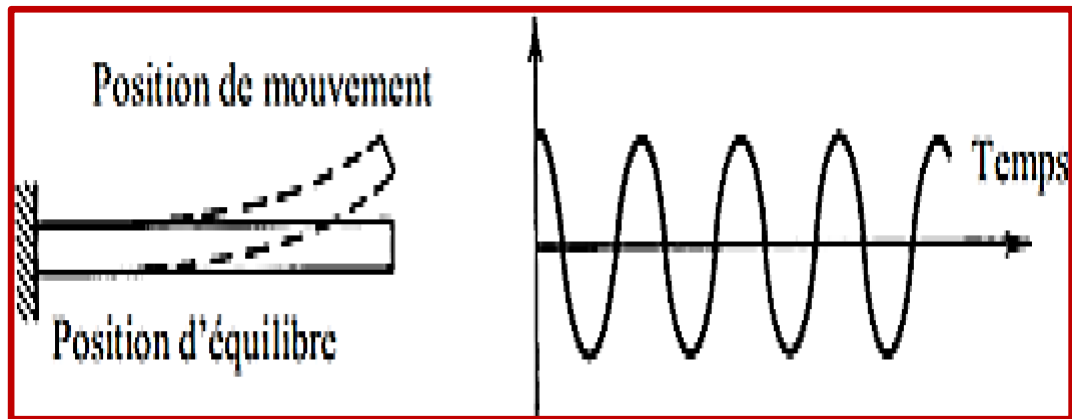


Figure I.1: Vibration d'une poutre non amortie. [3]

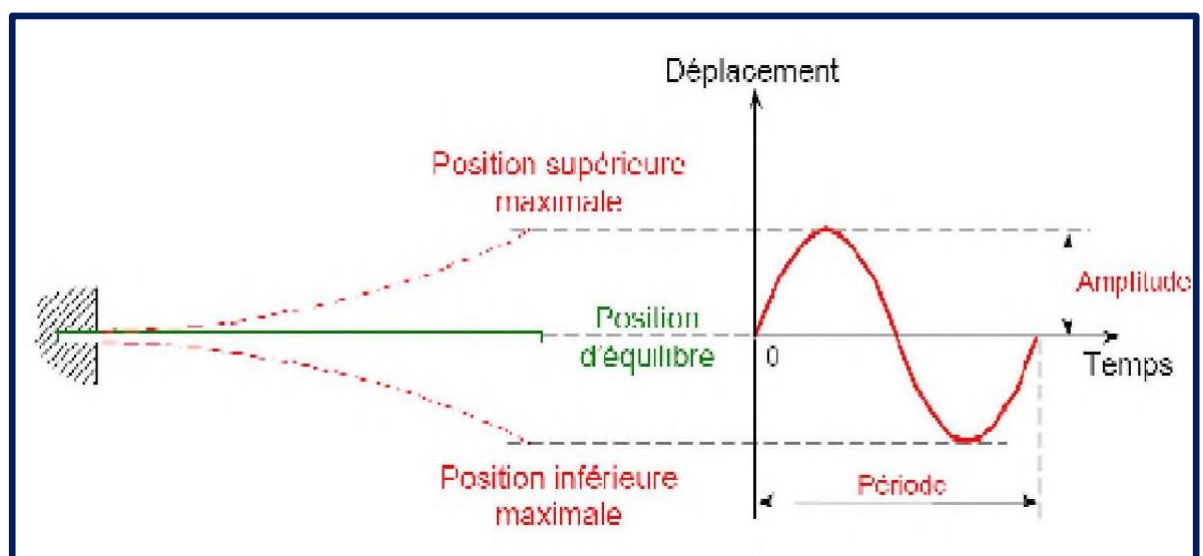


Figure I.2 : Représentation graphique d'une vibration. [10]

I.4. Sources des vibrations et leurs types

Les vibrations se produisent lorsque des forces périodiques sont appliquées à une structure. Ces forces résultent par des charges dynamiques de différentes sources, par exemple :

- Les phénomènes naturels, comme le vent puissant, les tremblements de terre
- Les activités humaines, comme les mines, les forages, les barrages, ... etc.).
- Les charges dynamiques, comme le déplacement des véhicules lourds sur un pont (train, voiture, ...), aussi le fonctionnement des machines industrielles tournantes sur une dalle supportée par des poutres, ... etc.

Les vibrations générées sont de natures différentes, à savoir : [5].

I.4.1. Vibrations périodiques de type sinusoïdal simple ou sinusoïdal complexe:

Vibrations générées par un fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques d'une machine tournante (rotation de lignes d'arbres, engrènements, ...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).

I.4.2. Vibrations périodiques de type impulsif:

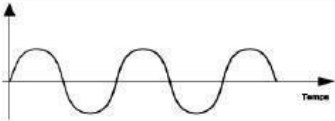
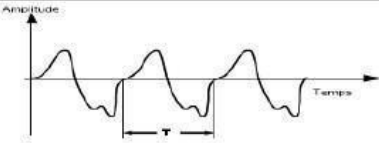
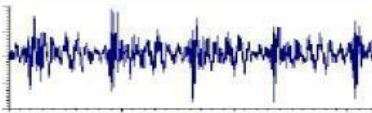
Vibrations sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons,...) ou par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ...

I.4.3. Vibrations aléatoires de type impulsif:

Peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe, ...etc.

Les types de vibrations se résument dans le tableau (I-1) suivant :

Tableaux I-1 : Natures de vibrations selon les variations des amplitudes en fonction du temps. [5].

Nature des vibrations	Représentation temporelle des vibrations	Causes possible
A : Périodique de type sinusoïdal simple		balourd
B : Périodique de type sinusoïdal complexe		Engrènement
C : Périodique de type impulsif		Ecaillage des roulements
D : Aléatoire de type impulsif		Défauts de lubrification sur des roulements cavitation

Les phénomènes vibratoires sont des phénomènes périodiques ou apériodiques plus ou moins complexes, qui dépendent directement des forces générées par les différents éléments : [7]

- Forces impulsionnelles (chocs)
- Forces transitoires (variations de charge)
- Forces périodiques (balourd)
- Forces aléatoires (frottements)

Il y a plusieurs caractères de vibration, l'organigramme ci-dessous présente les différents caractères de vibration.

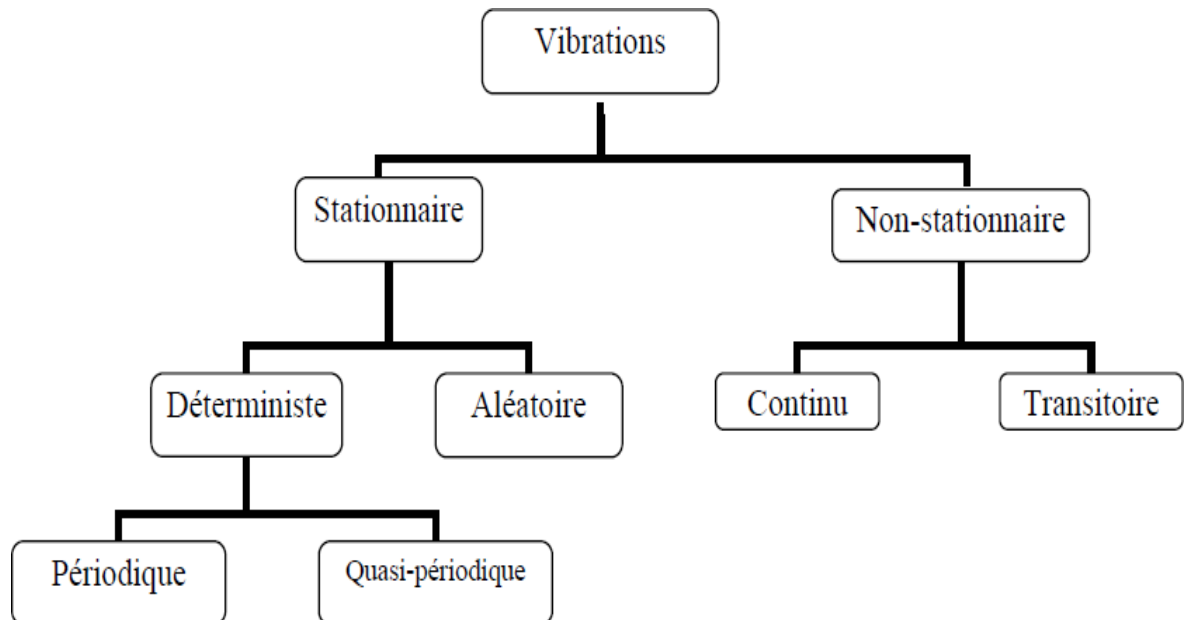


Figure I.3 : Organigramme des caractères de vibration. [7]

I.5. Classification des vibrations

Les vibrations peuvent être classifiées sous plusieurs formes. On s'intéresse à la classification la plus commune qui range les vibrations dans trois catégories. [6]

I.5.1. Vibrations libres et vibrations forcées

Après une perturbation initiale, un système vibratoire est laissé sans aucune action d'une force externe, les vibrations dans ce cas sont connues comme des vibrations libres. L'oscillation d'un pendule simple est un exemple de ce type de vibrations.

Si le système est soumis à une force extérieure au cours de toutes ces vibrations, les vibrations résultantes sont dites forcées. On peut prendre le pendule simple comme exemple si la masse est soumise à une force périodique extérieure. [6]

I.5.2. Vibrations amorties et vibrations non amorties

Si l'énergie totale du système est conservée l'hors des vibrations (il n'y a pas de dissipation de l'énergie), ces vibrations sont dites non amorties. En revanche si le système perd de l'énergie au cours de ces vibrations (si l'on considère la résistance de l'air sur la masse du pendule simple dans l'exemple précédant), après certain temps la masse s'arrête à cause de la dissipation de l'énergie. Ces vibrations, sont dites vibrations amorties.

I.5.3. Vibrations régulières et vibrations non régulières

Si l'amplitude du mouvement vibratoire est connue à tout moment, les vibrations résultantes sont appelées régulières ou déterministes, d'une autre manière, c'est le mouvement vibratoire dont on peut prévoir la valeur de l'amplitude à n'importe quel moment. Dans le cas contraire, les vibrations sont dites non régulières ou non déterministes.

I.6. Caractéristiques des vibrations

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

Lorsqu'une force externe est appliquée à une structure, elle peut provoquer des vibrations qui se propagent à travers la structure

L'exemple le plus simple d'un système en vibration est donné par le mouvement d'une masse suspendue à un ressort et relâchée après traction représenté dans la figure I.4. [4]

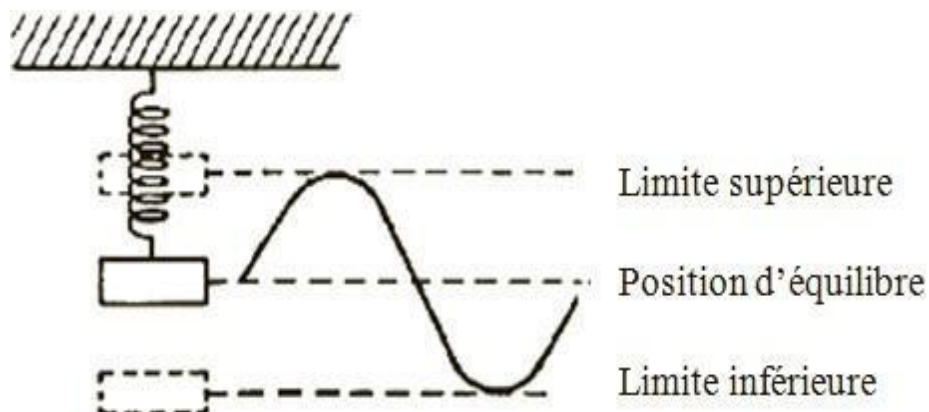


Figure I.4 : Système masse-ressort. [4]

Si on observe le mouvement de la masse on constate qu'il se traduit par :[9]

- **Un déplacement** : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre ;
- **Une vitesse de déplacement** : variation du déplacement par rapport au temps ;
- **Une accélération** : variation de la vitesse par rapport au temps.

L'équation de mouvement de ce système est comme suit : $X(t)=A \sin (\omega t+\Phi)$

Avec :

- **A** : l'amplitude appelée parfois le module
- **ω** : pulsation (rad/s) = $2\pi F = \frac{2\pi}{T}$
- **Φ** : la phase
- **F** : fréquence exprimée en hertz (Hz)
- **T** : période (seconde)

Les vibrations sont généralement analysées en termes de quatre éléments principaux :

I.6.1. Amplitudes (A)

L'amplitude est la distance maximale de chaque côté de la position naturelle que l'objet peut parcourir une fois l'objet relâché. Un objet vibrant se déplace sur une distance maximale de part et d'autre de sa position fixe. L'amplitude est la distance comprise entre la position fixe et la position extrême d'un côté ou de l'autre, et elle est mesurée en mètres (m). L'intensité de la vibration dépend de l'amplitude. [4].

On peut exprimer l'amplitude d'une oscillation grâce à la distance entre les points extrêmes atteints par le mouvement (valeur crête à crête) ou par la distance entre un point central et l'élongation maximale (valeur de crête). On peut définir :[5].

- **La valeur de crête Ac** : donne l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête (Ac) ou niveau de crête et s'avère utile dans les mesures concernant les phénomènes de courte durée. Cependant, elle ne tient pas compte de l'évolution de la vibration dans le temps.
- **La valeur de crête à crête Acc** : L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (Acc) (peak to peak) ou niveau crête à crête, indique la différence entre les amplitudes maximale et minimale du mouvement. C'est une quantité utile pour déterminer le déplacement d'un composant, déplacement qui peut être critique pour des considérations de contrainte maximale ou de jeu mécanique.

- **La valeur efficace Aeff ou la valeur RMS** : L'amplitude efficace (Aeff), aussi appelée RMS (Root Mean Square) ou niveau efficace, est la mesure la plus intéressante des amplitudes de vibration. En plus de tenir compte de l'évolution de la vibration dans le temps, le calcul de la valeur efficace est lié à l'énergie vibratoire et donc au (potentiel de détérioration) de la vibration.
- **Le facteur de crête** : définit le rapport de la valeur de crête d'un signal à sa valeur efficace. [4].

Amplitude

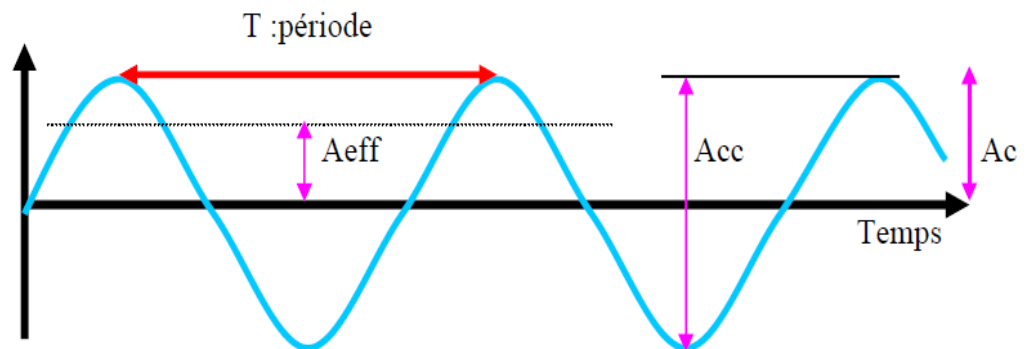


Figure I. 5 : Représentation des différentes amplitudes (vibration sinusoïdale). [5]

Dans le cas d'une vibration de type sinusoïdal comme sus citée, l'amplitude efficace s'exprime en fonction de l'amplitude crête de la façon suivante :

$$A_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_c = 0,707 A_c [4].$$

Cas d'une vibration quelconque :

La fréquence d'une vibration quelconque est représentée dans la figure I.6 suivante :

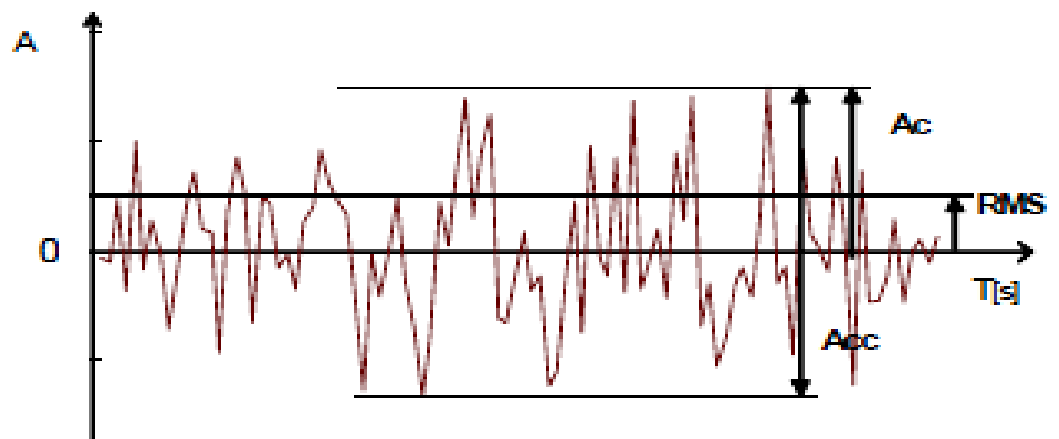


Figure I. 6 : Les amplitudes d'un signal vibratoire quelconque. [5]

I.6.2. Fréquence (F)

Un cycle complet de vibration est produit lorsque l'objet se déplace d'une position extrême à l'autre position, puis revient au point de départ. Le nombre de cycles effectués par un objet vibrant pendant une seconde est appelé **la fréquence**. L'unité de fréquence est l'Hertz (Hz). Un hertz correspond à un cycle par seconde. [4]

Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz].

- Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence F de 20 hertz.
- Si la fréquence F d'un phénomène est de 50 hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, La durée d'un cycle (ou période T) est de 1/50ème de seconde.
- La fréquence F est l'inverse de la période T : $F = \frac{1}{T}$ [5].

I.6.3. Période (T)

Le temps pris pour compléter un cycle complet de la vibration.

I.6.4. Mode de vibration

La façon dont une structure vibre lorsqu'elle est excitée. [1]

Les caractéristiques des vibrations sus citées aident les ingénieurs à évaluer le comportement dynamique des structures et à développer des modèles précis pour les concevoir.

Pour étude approfondie de la vibration des structures, il est crucial de prendre en compte les propriétés matérielles telles que la densité d'un matériau, sa rigidité et ses capacités de dissipation d'énergie. Ces facteurs déterminent comment une structure répondra à des forces dynamiques.

Par exemple, des matériaux comme l'acier, bien que robuste, peuvent vibrer différemment sous stress par rapport à des composites modernes qui offrent une meilleure absorption des vibrations.

De plus, les avancées récentes dans les technologies de capteurs permettent désormais de surveiller en temps réel les vibrations des structures pour assurer une sécurité accrue.

Comme tout mouvement, une vibration est caractérisée par l'un des trois paramètres physiques : le déplacement x , la vitesse v , l'accélération γ , qui sont reliés par des relations mathématiques, et qui ont une fréquence identique. [5].

I.7. Surveillance des vibrations

Les techniques de la maintenance préventive conditionnelle sont utilisées pour éviter les défaillances des équipements ou des installations, parmi ses techniques on distingue l'analyse vibratoire, l'analyse des huiles, l'analyse thermique, et autre. Comme montre la figure I. 7. [10].

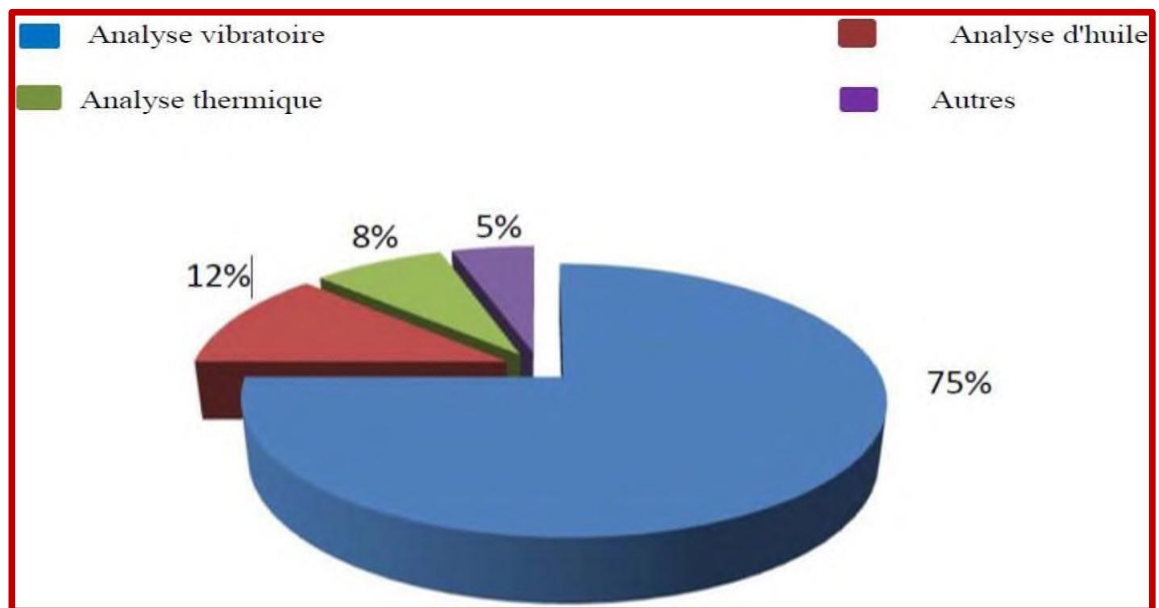


Figure I.7 : Utilisation des différentes méthodes d'analyse dans le monde [10].

On distingue que l'analyse vibratoire représente 75% des techniques de maintenance préventive conditionnelle, ce qui est considérée comme l'outil clé de la plupart des programmes d'entretien préventif primaire de maintenance surtout dans le domaine de la mécanique de l'industrie.

Au cours des dix dernières années, la plupart de ces programmes ont adopté l'utilisation des dispositifs de collecte de données sur microprocesseur et à canal unique et du logiciel Windows-base d'acquérir, contrôler, tendre, et évaluer l'énergie de vibration créée.

L'étude et l'analyse des vibrations (ou signaux) ont pris un essor considérable en raison du développement de techniques de plus en plus sophistiquées et de besoins les plus variés dans différents domaines : machines industrielles, transports, ..., etc. Elle est capable de fournir un vrai diagnostic pour orienter l'action de maintenance.

On peut dire que cette méthode présente trois gros avantages : les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont détectés à un stade précoce, et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine, c'est un peu "la méthode incontournable". [5].

I.8. Techniques d'analyse des vibrations des structures

L'analyse vibratoire des structures est essentielle pour assurer la stabilité et la sécurité des constructions modernes. Diverses méthodes permettent d'évaluer l'effet des forces vibrantes sur les structures, de la phase de conception à l'entretien continu.

Ces approches diffèrent en complexité et précision, en fonction de la nature de la structure et des forces en jeu. Deux techniques sont procédées, à savoir :

I.8.1. Analyse expérimentale :

Cette technique consiste à réaliser des expériences au niveau des laboratoires et tester physiquement la structure en la soumettant à des excitateurs mécaniques pour observer son comportement vibratoire sous des conditions d'excitation contrôlées, dont la mesure les fréquences naturelles et les modes propres.

I.8.2. Tests vibratoires in-situ (sur site) :

Ces tests sont réalisés directement sur site pour mesurer les vibrations induites par les forces réelles.

Ces méthodes permettent d'obtenir des données précises sur la réponse dynamique des structures. [1]

Exemple :

Un pont est équipé de capteurs de vibration pendant des tests de charge contrôlés. Les résultats révèlent ses modes de vibration dominants, aident les ingénieurs à ajuster le design pour prévenir la résonance.

I.9. Outils de l'analyse vibratoire de structures

La chaîne de mesure est l'élément principal de l'analyse vibratoire pour transformer la vibration mécanique en un signal électrique. Les éléments constituant la chaîne d'acquisition et de visualisation du signal sont présentés sur la figure. I.8. [7]

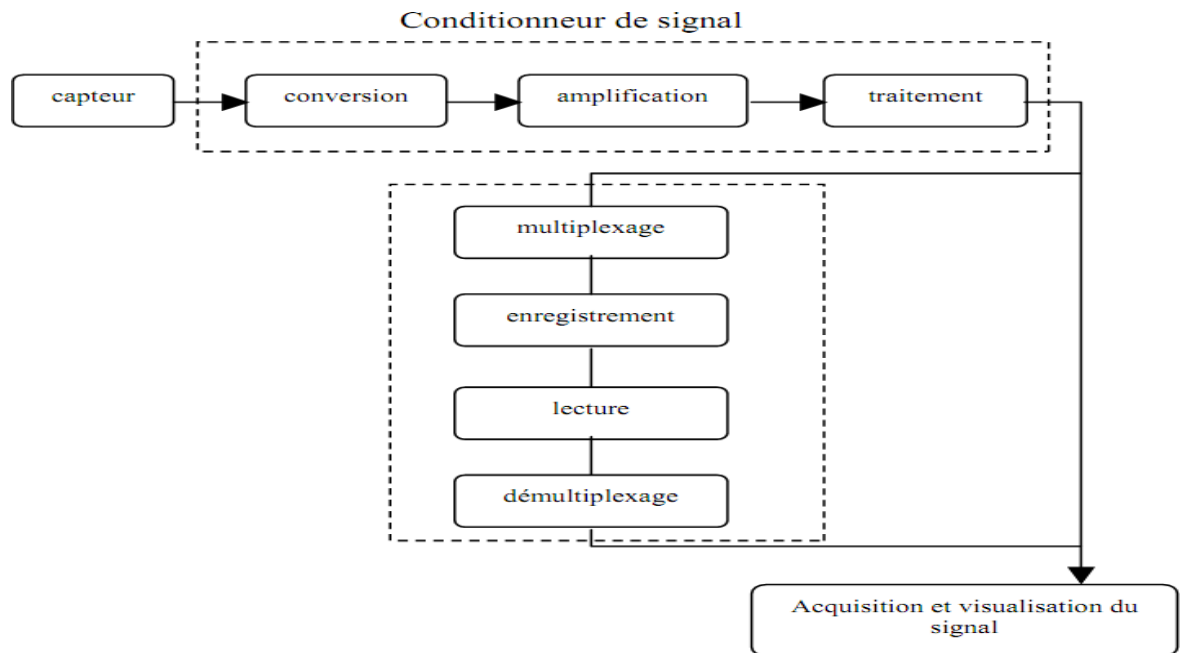


Figure I.8 : Les éléments constituent la chaîne de mesure. [7]

La chaîne doit remplir les conditions suivantes : [12]

- Le signal délivré par le capteur peut être exprimé à l'aide des grandeurs suivantes :
 - La tension électrique : pour les capteurs de tension (en mV/g , $\text{mV}/\mu\text{m}$, ...).
 - La charge électrique : pour les accéléromètres piézoélectriques (en PC/g).
- Amplifier le signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable et transportable (le préamplificateur peut être ou non incorporé au capteur), et il donne :
 - Soit une amplification simple de la tension de sortie du capteur.
 - Soit une transformation de la charge électrique en tension avant son amplification.

Les outils utilisés dans l'analyse vibratoires sont résumés comme suit : [12]

I.9.1. Le capteur :

Est considéré le premier maillon de la chaîne de mesure, sa fonction est de transformer le mouvement vibratoire en un signal électrique, sa masse est légère (environ 20g), attirance malgré tous les mesures.

Pour obtenir une bonne qualité du signal, il faut choisir la meilleure direction de fixation du capteur sur la structure. Le choix de la fixation est très important parce qu'elle influe sur la mesure.

Les capteurs sont de 03 types : [12]

- **Le proximètre** : est le capteur de déplacement ou proximètre (ou encore appelé capteur de proximité) mesure la distance comprise entre la surface surveillée et l'élément détecteur du capteur (appelée sonde). La grandeur mesurée est le déplacement. Comme représente la figure I.9

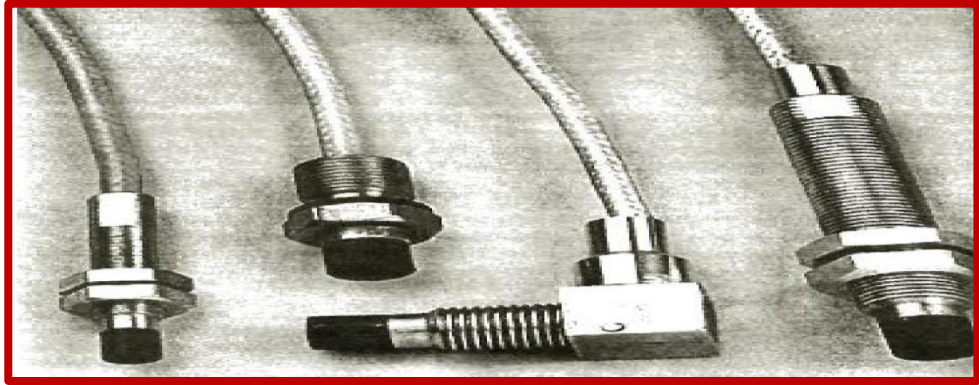


Figure I.9 : Exemples de proximètres. [12]

- **Le vélocimètre** : est le capteur de vitesse ou vélocimètre est constitué d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. La grandeur mesurée est la vitesse. Comme représente la figure I.10

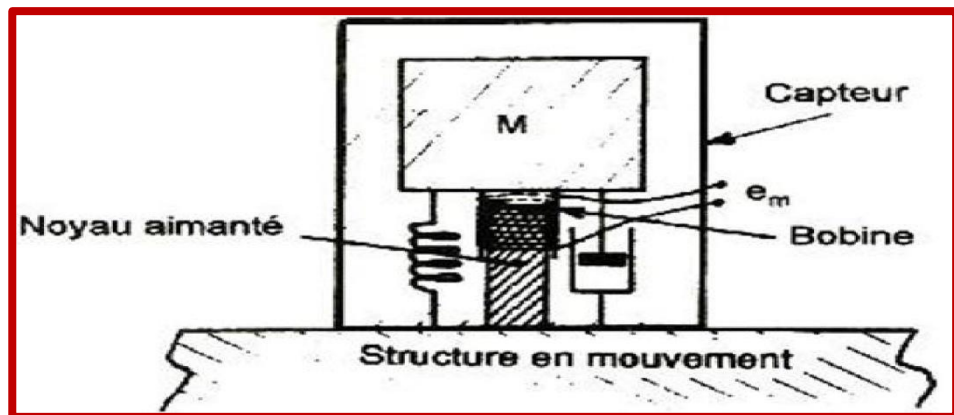


Figure I.10 : Schéma de principe d'un vélocimètre. [12]

- **L'accéléromètre** : Le capteur de vibration le plus utilisé est l'accéléromètre piézo-électrique., il tend à devenir le capteur de vibrations absolues. La grandeur mesurée est l'accélération.

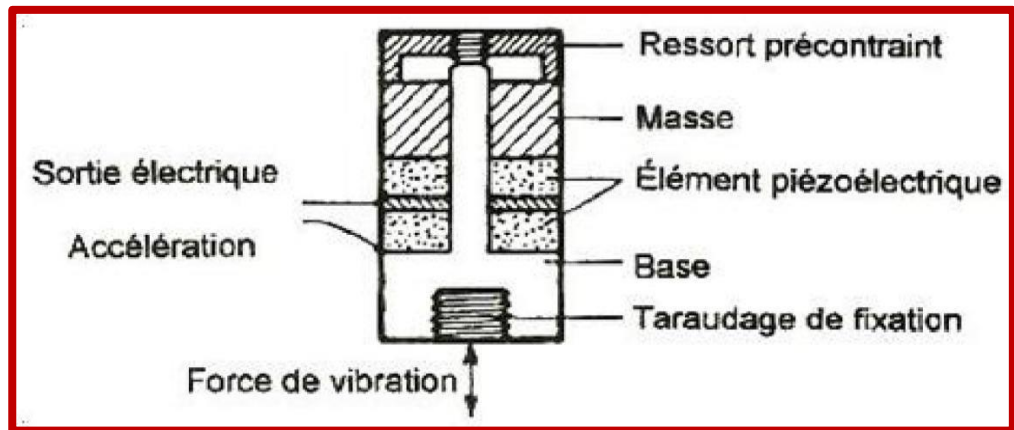


Figure I.11: Schéma de fonctionnement d'un accéléromètre. [12]

L'accéléromètre doit être installé dans des endroits de la structure où la mobilité est maximale pour la bande de fréquences étudiée. La tendance actuelle est toujours de mettre le capteur près du composant à suivre, pour que le signal soit moins perturbé. [7]

I.9.2. L'amplificateur

L'amplificateur est destiné à amplifier l'intensité du signal mesuré pour le traiter en utilisant les outils de traitement du signal. La limitation de la gamme fréquentielle est réalisée grâce à des filtres passe haut et passe bas.

I.9.3. Equipement d'analyse

Le traitement du signal mesuré est réalisé par l'analyseur de spectres multivoies, ce dernier est l'outil de base de traitement. [7]

I.10. Effets de vibrations des structures

La plupart des vibrations ne sont pas souhaitables dans les structures, car ils produisent une augmentation des contraintes et des pertes d'énergie.[8].

Les vibrations mécaniques apparaissent dans toutes les structures, elles ont une influence considérable sur le fonctionnement et la durée de vie de ces structures.

Les excitations dynamiques, qui sont une cause des vibrations, sont nombreuses. Elles proviennent, soit de l'environnement extérieur (phénomènes naturels, contacts ou chocs avec d'autres structures), soit de dispositifs internes mobiles (pièces intégrées à la structure). Le plus souvent ces vibrations sont néfastes pour les structures (usure, rupture, ...), comme même pour les personnes (bruits, faiblesse, ...) est peuvent conduire à un danger pour la santé. Ces problèmes doivent être pris en compte au niveau de la conception des structures. [6]

Les effets des vibrations sur les structures peuvent être divisés en plusieurs catégories :

I.10.1. Déformations permanentes

Les vibrations excessives peuvent déformer de façon permanente une structure, réduisant sa durée de vie.

I.10.2. Fatigue des matériaux

Les vibrations répétées peuvent entraîner une usure dans la structure provoquant des fissures et des ruptures.

I.10.3. Résonance de la structure

Si les forces d'excitation externes coïncident avec la fréquence naturelle, cela peut causer une augmentation sévère de l'amplitude, entraînant potentiellement un effondrement de la structure.

Pour atténuer ces effets, divers systèmes de contrôle de vibration sont mis en œuvre, tels que l'amortissement et la modification des dimensions et de la rigidité structurelles. [1]

I.11. Méthodes de réduction des vibrations des structures

Les vibrations des structures peuvent avoir des conséquences graves si elles ne sont pas contrôlées. Heureusement, il existe plusieurs méthodes efficaces pour réduire ces vibrations et garantir la stabilité des constructions.

Diverses techniques peuvent être mises en œuvre pour atténuer les vibrations dans les structures. Chaque méthode a ses propres avantages et limitations, les approches les plus courantes sont : [1]

- **Amortisseurs dynamiques** : Dispositifs ajoutés aux structures pour absorber l'énergie vibratoire.

Les amortisseurs dynamiques s'installent souvent dans des lieux stratégiques où les vibrations sont les plus fortes pour réduire les vibrations par absorption d'une partie de l'énergie vibratoire. Ces systèmes sont souvent installés dans des structures telles que : gratte-ciels, ponts suspendus, stades et ... etc.

Exemple : Un amortisseur harmonique est installé dans un gratte-ciel pour neutraliser les mouvements dus au vent puissant, en changeant la fréquence propre du bâtiment, l'amortisseur réduit les vibrations ressenties dans les étages supérieurs.

- **Diaphragmes rigides** : Éléments structurels qui augmentent la rigidité et réduisent les déformations.
- **Contreforts** : Structures supplémentaires pour disperser et redistribuer les forces.

Remarque :

- La dynamique de ces amortisseurs repose sur le principe de parer à toute résonance éventuelle, où ils exercent une force opposée à la vibration.
- Les amortisseurs dynamiques passifs fonctionnent sans source d'énergie externe, ce qui les rend utilisables dans des conditions variées, tandis que les modèles actifs, qui nécessitent une alimentation électrique, offrent plus de contrôle et d'adaptabilité. De plus, l'application de l'optimisation dans la conception de ces amortisseurs a conduit au développement de solutions hybrides qui combinent les avantages des deux types, aboutissant à une réduction significative des vibrations dans des configurations très spécifiques.

I.12. Fréquence naturelle (ou fréquence propre) d'une structure

La fréquence naturelle (ou fréquence propre) d'une structure ou système est la fréquence à laquelle le système oscille sans force excitatrice externe ni forces dissipatives (frottement ou résistance).[4]

La fréquence naturelle d'un objet varie en fonction de sa composition, sa taille, sa forme et son poids.

Comprendre à optimiser les fréquences naturelles est crucial en ingénierie pour éviter les phénomènes de résonance qui pourraient causer des dommages structurels, son importance se résume comme suit : [1]

I.12.1. Fréquences naturelles dans le génie mécanique

Dans le domaine du génie mécanique, les fréquences naturelles sont omniprésentes. Elles influencent sur les performances, la sécurité et l'efficacité des structures. Aussi, les **fréquences naturelles** permettent d'optimiser la conception des structures. [1]

I.12.2. Fréquences naturelles dans le génie civil

Les fréquences naturelles sont également essentielles dans la conception de structures en génie civil telles que les immeubles et les ponts. Les ingénieurs civils doivent veiller à ce que les fréquences naturelles des bâtiments ne

correspondent pas à celles des événements sismiques ou face aux vents pour éviter les phénomènes de résonance désastreux. Une structure comme un pont peut entrer en résonance avec le vent fort, ce qui exige une étude approfondie pour ajuster les paramètres structurels tels que la masse et la rigidité. [1]

I.13. Techniques de calcul de fréquences naturelles

Les fréquences naturelles sont essentielles pour comprendre la dynamique d'une structure ou d'un système. Il existe 02 techniques essentielles pour les calculer, comme suit :

I.13.1. Méthodes expérimentales

Dans de nombreux cas simples de structures, on peut utiliser la méthode expérimentale pour déterminer les fréquences naturelles, elle se base sur des mesures physiques réelles effectuées sur la structure (essais de vibration, marteaux d'impact et accéléromètres).

I.13.2. Méthodes numériques

Les méthodes numériques offrent une alternative pour les systèmes plus complexes où les solutions analytiques ne sont pas possibles.

Il existe des logiciels informatiques de simulation numérique par la méthode des éléments finis "**Modélisation par Éléments Finis**"(MEF) permettent de calculer les fréquences naturelles de structures complexes. Ces logiciels divisent la structure en petits éléments et emploient des calculs itératifs pour estimer les fréquences. [1]

La méthode par éléments finis (MEF) a révolutionné l'analyse des structures, permettant une grande précision et de prédire les réactions d'une structure avant même sa construction physique. Cette approche requiert des connaissances avancées en mathématiques, car elle implique la résolution d'équations différentielles complexes.

Une modélisation adéquate peut prévenir de nombreux problèmes structurels potentiels, économisant des ressources et garantissant une sécurité maximale.

Les avancées récentes incluent l'intégration de l'intelligence artificielle pour optimiser automatiquement les modèles (MEF) et améliorer encore la précision des prédictions vibratoires.

N.B :

- Les avancées technologiques en modélisation par éléments finis ont permis aux ingénieurs d'analyser et de visualiser les zones de concentration de contraintes au sein de structures complexes. Cela permet d'adopter des techniques de modification de structure, telles que l'ajout de renforts ou l'utilisation de matériaux composites, pour ajuster les fréquences naturelles et réduire les risques de dégâts liés à la résonance.
- Les méthodes numériques nécessitent une certaine expertise dans la configuration des modèles pour obtenir des résultats précis et fiables. Elles sont souvent utilisées en ingénierie pour concevoir des structures résistantes aux vibrations.

I.14. Fréquence de résonance d'une structure

La résonance est un phénomène selon lequel certaines structures sont sensibles à certaines fréquences d'excitation. Une structure résonante peut accumuler une énergie, si celle-ci est appliquée sous forme d'excitation entraînant des vibrations avec fortes amplitudes et proche d'une fréquence dite « **fréquence de résonance** », cette structure va atteindre l'équilibre qui dépend des éléments dissipatifs de la structure, ou être le siège d'oscillation de plus en plus important jusqu'à une rupture de la structure. [4]

En physique, lorsqu'une structure est excitée par une force externe, et si les fréquences d'excitation coïncident avec la fréquence naturelle de celle-ci, cela peut causer une augmentation sévère de l'amplitude, jusqu'à l'amplitude maximale (fréquence de résonance), entraînant potentiellement l'effondrement de la structure. Elle dépend de la masse, de la rigidité et de l'amortissement de la structure. [4]

Par exemple, un arbre de transmission dans une voiture vibre à sa fréquence naturelle, et lorsqu'elle est exposée à une force externe provoque la fréquence de résonance de l'arbre, cette force endommage l'arbre prématurément. [1]

Exemples de fréquence de résonance survenue : L'effondrement du pont de Tacoma Narrows (Washington. 1940) représente réellement l'importance d'éviter la fréquence résonance causée par le vent puissant.

I.15. La stratégie pour éviter la résonance d'une structure

Différentes mesures peuvent être prises pour réduire la résonance, comme installer des systèmes d'isolation active ou passive des vibrations, ou indiquer aux utilisateurs d'éviter un comportement pouvant induire une résonance, par la mise en œuvre des méthodes de réduction des vibrations.

Par la modification de la masse et de la rigidité d'une structure, la fréquence naturelle de vibration sera changée. Cela peut être crucial pour éviter les problèmes de résonance dans les objets soumis aux vibrations structurelles. [1]

Exemple :

Lors de la construction d'un nouveau pont, les ingénieurs ajoutent des sections de renfort pour augmenter la rigidité globale et ajustent la masse de certaines parties. Cela modifie la fréquence naturelle, empêchant les vibrations indésirables des véhicules lourds.

I.16. Importance de la poutre métallique

Une poutre métallique est un élément structurel horizontal ou incliné, généralement de forme allongée, est conçues pour supporter des charges et les transférer aux appuis ou aux fondations, et est utilisée aussi pour résister aux efforts de flexion, de cisaillement et au flambage, qui sont générés par les charges verticales et horizontales appliquées sur la poutre. [13]

I.17. Choix de la forme de poutre

Lors de la conception d'une poutre, il convient de prendre en compte plusieurs facteurs, tels que la nature et l'intensité des charges à supporter, la portée, la géométrie de poutre, le matériau utilisé, les conditions environnementales (climat, exposition aux intempéries, ... etc.), les normes et les règlements de construction en vigueur, ... etc.

De même les dimensions d'une poutre (section et longueur) sont étudiées pour la meilleure résistance possible aux déformations (flexion et torsion), prennent en compte les propriétés mécaniques du matériau et les conditions de charge. [13]

I.18. Risques associés aux poutres

Les risques et les problèmes courants associés aux poutres sont la rupture, la déformation, la fissuration, la corrosion, l'usure, ... etc. Ces problèmes peuvent être causés par des charges excessives, des défauts de conception, des erreurs de mise en œuvre, des conditions environnementales agressives, ...etc.

Pour optimiser la performance et la durabilité des poutres, il convient de prendre en compte plusieurs facteurs, tels que la qualité du matériau utilisé, la conception et le dimensionnement adéquats, la protection contre les agressions environnementales, l'entretien régulier, ... etc. Il est important de respecter les normes et les règlements en vigueur. [13]

I.19. Matériaux utilisés dans la fabrication des poutres métalliques

La Conception de la structure porteuse d'une halle ou d'un bâtiment est basée sur son utilisation prévue, soit essentiellement ses caractéristiques de résistance (pour assurer une sécurité structurale suffisante) et de déformabilité (pour garantir une bonne aptitude au service). Elle est donc fortement influencée par les propriétés des matériaux qui la composent.

Les poutres métalliques les couramment utilisées sont les poutres en acier et en aluminium.

I.19.1 Poutres en acier

Les propriétés du matériau acier soient utilisées au mieux, par sa haute résistance mécanique, sa grande ductilité et sa soudabilité. C'est le métal le plus dur, le plus courant et le plus répandu comparativement à d'autres métaux.

L'acier est essentiellement une combinaison de fer et de carbone. Il résulte d'une transformation de la matière première tirée du sol. Les conditions matérielles de cette transformation entraînent dans sa composition, la présence en très faibles proportions d'autres éléments (manganèse, phosphore, soufre ... etc.) suivant la qualité de l'acier que l'on veut obtenir, considérés comme impuretés, il est possible d'abaisser le pourcentage de ces impuretés au cours de l'élaboration. [14]

L'acier non allié ordinaire est composé de : 97% de fer, 2% de carbone C et < 1% (Mn, S et P), est destiné à la fabrication métallique comme les poutres, au pliage et au soudage. Les poutres métalliques sont conçues et calculées pour rester la plupart du temps dans le domaine élastique.

L'acier non allié, est classé par lettres selon leur usage :

Désignation symbolique des aciers

Tableau I-2 : Désignation symbolique des aciers [14]

Nuance		Qualité
Symboles principaux		Symboles additionnels
Lettre	Caractéristiques mécaniques	
Exemple :S	235	JR

Symboles principaux	Symbole	Désignation
	G	Acier moulé
	S	Aciers de construction métallique (exp: S235, S355)
	E	Aciers de construction mécanique
	B	Aciers à béton
	Y	Aciers pour béton précontraint
	Ces symboles sont suivis de la valeur de la limite d'élasticité ou de la résistance minimale à la traction en MPa	

L'acier non allié ordinaire **S235** (souvent **S235JR**) est utilisé dans la fabrication des poutres métalliques, et est très répandu pour sa polyvalence, sa bonne soudabilité et son coût abordable. Il offre une limite d'élasticité minimale de **235 MPa** (**235 N/mm²**), "**JR**" garantit une résilience de 27 Joule à 20°C. Ses synonymes incluent l'ancien grade AFNOR E24-2 (A37).

Par ailleurs, l'acier **S355** a une limite d'élasticité de **355 MPa**. Pour un acier à haute limite d'élasticité cette valeur peut s'élever à 460 MPa, certainement 690 MPa (aciers thermomécaniques). [15]

I.19.2 Poutres en aluminium

L'aluminium est un matériau léger et résiste à la corrosion, ce qui a un rôle idéal pour les applications dans des environnements où l'humidité est un facteur clé. Les poutres en aluminium sont largement utilisées dans les structures marines et aérospatiales. [16]

Les poutres en aluminium sont largement utilisées dans les charpentes structurelles, les assemblages porteurs et les systèmes de support d'équipement. Leurs sections transversales, telles que les poutres en I, les poutres en H ou les poutres rectangulaires, offrent un rapport résistance/poids élevé, ce qui les rend adaptées aux exigences structurelles spécifiques.

Les alliages d'aluminium les plus courants sont le 6061-T6, le 6005A-T6 et le 6082-T6 pour les charges structurelles plus élevées, et le 6063-T5 lorsque des finitions fines et des tolérances plus serrées sont requises. [17]

CHAPITRE II

Modélisation numérique par la méthode des éléments fins

II.1. Introduction

L'utilisation des modèles physiques d'une structure et la simulation expérimentale pour la recherche d'une solution d'un phénomène naturel en générale ou d'un problème d'ingénierie peut s'avérer coûteux en temps et en moyens. Et avec les progrès enregistrés dans le domaine de l'informatique et les performances des ordinateurs de plus en plus étendus, il est devenu possible de résoudre des systèmes d'équations différentielles très complexes de ces problèmes. Plusieurs techniques de résolution numérique par des logiciels informatiques ont été développées et appliquées avec succès pour avoir des solutions satisfaisantes des problèmes très variés.

L'analyse modale par la simulation numérique utilisant la modélisation numérique par la méthode des éléments finis sous divers codes de calcul est l'une des techniques de résolutions les plus puissantes. L'un des avantages majeurs de cette méthode est le fait qu'elle offre la possibilité de développer un programme permettant de résoudre plusieurs types de problèmes d'ingénierie avec peu de modifications. En particulier, toute forme complexe d'un domaine géométrique est bien posée avec toutes les conditions aux limites, peut être facilement traité par la méthode des éléments finis.

Cette méthode consiste à diviser le domaine physique à traiter en plusieurs sous domaines appelés éléments finis. La solution recherchée est remplacée dans chaque élément par une approximation avec des polynômes simples et le domaine peut ensuite être reconstitué avec l'assemblage ou sommation de tous les éléments. [18].

Dans ce chapitre, on présente l'importance de la simulation numérique et ses démarches, et on présente la notion de la méthode des éléments finis et les principaux codes de calcul (logiciels de simulation numérique) utilisés par les ingénieurs, dont l'ABAQUS qu'on a utilisé dans notre simulation y compris ses modules.

II.2. Principe de la simulation numérique

La simulation numérique est un processus consiste à créer une représentation simplifiée d'une structure à étudier, ou d'un phénomène réel ou d'une situation d'un système complexe. Cette représentation appelée modélisation, peut prendre différentes formes et se faire sous des logiciels informatiques. Ce moyen puissant permet de mieux comprendre et prédire le comportement de la structure ou du système dans de nombreux domaines scientifiques et techniques. [19].

La simulation numérique est une méthode permet de prédire les réponses de la structure ou du système à diverses charges, ou mouvements, ou contraintes. Cette approche teste virtuellement les prototypes, d'optimiser leurs conceptions et de prévenir des défaillances avant la fabrication physique. [20].

II.3. Avantages de la simulation numérique

La simulation numérique par éléments finis (MEF) présente plusieurs avantages clés dans divers domaines d'ingénierie et de recherche, à savoir. [20] :

- **Réduction des coûts** : La simulation numérique permet de tester des conceptions sans avoir besoin de fabriquer les prototypes physiques. Cela réduit considérablement les coûts liés à la production de ces prototypes, aux tests physiques et aux modifications après fabrication.
- **Gains de temps** : Elle peut être réalisée beaucoup plus rapidement quela simulation expérimentale. Cela permet d'accélérer les processus de conception, de validation et de mise sur le marché les produits.
- **Prévision du comportement** : Elle aide à prédire comment un système ou une pièce réagira sous diverses conditions de charge, température, ou autres contraintes. Cela permet de s'assurer que le produit sera fiable et performant dans des situations réelles.
- **Optimisation de la conception** : Elle offre la possibilité d'explorer une large gamme de scénarios, de modifier des paramètres et de tester différentes configurations avant de choisir la meilleure. Cela aide à optimiser les performances du produit tout en minimisant les défauts.
- **Analyse de scénarios complexes** : Elle permet de modéliser des phénomènes physiques complexes qui seraient difficiles et impossible, à analyser avec des méthodes expérimentales classiques (interactions fluide-structure, thermique électromagnétique, ...).
- **Sécurité améliorée** : Grâce à cette simulation, il est possible de tester des scénarios extrêmes, tels que les conditions de défaillance ou les événements catastrophiques, sans risquer d'exposer la sécurité des individus ou des équipements.
- **Flexibilité et itération rapide** : Il est possible de modifier rapidement les paramètres de la simulation pour tester différentes hypothèses, ce qui n'est pas possible avec des tests physiques.

- **Meilleure compréhension des comportements physiques** : Elle permet de visualiser et d'analyser des phénomènes physiques difficiles à observer directement dans la réalité.
- **Validation de conformité** : Elle permet aussi de s'assurer que les produits ou les structures respectent les normes et les réglementations de l'industrie avant leur fabrication ou leur mise en service, garantissant ainsi leur conformité avec les exigences légales et de performance.

En résumé, la simulation numérique est un outil précieux qui permet d'améliorer l'efficacité, de réduire les coûts, d'accélérer le processus de conception, et de garantir la sécurité et la fiabilité des structures ou systèmes avant leur production physique.

II.4. Principaux logiciels de simulation numérique par la MEF

Les logiciels de simulation par la méthode des éléments finis (FEM) sont largement utilisés dans de nombreux domaines tels que la mécanique, l'aéronautique, l'automobile, le génie civil, et d'autres secteurs industriels pour simuler et analyser des comportements physiques complexes. Voici quelques-uns des principaux logiciels de simulation FEM. [20] :

1. **ANSYS** : Un des leaders du marché dans le domaine de la simulation numérique, ANSYS est utilisé pour la simulation de structures, de fluides, de thermique, d'électromagnétisme, ... etc. Il propose des outils puissants pour l'analyse statique, dynamique, thermique, électromagnétique, etc.
2. **ABAQUS** : est un logiciel de simulation avancé qui est particulièrement connu pour ses capacités d'analyse non linéaire et de matériaux. Il est largement utilisé dans l'industrie automobile et aéronautique.
3. **COMSOL Multiphysics** : permet la modélisation et la simulation de phénomènes physiques couplés, tels que les interactions fluides-structures, la thermique et l'électromagnétisme. Il dispose également d'une interface de programmation de modélisation multi physique qui est très flexible.
4. **MSC Nastran**: Un autre logiciel bien établi dans le domaine de la simulation par éléments finis. MSC Nastran est utilisé pour des analyses de structures, de vibrations, de transfert thermique, de fatigue, et autres applications spécifiques comme les simulations dynamiques.
5. **Altair Hyper Works**: Un ensemble de logiciels de simulation intégrés qui offrent une plateforme pour l'analyse de structures, la mécanique des fluides, l'optimisation, etc.

Il est particulièrement apprécié dans l'industrie automobile pour sa capacité à effectuer des optimisations topologiques.

6. **Siemens NX (Unigraphics)** : C'est une suite logicielle qui permet des simulations FEM de haute qualité pour la conception de produits complexes. Il offre des outils puissants pour l'analyse structurelle, thermique, dynamique, et pour les analyses multi physiques.
7. **Open FOAM** : Bien que principalement orienté vers la simulation des fluides, il peut également être utilisé pour des simulations FEM dans des contextes plus spécifiques. Il est particulièrement adapté pour la modélisation de flux complexes et de phénomènes multi physiques.
8. **SALOME** : C'est une plateforme de simulation open-source qui permet l'intégration de plusieurs outils de simulation, y compris pour la méthode des éléments finis. Il est souvent utilisé dans la recherche académique et pour des applications industrielles spécifiques.
9. **Code_Aster** : C'est un logiciel de simulation numérique open-source développé par EDF (Électricité de France). Il est principalement utilisé pour des analyses de structures et thermomécaniques complexes.

II.5. Présentation de logiciel choisi – ABAQUS / CAE (version 6.14)

II.5.1 Définition de l'ABAQUS

L'ABAQUS est un logiciel d'analyse par éléments finis, Il est avant tout un logiciel de simulation de problèmes très variés en mécanique. Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures, Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. [21]

L'ABAQUS CAE (Complète Abaqus Environnement) offre un environnement complet pour la préparation des modèles avant l'analyse ainsi que pour l'interprétation des résultats. Il est largement utilisé dans des secteurs comme l'automobile et l'aéronautique, et il est également très apprécié dans les universités et les centres de recherche, notamment pour sa capacité à traiter des problèmes complexes et non linéaires. [22]

Nous expliquerons les étapes du processus de simulation d'analyse à l'aide du ABAQUS, depuis la 1^{ère} étape de préparation (pré-traitement) en passant par la 2^{ème} étape de réalisation de calcul et enfin la 3^{ème} étape de l'analyse et exploitation des résultats (post-traitement). Nous mettrons également en évidence les différents types de charges et de contraintes qui peuvent être analysés à l'aide du logiciel.

II.5.2 Produits ABAQUS

Le logiciel ABAQUS comprend deux principaux modules d'analyse :

ABAQUS/Standard et ABAQUS/Explicit. À ceux-ci s'ajoutent quatre modules spécialisés conçus pour des tâches spécifiques dans le cadre d'ABAQUS/Standard: ABAQUS/Aqua, ABAQUS/Design, ABAQUS/AMS et ABAQUS/Fondation. [22]

Le logiciel ABAQUS constitue la plateforme complète du logiciel. Il permet aux utilisateurs de créer des modèles, de lancer et suivre les simulations de manière interactive, puis d'analyser les résultats.

Enfin, l'ABAQUS propose des convertisseurs facilitant l'importation de géométries depuis des logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) externes (en d'hors des outils de conception intégrés à l'ordinateur), la conversion de données depuis d'autres outils de prétraitement, ainsi que l'exportation des résultats vers des logiciels de post-traitement tiers.

1. ABAQUS/Standard

L'ABAQUS/Standard est un logiciel d'analyse polyvalent utilisé pour simuler et résoudre une large gamme de problèmes techniques, qu'ils soient linéaires ou non linéaires. Il couvre des analyses statiques (comme les charges continues), dynamiques (comme les vibrations et les collisions), thermiques (comme le transfert de chaleur) et électriques (comme les interactions de champs électriques). En résumé, il aide les ingénieurs à comprendre et à anticiper le comportement de systèmes complexes dans diverses conditions opérationnelles, ce qui en fait un outil efficace pour concevoir et tester des modèles techniques avec précision. [23]

2. ABAQUS/Explicite

L'ABAQUS/Explicit est un logiciel d'analyse spécialisé qui utilise une méthode de calcul dynamique « explicite » pour simuler des phénomènes dynamiques rapides et transitoires, tels que les problèmes de collisions et

d'explosions. Ce programme se distingue par son efficacité dans la gestion de problèmes hautement complexes impliquant des changements constants dans les conditions de contact entre les composants, comme ceux rencontrés dans les processus de formage des métaux. Grâce à ces fonctionnalités, il constitue un choix idéal pour simuler des phénomènes nécessitant un suivi précis des changements instantanés, et c'est le sujet principal de ce guide complet. [23]

3. ABAQUS/CAE

L'ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs (Standard et Explicit). Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et optionnels, spécifiques à certaines applications.

L'ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

Ce logiciel aide à : [23]

- Concevoir directement la structure à analyser grâce à des outils de dessin, ou l'importer depuis d'autres logiciels de conception. Diviser le modèle en parties organisées, faciles à mailler (appliquer un Mesh).
- Ajouter des propriétés physiques et matérielles au modèle, comme définir le type de matériaux, appliquer des charges externes, ou ajuster des conditions limites (par exemple, fixer certaines parties).
- Utiliser des outils avancés pour générer un maillage précis et vérifier la qualité du modèle avant l'analyse.
- Gérer facilement les simulations (lancer l'analyse, suivre sa progression, ou l'arrêter si nécessaire).
- Visualiser et interpréter les résultats via des outils graphiques interactifs.

4. ABAQUS/Viewer

L'ABAQUS/Viewer est le module dédié à la visualisation et à l'analyse des résultats au sein de l'environnement d'ABAQUS/CAE. Ce logiciel fonctionne comme une interface visuelle interactive qui permet d'explorer facilement les données de simulation technique, qu'il s'agisse de résultats de tests de contrainte, de déformations, de chaleur, ou d'autres paramètres. Ses atouts principaux sont : [23]

- Compatibilité avec tous les types d'analyses réalisées par les autres outils ABAQUS.
- Outils avancés pour convertir les données numériques en graphiques ou modèles visuels tridimensionnels.
- Aide à l'interprétation grâce à des fonctionnalités comme :
 - Colorisation du modèle selon l'intensité des contraintes ou de la température.
 - Zoom sur les zones critiques pour une étude détaillée.
 - Comparaison des résultats de différentes analyses sur un même modèle.

5. ABAQUS/Aqua

L'ABAQUS/Aqua est un module complémentaire optionnel qui s'intègre à l'ABAQUS/Standard pour enrichir ses capacités d'analyse, notamment dans la modélisation des structures offshore géantes comme les plateformes pétrolières. Ce module permet de simuler les facteurs environnementaux qui affectent ces structures, tels que : [23]

- La puissance des vagues et la pression du vent.
- La flottabilité (interaction de la structure avec l'eau).
- D'autres effets liés aux conditions marines extrêmes.

6. ABAQUS/Design

L'ABAQUS/Design est un module complémentaire optionnel intégré à l'ABAQUS/Standard pour effectuer des analyses de sensibilité de conception. Ces analyses aident les ingénieurs à étudier comment un modèle technique est affecté par des modifications de ses dimensions ou propriétés (comme l'épaisseur ou la forme). En d'autres termes, ce logiciel facilite l'optimisation des conceptions en identifiant les facteurs ayant l'impact le plus significatif sur leurs performances. [23]

7. ABAQUS/AMS

L'ABAQUS/AMS est un module complémentaire optionnel intégré à l'ABAQUS/Standard pour améliorer l'analyse des fréquences naturelles (vibrations intrinsèques) des structures complexes, comme les ponts ou les avions. Ce module utilise un algorithme avancé appelé AMS (Sous-structuration Multi-niveaux Automatique) qui divise le modèle en parties plus petites analysées séparément, ce qui accélère les calculs et réduit les ressources informatiques nécessaires, surtout pour les modèles de grande taille.

8. ABAQUS/Fondation

L'ABAQUS/Fondation est version simplifiée de l'ABAQUS /Standard, conçue pour offrir un accès rapide et efficace aux outils d'analyse statique linéaire et dynamique de base (comme l'analyse des contraintes dans les structures fixes ou l'étude des vibrations simples). C'est une option idéale pour les projets ne nécessitant pas d'analyse complexe (non linéaires), réduisant ainsi les coûts de calcul et accélérant l'obtention de résultats dans des cas tels que :[23]

- L'analyse des bâtiments sous charges statiques.
- L'étude de la stabilité des ponts sous l'effet du vent.
- La modélisation de systèmes mécaniques à mouvement répétitif

II.5.3 Etapes d'analyse par l'ABAQUS

L'analyse complète avec ABAQUS se déroule généralement en 03 étapes clés :

1. Phase de préparation d'ABAQUS

C'est une phase de pré-traitement, ici la construction du modèle mathématique du problème physique à analyser, par exemple une pièce mécanique, une structure architecturale, ... etc.

Il est nécessaire l'utilisation de :

- L'interface visuelle ABAQUS pour dessiner le modèle et définir ses propriétés matériaux, charges, conditions de fixation).
- D'autres logiciels de conception (comme AutoCAD) pour importer un modèle prêt à l'emploi.
- Un éditeur de texte (comme Notepad) pour écrire directement le fichier d'entrée dans des cas simples.

Exemple pratique : Pour l'analyse d'un pont, on définit ici ses dimensions, le type du matériau utilisé et les charges prévues dues au trafic.

2. Phase de simulation (ABAQUS/Explicit)

C'est à cette étape que la simulation dynamique est exécutée : le logiciel résout les équations mathématiques complexes basées sur le modèle préparé. Cette phase s'exécute généralement en arrière-plan (sans surveillance directe) et génère des fichiers contenant des résultats tels que :

- Les déplacements (quelle est l'amplitude du mouvement des parties ?).
- Les contraintes (où les forces se concentrent-elles ?).

La durée de la simulation dépend de la complexité du modèle et de la puissance de l'ordinateur, elle peut varier de quelques secondes à plusieurs jours !

Exemple pratique : Une simulation de collision de voiture peut prendre des heures en raison des détails des déformations instantanées.

3. Phase d'analyse des résultats (ABAQUS/Viewer)

C'est une phase d'extraction et visualisation des données pour comprendre le comportement du modèle (ex. : répartition des contraintes ou des déformations).

Une fois la simulation terminée (ou pendant son exécution), on peut explorer les résultats à l'aide d'outils visuels interactifs tels que :

- Des cartes de couleurs pour identifier les zones de contraintes élevées.
- Des animations vidéo pour observer le mouvement du modèle pendant l'événement (comme l'effondrement d'une structure).
- Des graphiques (X-Y) pour comparer les données et évaluer les performances.

Exemple pratique : Dans l'analyse d'une explosion, les cartes de couleurs révèlent les zones les plus vulnérables de la structure.

II.5.4 Symboles des unités utilisées dans l'ABAQUS

L'ABAQUS ne gère pas les unités : c'est à l'utilisateur d'utiliser un système d'unités cohérent, et sont indiquées pour la valeur à donner sur les types de charge comme suit : [24]

Tableau II-1 : Symboles et unités utilisés dans ABAQUS. [24]

Quantité	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Longueur	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Masse	kg	tonne (10^3 kg)	slug	$\text{lbf s}^2 / \text{in}$
Temps	s	s	s	s
Contrainte	Pa (N / m^2)	MPa (N / mm^2)	lbf / ft^2	Psi (lbf / in^2)
Energie	J	mJ (10^{-3} J)	ft lbf	in lbf
Masse volumique	kg / m^3	tonne / mm^3	slug / ft^3	$\text{lbf s}^2 / \text{in}^4$

II.6. Modélisation de la poutre métallique sur ABAQUS

II.6.1 Organisation de l'interface ABAQUS

Il est important de savoir que l'ABAQUS (figure II.1), est utilisé pour faire la modélisation du modèle à étudier et créer le jeu de données qui est relativement récent (quelques années) et qu'il est plutôt destiné à la mise des données de problèmes relativement classiques.

Dans l'ABAQUS pas toutes les commandes utilisables, et est fait souvent le choix de paramètres par défaut [25].

II.6.2 Passage successif dans les modules

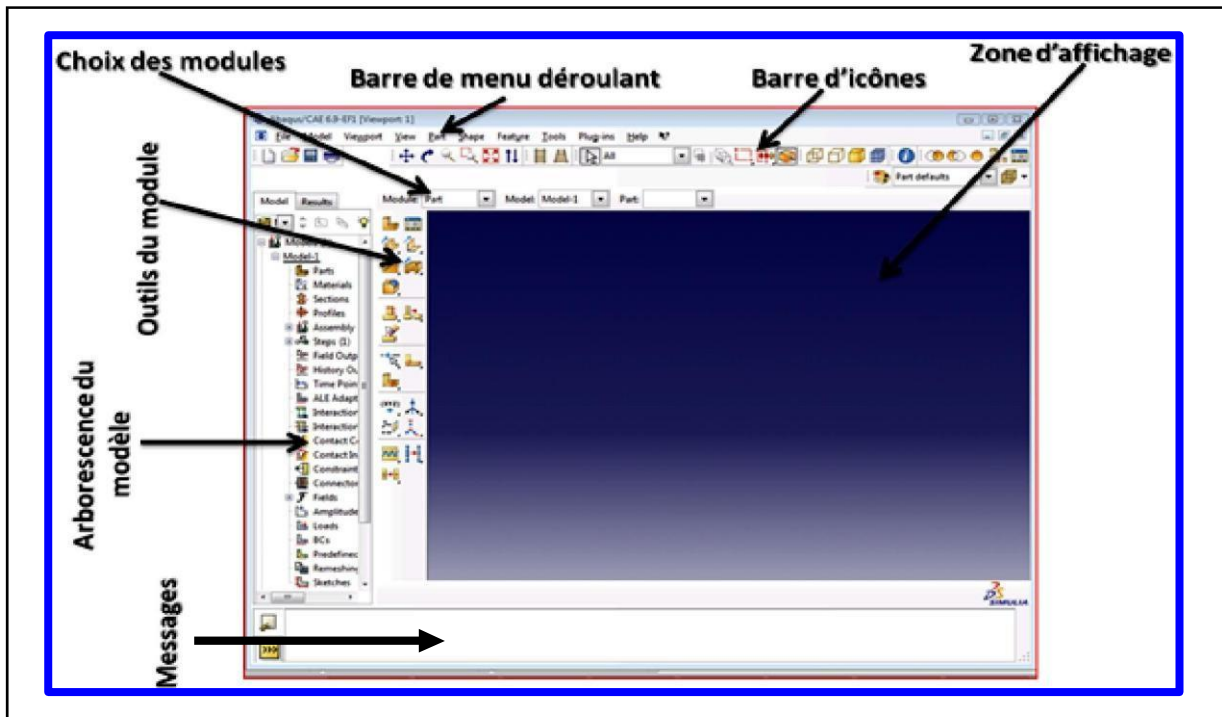


Figure II.1 : Interface utilisateur du logiciel ABAQUS/CAE.

La réalisation d'une simulation numérique sous ABAQUS se fait par la création complète d'un jeu de données, qui s'effectue après un passage successif dans les modules, figure II.2.

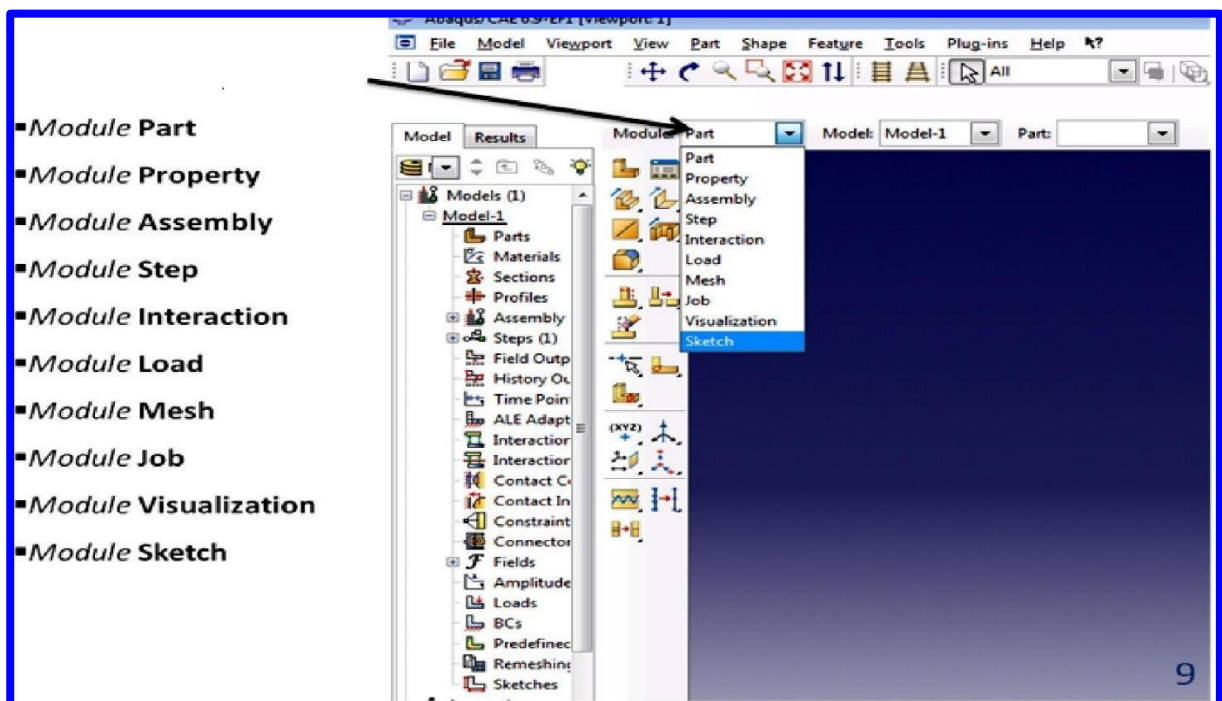
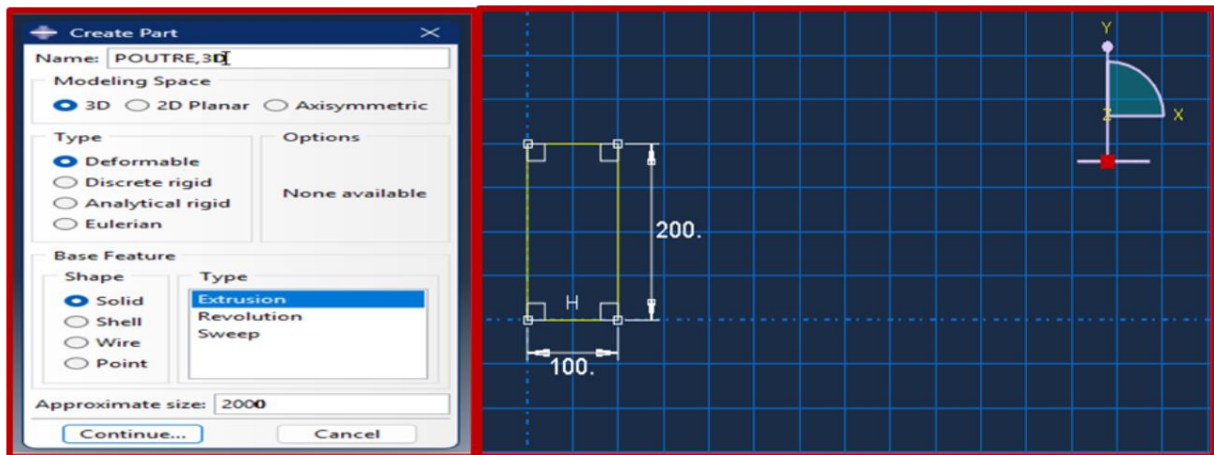


Figure II.2 : Création et mise de données du modèle

II.6.3 Etude de la première étape

1. Module Part

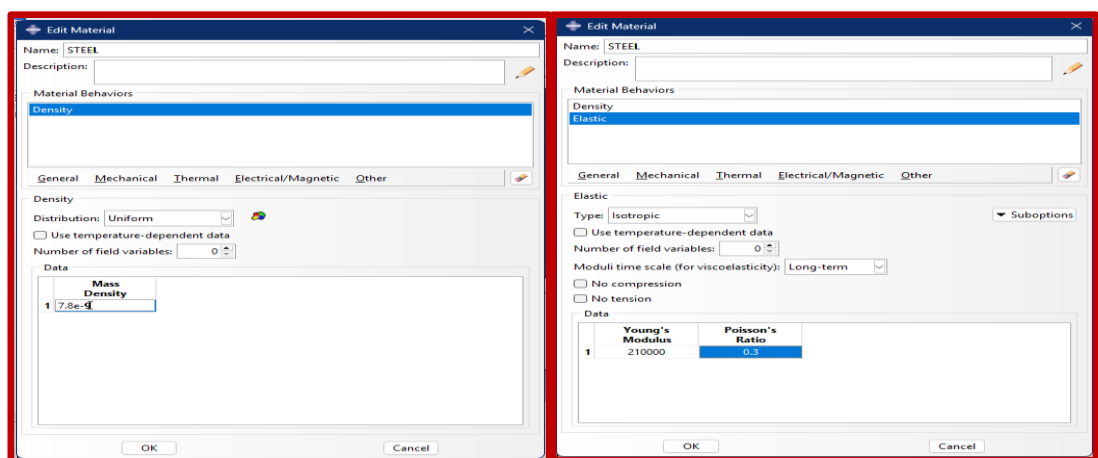
Ce module définit la géométrie et les entités du modèle à étudier dans l'ABAQUS, on a créé notre poutre métallique 3D par le choix de la géométrie appropriée et la collection du profilé de type solide, avec les dimensions d'une longueur $L = 1000\text{mm}$ et d'une section ($H : 200\text{mm} \times B : 100\text{mm}$), figures II.3.



Figures II.3 : Dimension de la section de la poutre métallique étudiée

2. Module Property

Ce module définit les propriétés de la poutre : le matériau utilisé et ses propriétés mécaniques relatives au modèle à étudier. On a choisi dans cette première étape l'acier S235 et ses propriétés mécaniques (Densité "D", Module de Young "E" et Coefficient de poisson "v"), figures II.4.



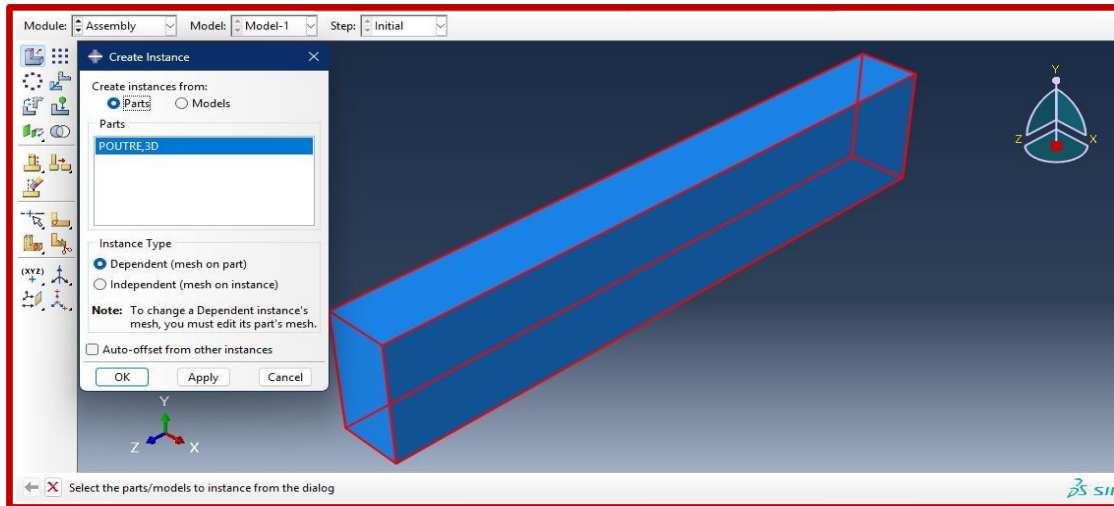
Density

Elastic

Figures II.4 : Les propriétés mécaniques de la poutre

3. Module Assembly

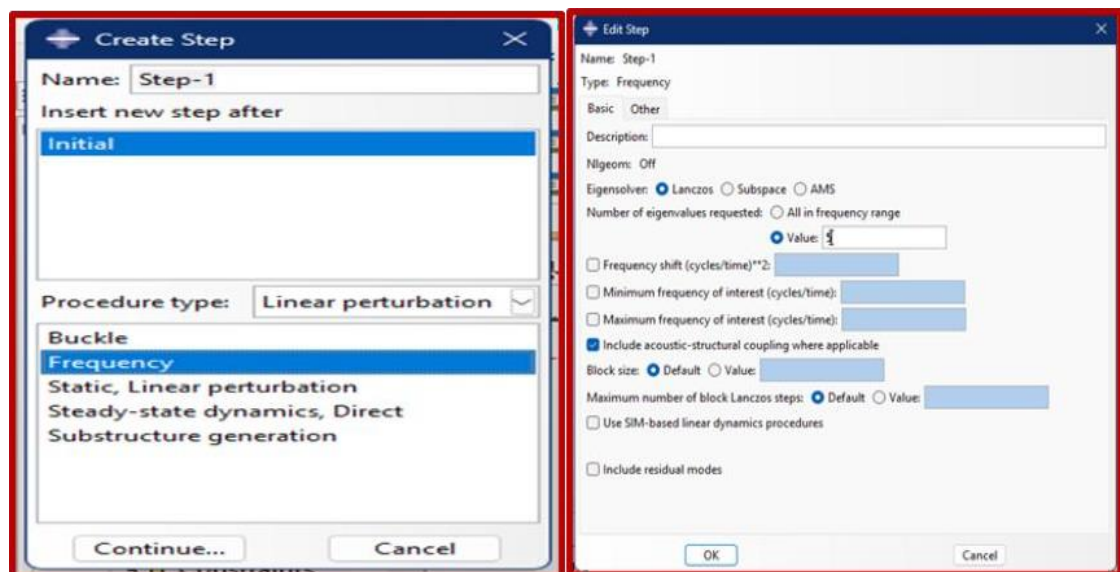
Ce module définit la création d'assemblage des éléments de la poutre, figures II.5.



Figures II.5 : Création d'assemblage des éléments de la poutre.

4. Module Step :

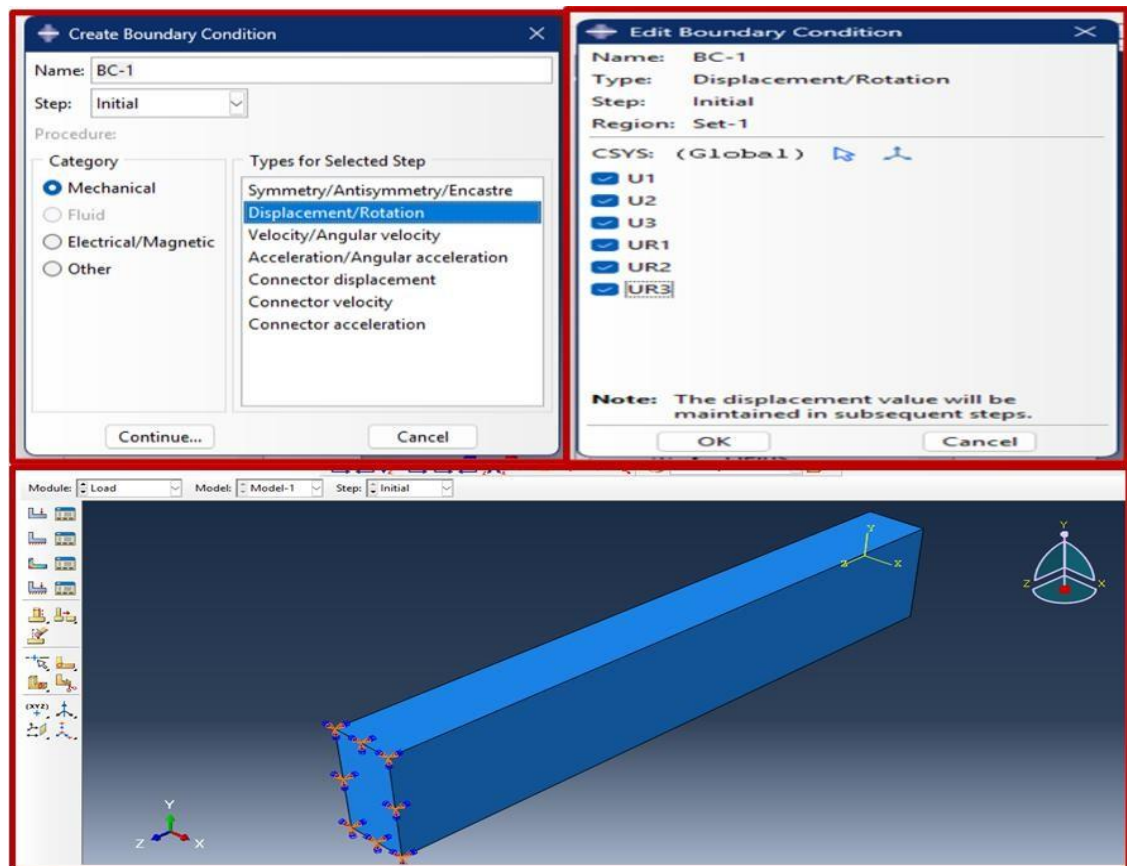
Dans ce module on a créé une étape (Step) de calcul de type "Linear Perturbation – Frequency", le nombre de modes à extraire (03 modes) et la méthode Lanczo qui est préférée dans l'analyse modale, figures II.6



Figures II.6 : Type de Step de la poutre

5. Module Load

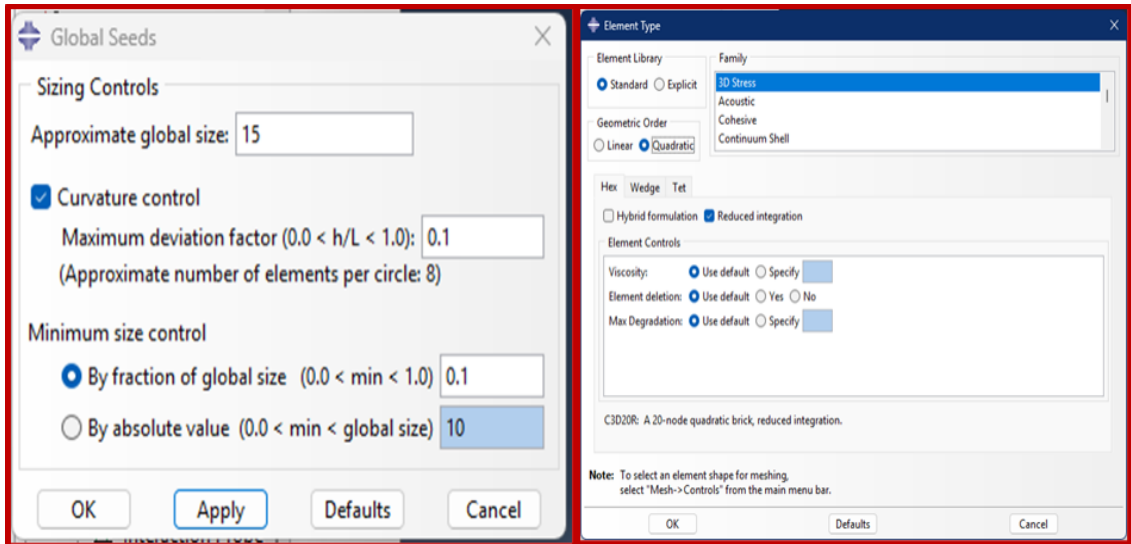
Ce module définit les conditions aux limites de la poutre, notre poutre est en encastrement à l'un de ses extrémités, figures II.7



Figures II.7 : les conditions aux limites de la poutre

6. Module Mesh

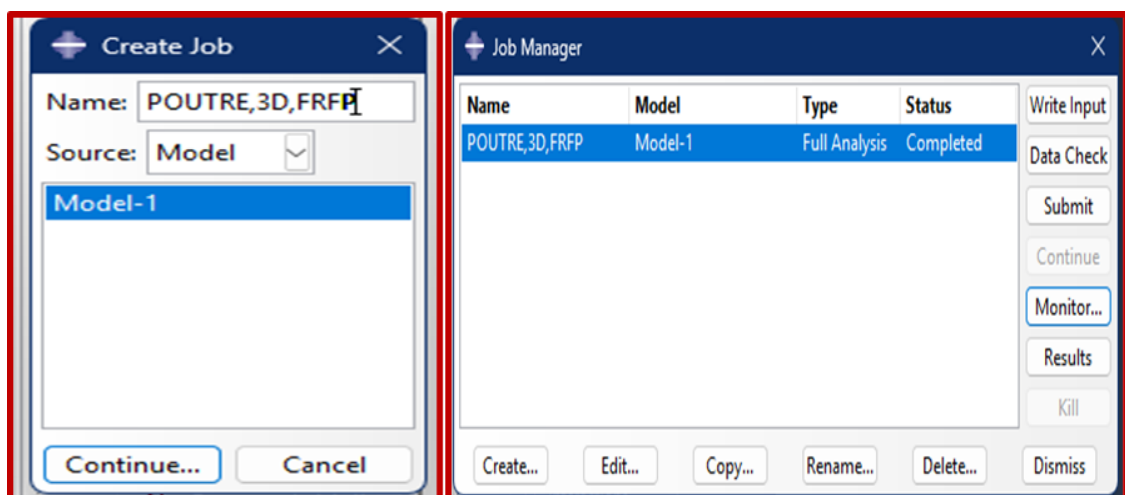
Ce module définit la taille et le type de maillage des éléments de la poutre, figures II.8.



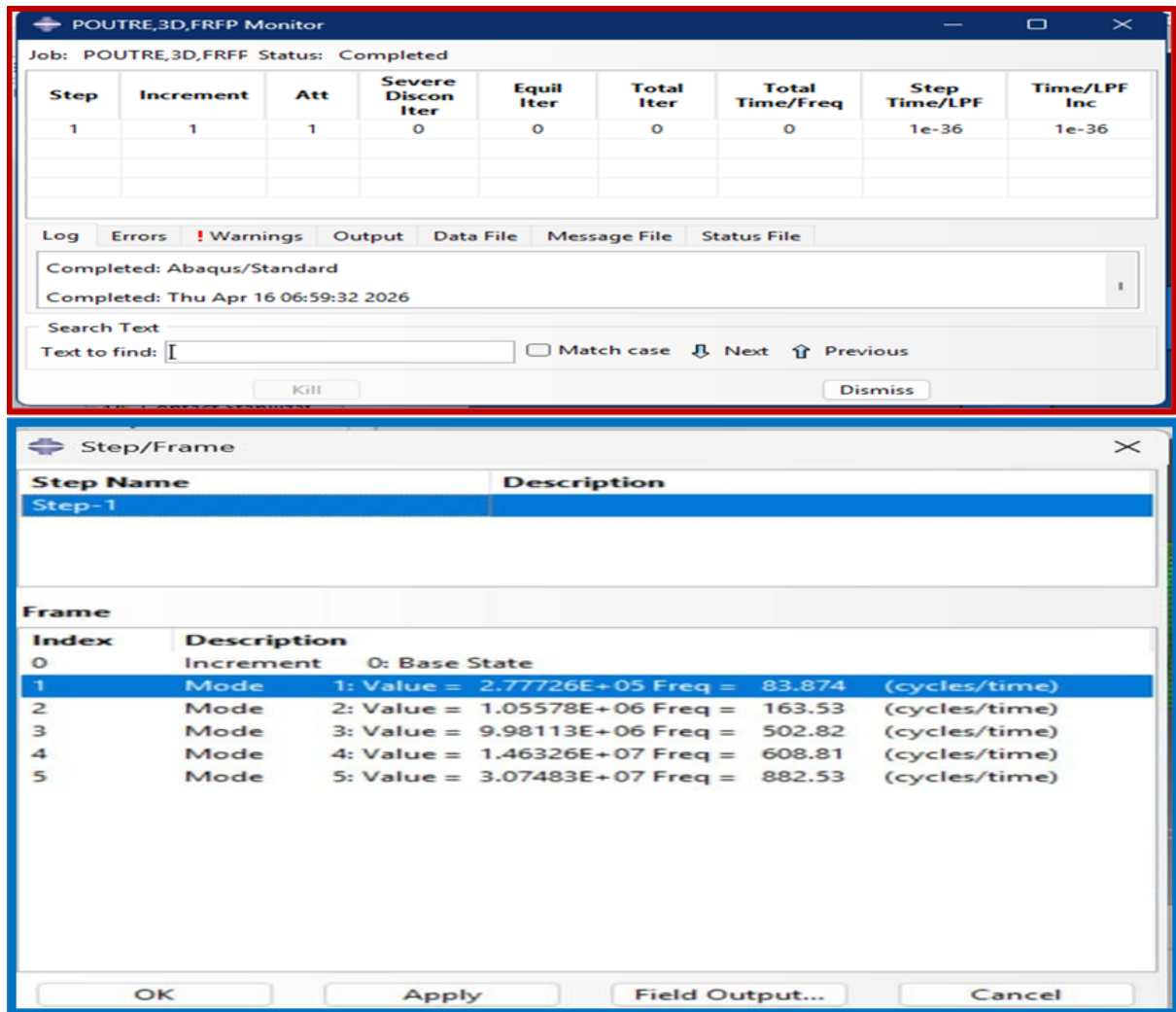
Figures II.8 : Type de maillage des éléments de la poutre

7. Module Job

Le rôle de ce module est de soumettre le calcul, afficher les résultats et visualiser les fréquences propres (Hz) et les modes propres associés de la poutre, figures II.9 et figures II.10.



Figures II.9 : Etape du module de Job



Figures II.10 : Calculs effectués

Les résultats de calcul correspondants ci-dessus et ceux de la deuxième étape qui consiste sur l'étude de l'influence de la variation des dimensions et de la variation des propriétés mécaniques du métal de la poutre sur ses fréquences naturelles et ses modes propres associés sont représentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

Résultats

III.1 Introduction

■ Présentation du modèle de poutre étudiée

Notre étude est consacrée sur l'analyse modale par modélisation numérique par la méthode des éléments finis sous le code de calcul ABAQUS d'une poutre métallique encastrée à l'une de ses extrémités et libre à l'autre, comme montre la figure III.1.

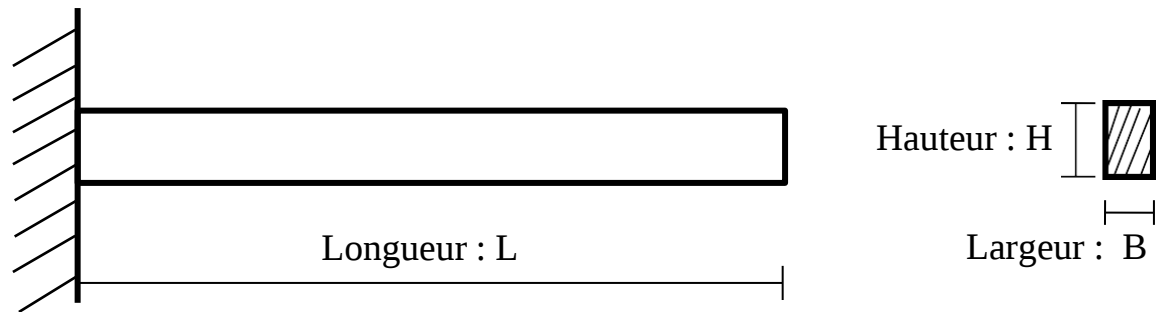


Figure III.1 : Schéma de présentation du modèle de poutre étudiée.

■ Propriétés mécaniques des métaux choisis

On a choisi les métaux indiqués dans le tableau ci-dessous leurs propriétés mécaniques sont comme suit :

Tableau III.1 : Différent métaux utilisés dans le modèle de poutre étudiée

Métal	Densité "D" tonne/mm ³	Module de Young "E" N/mm ²	Coefficient de poisson "v"
Acier (nuance standard)S 235	7,80x10 ⁻⁹	210000	0.3
AcierInoxydable304L	8,0x10 ⁻⁹	200000	0.3
Aluminium6061-T6	2,7x10 ⁻⁹	70000	0.3

Dans ce chapitre, et dans la première étape d'analyse nous avons calculé les 03 premières fréquences propres et identifié les modes propres associés de la poutre en acier S235 d'une longueur $L = 1000\text{mm}$ et d'une section (hauteur $H : 200\text{mm}$ x largeur $B : 100\text{mm}$) = 20000 mm^2 par la simulation numérique sur le logiciel Abaqus, figure III.2.

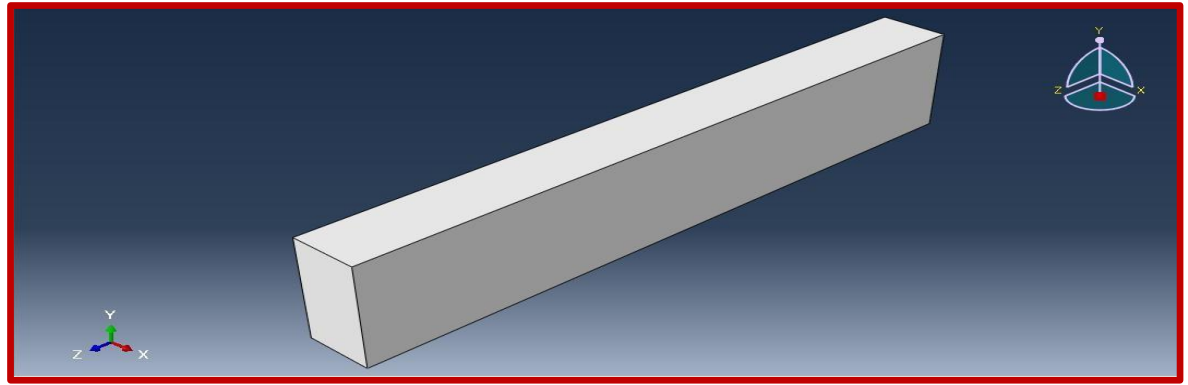
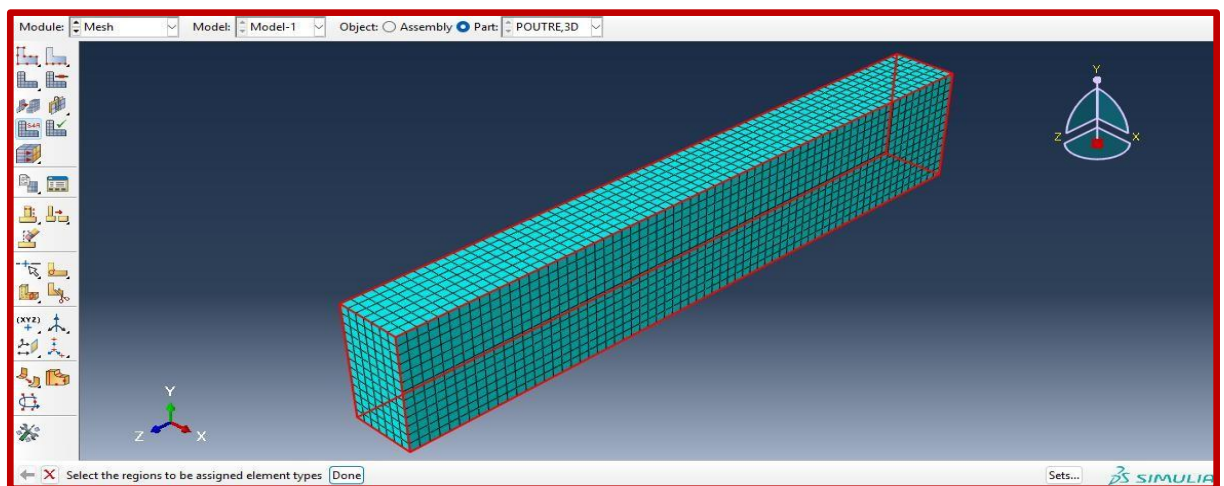


Figure III.2 : Modèle de la poutre métallique étudiée

III.2 Conditions aux limites et Maillage

On a appliqué le modèle de poutre métallique encastree à l'un de ses extrémités et libre à l'autre, et on a adopté un maillage standard quadratique pour obtenir des fréquences propres précises, comme montre la figure III.3.



Figures III.3 : Type de maillage des éléments de la poutre

III.3 Fréquences naturelles obtenues

Les 03 premières fréquences propres obtenues sont :

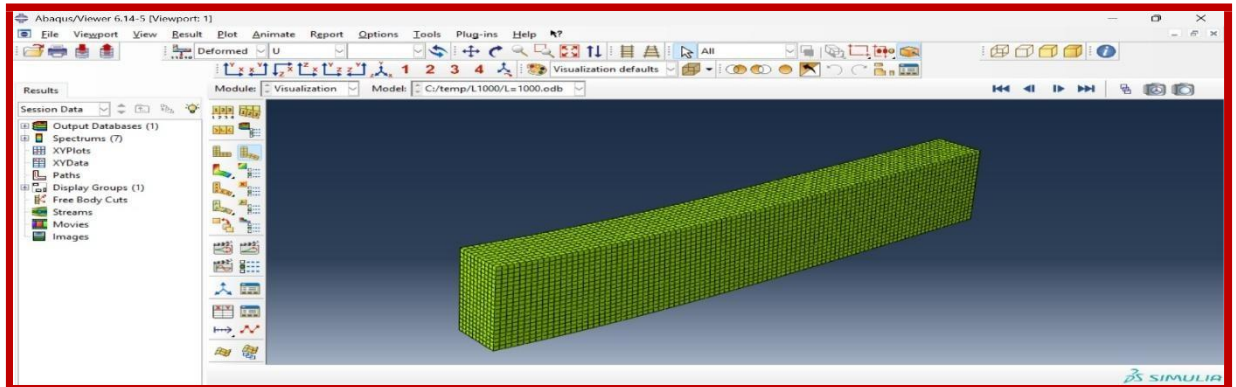
$$f1 = 83.874 \text{ Hz} , \quad f2 = 163.53 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad f3 = 502.82 \text{ Hz}$$

On remarque que les fréquences naturelles résultantes sont classées en ordre croissant à partir de $f1$ jusqu'à $f3$. La première fréquence $f1$ est la plus basse et s'appelle la fréquence fondamentale. Voici pourquoi elle est très importante :

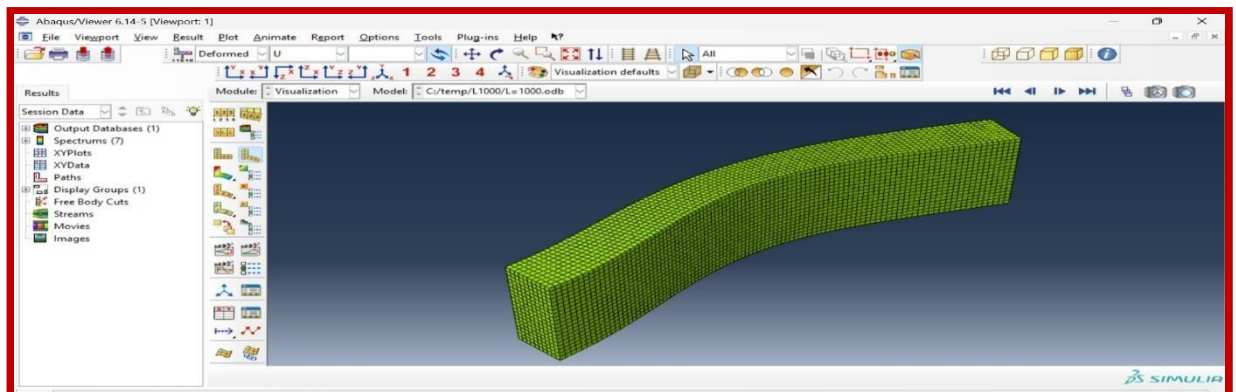
Considérée le risque maximal de résonance : est généralement demande la plus faible énergie pour faire vibrer la poutre, est donc la plus facile à engendrée par des forces externes (moteurs, vent, séismes). Si cette fréquence coïncide avec une fréquence d'excitation, la poutre peut vibrer de manière excessive, entraînant une fatigue rapide ou une défaillance structurale.

III.4 Modes propres obtenues

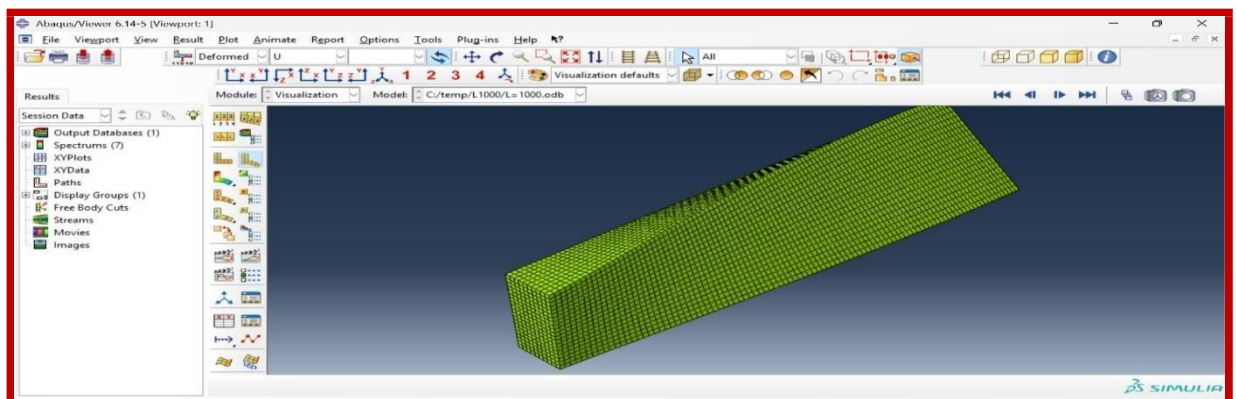
Les 03 premiers modes propres résultants sont présentés dans les figures III.4 :



Premier mode propre



Deuxième mode propre



Troisième mode propre

Figures III.4 : Les modes propres obtenus

Le premier mode propre est caractérisé par la déformation la plus simple et s'appelle le mode fondamental, est correspond à la fréquence fondamentale, ce mode représente la rigidité minimale (grande souplesse) et la déformée moins rigide et la plus simple de la poutre.

Ensuite, dans la deuxième étape on a étudié l'influence de la variation des dimensions de la poutre et l'effet de la variation des propriétés mécaniques du métal sur les fréquences propres et les modes propres associés de la poutre.

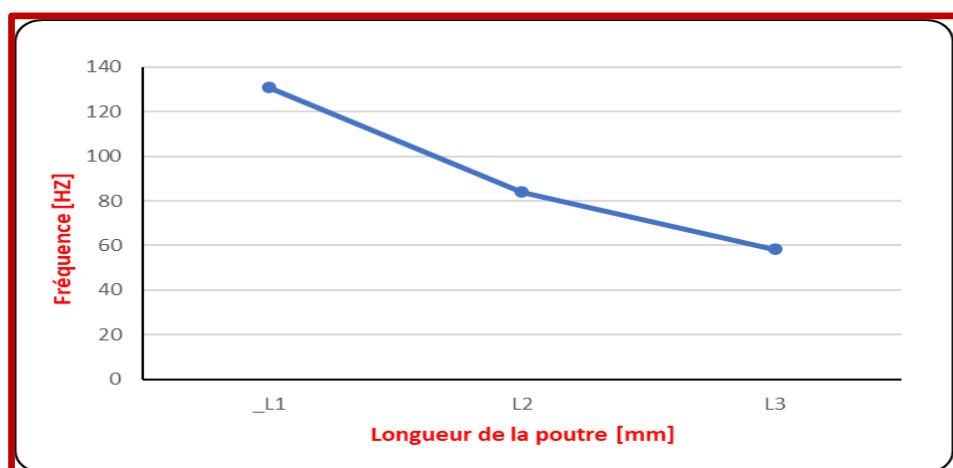
On a repris le même modèle, mais cette fois-ci avec des longueurs différentes de la poutre $L1 = 800\text{mm}$, $L2 = 1000\text{mm}$ et $L3 = 1200\text{mm}$.

III.5 Influence de la variation de la longueur

On a suivi la variation des fréquences $f1$, $f2$ et $f3$ pour les 03 cas choisis ci-dessus de la longueur, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau III.2 : Influence de la variation de la longueur sur les fréquences propres

Longueur de la poutre	Fréquences propres résultantes [Hz]		
	$f1$	$f2$	$f3$
$L1 = 800\text{mm}$	130.74	251.76	765.11
$L2 = 1000\text{mm}$	83.874	163.53	502.82
$L3 = 1200\text{mm}$	58.307	114.49	354.14



Figures III.5 : Influence de la variation de la longueur sur les fréquences naturelles

On remarque clairement que lorsque la longueur de la poutre croisse entraîne à une diminution dans ses fréquences naturelles.

III.6 Influence de la variation de la section

Cette fois-ci on a varié la section de la poutre comme suit :

$$S1 = (H1: 100\text{mm} \times B1: 50\text{mm}) = 5000 \text{ mm}^2,$$

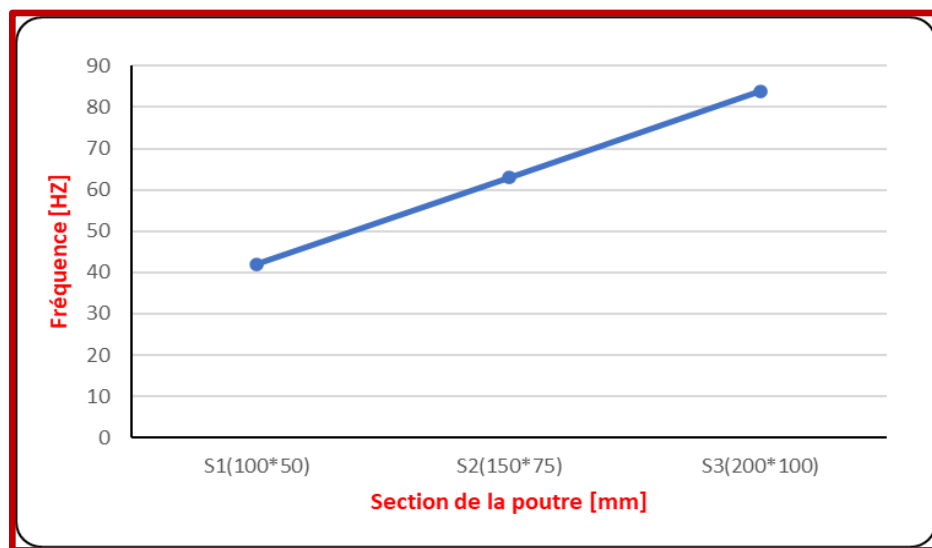
$$S2 = (H2: 150\text{mm} \times B2: 75\text{mm}) = 11250 \text{ mm}^2,$$

$$S3 = (H1: 200\text{mm} \times B1: 100\text{mm}) = 20000 \text{ mm}^2.$$

On a suivi la variation des fréquences ***f1, f2 et f3*** pour les 03 cas choisis ci-dessus de la section, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Influence de la variation de la section sur les fréquences naturelles

Section de la poutre	Fréquences propres résultantes [Hz]		
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f3</i>
S1 = 5000 mm ²	42.017	83.418	260.30
S2 = 11250 mm ²	62.998	124.10	384.84
S3 = 20000 mm ²	83.874	163.53	502.82



Figures III.6 : Influence de la variation de la section sur les fréquences naturelles

On observe que l'augmentation des dimensions de la section transversale de la poutre induit un durcissement structurel, ce qui conduit à une augmentation de ses fréquences naturelles.

III.7 Influence de la variation des propriétés mécaniques

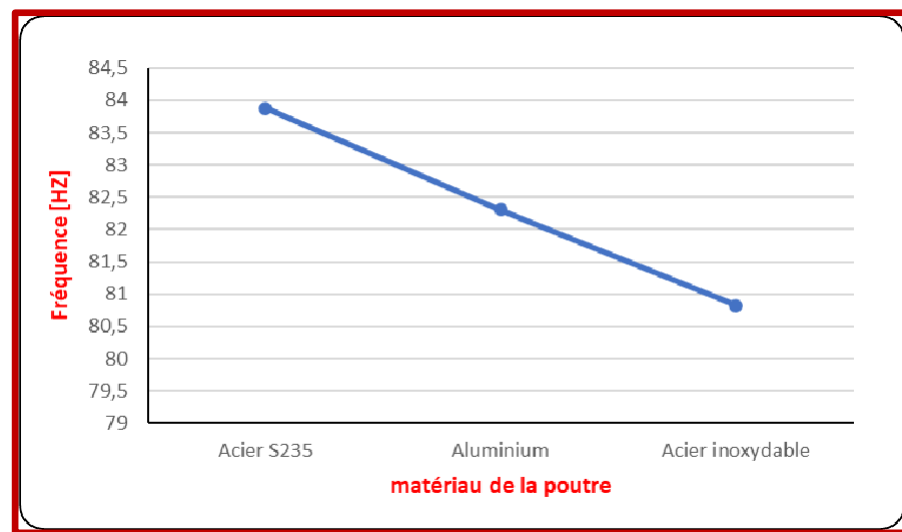
Pour les mêmes dimensions de référence, la longueur $L = 1000\text{mm}$ et la section ($H : 200\text{mm} \times B : 100\text{mm}$) = 20000mm^2 , on a essayé de varier les propriétés mécaniques du métal de la poutre selon les 03 cas choisis suivant :

M1 : Acier S235, M2 : Acier Inoxydable 304L et M3 : Aluminium 6061-T6.

Les résultats obtenus sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Influence de la variation des propriétés mécaniques sur les fréquences naturelles

Métal de la poutre	Fréquences propres résultantes [Hz]		
	$f1$	$f2$	$f3$
Acier (standard) S235	83.874	163.53	502.82
Aluminium 6061-T6	82.306	160.48	493.42
Acier Inoxydable 304L	80.823	157.59	484.53



Figures III.7 : Influence de la variation des propriétés mécaniques sur les fréquences naturelles

On remarque que la poutre en aluminium vibre plus rapide que celle en acier inoxydable, ce qui se traduit par sa fréquence naturelle plus élevée résultant par sa plus faible masse.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En conclusion, cette étude nous a mis en lumière l'importance cruciale de l'analyse modale pour déterminer avec précision les fréquences naturelles et les modes propres de vibration d'une poutre métallique à l'aide de la modélisation numérique par la méthode des éléments finis sous le code de calcul ABAQUS.

Cette analyse est indispensable et offre une base solide pour optimiser la conception structurelle de la poutre et garantir sa stabilité face aux vibrations externes, et aussi prédire les défaillances critiques et les résonances.

En ressort de cette étude, les points suivants peuvent être retenus :

- ✓ L'étude a démontré que les fréquences naturelles obtenues sont exprimées en Hertz (Hz) auxquelles la poutre a tendance à vibrer naturellement, et visualiser comment cette structure se déforme à chaque fréquence propre (flexion, torsion, extension). Cela permet d'identifier les zones faibles (fortes déformations) nécessitant un renforcement.
- ✓ On peut affirmer que le risque de résonance se produit lorsqu'une excitation externe de la poutre (vibrations d'un moteur, ...etc.) possède une fréquence proche de l'une des fréquences naturelles calculées, notamment la fondamentale, ce qui peut mener à des déformations excessives ou à une rupture. Il est recommandé de maintenir une marge d'au moins 25% entre la fréquence naturelle et la fréquence d'excitatrice afin de réduire le risque de résonance.
- ✓ On conclut souvent sur la nécessité de l'optimisation de la conception de la poutre par la modification de sa rigidité, ou sa masse, ou ses dimensions pour décaler ses fréquences propres hors des plages d'utilisation.
- ✓ Influence des dimensions: l'accroissance de la longueur baisse les fréquences (assouplit la poutre), tandis que l'augmentation de la section transversale hausse les fréquences (raidit la poutre).
- ✓ Influence de la rigidité et de la masse: une plus grande rigidité accroît les fréquences, tandis qu'une plus grande masse diminue les fréquences.
- ✓ Influence des conditions aux limites: les fréquences propres varient considérablement selon que la poutre est encastree ou libre.

Bibliographie

Bibliographie

CHAPITRE I : Généralités sur la vibration des structures

- [1] Studysmarter.de. "Plateforme Studysmarter.de." <https://www.studysmarter.fr> (accessed Jan. 26, 2026).
- [2] H. Khelouati and S. Medjahed, "Analyse Modale Expérimentale d'une Structure (Poutre Libre-Libre)," Master's thesis, Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naama, Algeria, 2020.
- [3] M. N. Bouchareb, "Analyse modale d'une poutre encastré-libre," Master's thesis, Université Badji Mokhtar de Annaba, Algeria, 2017.
- [4] A. Benhammou, "Réalisation d'un banc de vibration uni-axial des plaques," Master's thesis, Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, Algeria, 2021.
- [5] H. Merzoug, "Cours Diagnostic Des Analyses Vibratoires," Course notes, Université de Ghardaïa, Algeria, 2020.
- [6] I. Ichroufene and L. Boudjahroune, "Etude vibratoire non linéaire en dynamique des structures," Master's thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algeria, 2013.
- [7] Université Badji Mokhtar Annaba, "Document sur les vibrations (PDF)," online document, <https://dspace.univ-annaba.dz> (accessed Feb. 10, 2026).
- [8] A. A. Djoumikh, "Etude du comportement vibratoire des structures par la MEF," Master's thesis, Université Ziane Achour de Djelfa, Algeria, 2017.
- [9] M. A. N. Nadji and I. Riguet, "Diagnostic des défauts du moteur asynchrone dans le domaine temporel," Master's thesis, Université Mohamed Khider de Biskra, Algeria, 2020.
- [10] N. D. T. Baara, "Analyse vibratoire des défaillances mécaniques," Master's thesis, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Algeria, 2018.
- [11] M. Abdous, "Comparaison des méthodes de modélisation des fissures des structures mécaniques vibrantes," Master's thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algeria, 2017.
- [12] A. Zitouni and M. Ourzane, "Etude comparative des indicateurs scalaires utilisés dans le diagnostic des machines tournantes," Master's thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algeria, 2022.
- [13] Futura Sciences, "FUTURA le média qui explique le monde," <https://www.futura-sciences.com> (accessed Mar. 4, 2026).
- [14] N. Frihi (née Khaldi), "Polycopié du cours, Charpente métallique I," Course notes, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Algeria, 2022.

Bibliographie

- [15] A. Achour, "Support de Cours Structures Métalliques," Course notes, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Algeria, 2025.
- [16] Initube.es, "Initube.es Spécialiste in 3D tubes et profiles cutting," <https://initube.es/fr/> (accessed Mar. 8, 2026).
- [17] HTS-ALU, "HTS – ALU," <https://hts-alu.com> (accessed Mar. 8, 2026).

CHAPITRE II : Modélisation numérique par la méthode des éléments finis

- [18] A. Seghir, "Chapitre 3 des Cours (2005-2014) Méthode des Éléments Finis," Course notes, Université A. Mira de Béjaia, Algeria.
- [19] Futura Sciences, "Définition : Modélisation," <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/sciences-modelisation-11321> (accessed Mar. 4, 2026).
- [20] A. Y. Miloudi, "Etude de la simulation numérique du comportement mécanique d'un support soudé," Master's thesis, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Algeria, 2025.
- [21] M. Manjunath, *Finite-Element Project ABAQUS Tutorial*, 2009.
- [22] N. E. Eddali and A. Z. Bouhadda, "Effet d'un défaut de différente position sur les états de contraintes mécaniques," Master's thesis, Université de Ghardaïa, Algeria, 2025.
- [23] ABAQUS, Inc., *Getting started with ABAQUS/Standard: Keywords version (v6.6)*, 2006.
- [24] N. Daoudi and G. Boukharda, "Etude du comportement de poutres métalliques comportant une ouverture dans les âmes," Master's thesis, Université Badji Mokhtar de Annaba, Algeria, 2019.
- [25] A. Bouleftour, "Evaluation d'éléments finis volumiques dans Abaqus sur des cas tests non linéaires géométriques," Master's thesis, Université de Biskra, Algeria, 2014.



غرداية في : 2026/07/06

شهادة ترخيص بالتصحيح و الايداع

أنا الأستاذ(ة): بلاغيت عبد الحاكم

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج ماستر العنونة بـ:

Analyse modale et fréquences naturelles d'une poutre en vibration

من إنجاز الطلبة:

حاته بكير

شعلان داود

التي نوقشت/قيمت بتاريخ: 2026/06/14

أشهد أن الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم



امضاء المسؤول عن التصحيح