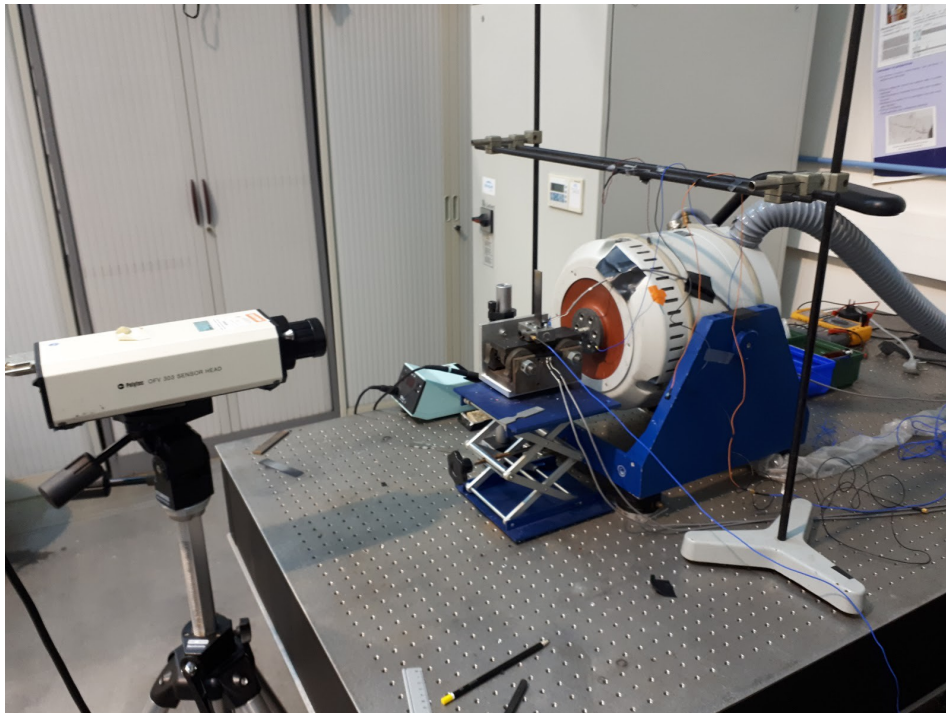


Détection des dommages par analyse vibratoire



Etudiants :

Léo COURVAL

Jeanne DIONISI

Santiago GONZALEZ

Maxence POIRIER

Raphaël PLICHTA

Pierre SICARD

Enseignant-responsable du projet :

Leila KHALIJ

Date de remise du rapport : **17/06/2019**

Référence du projet : **STPI/P6/2019 – 036**

Intitulé du projet : **Détection des dommages par analyse vibratoire**

Type de projet : **Biblio/Expérience/Mesures/Dépouillement**

Objectifs du projet :

Le but du projet est de déterminer les caractéristiques qui témoignent de la présence de dommages sur un système, grâce à l'analyse vibratoire. Pour mettre en œuvre cette technique, on effectue des mesures sur des éprouvettes saines et endommagées. Comparer les mesures sur les éprouvettes endommagées à celles sur les saines permettra de connaître ces caractéristiques importantes à surveiller sur les machines utilisées en industries, afin d'éviter quelque défaillance.

Mots-clefs du projet :

Vibration

Domage

Éprouvettes

Détection

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3. Travail réalisé et résultats.....	8
3.1. Les différentes techniques de détection des dommages.....	8
3.1.1. Analyse vibratoire.....	8
3.1.2. Analyse acoustique.....	9
3.1.3. Thermographie.....	9
3.1.4. Ressuage.....	9
3.1.5. Stéréo-corrélation.....	10
3.1.6. Radiographie.....	10
3.1.7. Courants de Foucault.....	10
3.2. Comportement d'une poutre.....	11
3.2.1. Principe de détection des dommages par analyse vibratoire.....	11
3.2.2. Application de l'analyse vibratoire.....	11
3.3. Détection de dommages sur éprouvettes.....	13
3.3.1. Présentation des manipulations.....	13
3.3.2. Recherche des fréquences de résonances théoriques.....	14
3.3.3. Expériences pratiques.....	16
4. Conclusions et perspectives.....	19
5. Bibliographie.....	20
6. Annexes.....	22
6.1. Résultats.....	22
6.2. Listings des programmes réalisés.....	22
6.2.1. Programme Ansys.....	22
6.2.2. Programme Matlab.....	24

NOTATIONS, ACRONYMES

Accéléromètre : capteur qui mesure l'accélération linéaire.

Capteur piézo-électrique : capteur qui se polarise électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique.

CND : contrôle non-destructif.

Défaut : imperfection matérielle.

Degré de liberté : nombre de possibilités de mouvement dans l'espace.

Domage : dégât matériel causé.

Fonction de transfert : modèle mathématique qui relie l'entrée et la sortie d'un système linéaire.

Fréquence de résonance : fréquence maximale atteinte.

Module d'Young : constante qui fait le lien entre la contrainte et la déformation d'un matériau. Le matériau doit être élastique et isotrope.

Principe fondamental de la statique : énonce les conditions d'équilibre d'un solide indéformable dans un référentiel donné.

Résonance : phénomène qui a lieu lorsque le système est sensible aux fréquences subies.

Signature vibratoire : spectre de fréquences, qui est propre à chaque machine ou matériau.

Vibromètre : capteur qui mesure les vibrations.

1. INTRODUCTION

La détection de dommages est très importante dans l'industrie. Elle permet de contrôler la qualité des pièces et de localiser ses défauts. Le principal avantage d'un tel contrôle réside dans le fait que la structure de la pièce à contrôler ne subit aucune modification. Ces méthodes de détection des dommages sont ainsi appelées Contrôle Non Destructif (CND) et regroupent une multitude de techniques différentes comme par exemple : l'analyse par ultrason, le ressuage, la radiographie... Nous nous sommes, durant notre étude, concentrés sur une technique de détection des dommages par analyse vibratoire.

Le principe de détection de dommages par analyse vibratoire est le suivant : On commence par exciter la pièce à tester avec une onde électromagnétique, une vibration, ou encore un champ magnétique. Ensuite, une fois que la perturbation a été transmise, on recueille la réponse de la pièce, c'est-à-dire que nous cherchons à détecter les anomalies contenues dans la pièce. Ces anomalies seront révélées à l'œil nu, ou grâce à des capteurs ou encore avec un système d'imagerie.

Le contrôle non destructif est capital pour des industries de fabrication qui doivent contrôler la qualité des pièces fabriquées. Par exemple, on utilise largement les méthodes de CND dans de nombreux domaines d'applications tels que le génie civil, l'aéronautique civile, la métallurgie, les gazoducs, les plates-formes off-shore... Et en règle générale dans tous les secteurs produisant des pièces dont les coûts de production sont élevés, et produites en faible quantité. Ces contrôles sont réalisés soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances.

Aujourd'hui, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre, mais il ne suffit plus de localiser un défaut, il faut aussi le caractériser et le dimensionner. Ainsi il faut imaginer de nouvelles techniques et procédés non destructifs capable de mettre en évidence des défauts physiques complexes. Durant ces dernières années nous assistons au développement de techniques de CND qui ne peuvent pas être mises en œuvre sans de puissants outils de traitement informatique. On assiste alors au développement de méthodes plus précises mais aussi plus rapide, ce qui permet de contrôler les pièces plus rapidement et d'augmenter les débits du contrôle.

Nous allons donc, à travers ce projet, mettre en place la méthode de l'analyse vibratoire et essayer de détecter des dommages sur des éprouvettes.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin de réaliser ce projet, nous avons organisé nos séances selon quatre axes majeurs :

Tout d'abord, nous nous sommes occupés des recherches concernant les différentes méthodes qui permettent de détecter les dommages dans un matériau. Nous n'avons pas pu synthétiser toutes les méthodes existantes, mais nous avons pu voir les principales, notamment l'analyse vibratoire et l'analyse acoustique.

Ensuite, pour bien comprendre le principe de l'analyse vibratoire, nous avons réalisé la modélisation d'une poutre. Grâce à ce TP, nous avons pu voir les différentes fréquences propres sur une éprouvette saine. De plus, nous avons pu nous approprier le système d'acquisition permettant de réaliser les mesures.

Nous avons par la suite fait des tests sur différentes éprouvettes afin de déterminer les dommages présents sur celles-ci.

Enfin, nous avons réalisé le poster et préparé la soutenance.

Répartition du travail :

- Bibliographie :
 - Vibratoire : Raphaël Plichta, Maxence Poirier
 - Acoustique : Santiago Gonzalez, Pierre Sicard
 - Divers : Léo Courval, Jeanne Dionisi

- Modélisation d'une poutre : tout le groupe

- Essais sur des éprouvettes : tout le groupe et la tutrice

- Rendu final (rapport, poster, soutenance) : tout le groupe
 - Fréquences théoriques : Léo Courval
 - Exploitations des mesures : Maxence Poirier, Pierre Sicard

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Les différentes techniques de détection des dommages

3.1.1. Analyse vibratoire ^{[1][2]}

Tous les matériaux ont une signature vibratoire. La détection des dommages d'un système se caractérise par un changement de comportement lorsqu'il est soumis à une excitation périodique (naturelle ou forcée) : celui-ci, s'il présente des dommages, ne vibrera pas de la même façon que s'il est "sain". De cette manière, il voit ses fréquences de résonance f_r modifiées.

La détection par vibration se base sur la mesure de ces telles fréquences. Si, sur un système qu'on étudie, on observe une anomalie par rapport à un système de référence sain, alors on pourra en déduire la présence de dommages. Pour pouvoir détecter les dommages, on excite le système avec un dispositif, et un ensemble de capteurs sont disposés sur le système, permettant ainsi de récupérer des signaux de sortie, et détecter précisément les dommages.

Voici une méthode pour détecter des dommages par analyse vibratoire sur une poutre dans les conditions encastées libres :

On fait vibrer la poutre à l'aide d'un dispositif (par exemple un marteau), ce qui permet d'obtenir un signal d'entrée $E(t)$. Grâce aux capteurs placés sur la poutre, on récupère chaque signal de sortie correspondant à ces capteurs. On obtient donc plusieurs $S(t)$. Ensuite, il faut faire une analyse à l'aide des transformées de Fourier, qui permettent de passer d'une fonction du temps à une fonction dont la variable est la fréquence f . ($E(t)$ devient $E(f)$ et plusieurs $S(t)$ deviennent $S(f)$). Puis on trace les fonctions de transferts $H(f) = S(f) / E(f)$. Ces fonctions mettent en évidence les fréquences de résonances f_r de la poutre avec des pics (qui sont les maximums de la fonction). La présence de dommages se caractérise par un décalage des pics vers la gauche, ainsi d'une diminution de ses fréquences de résonances. On compare le graphe de chacune des fonctions de transferts. Le décalage des pics est la signature de la présence des dommages : cela signifie que le capteur qui a pris le signal de sortie sur la poutre se trouvait proche d'un défaut (une fissure par exemple). Plus l'entaille est élevée, plus la résonance se fait plus tôt au voisinage d'une fréquence de résonance.

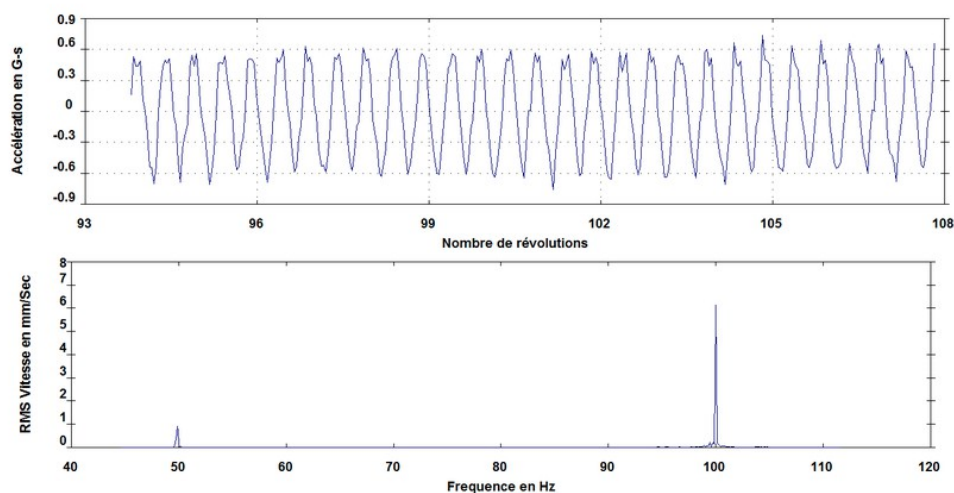


Figure 1 : Transformée rapide de Fourier : onde (en haut) transformée en spectre (en bas)

3.1.2. *Analyse acoustique* ^{[3][4][5][6]}

“L'émission acoustique (EA) est la génération d'ondes élastiques transitoires en libérant rapidement de l'énergie à partir de sources localisées dans un matériau comme une déformation”^[3]. L'un des avantages majeur de l'analyse acoustique est le fait qu'on puisse examiner complètement le volume de la structure à tout instant, sans avoir besoin d'un nombre élevé de capteurs. Cette technique est très souvent utilisée pour diagnostiquer des matériaux composites (leur activité acoustique étant élevée). Grâce à l'émission acoustique, il est possible d'évaluer la gravité de l'endommagement de telle manière à donner une meilleure estimation de la durée de vie résiduelle des structures.

Pour déterminer au mieux l'endommagement créé par l'onde émise, il faut connaître la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore. Celle-ci dépend de plusieurs paramètres dont le type d'onde, le matériau traversé, la fréquence et la géométrie du solide dans laquelle elle se propage. De plus, ces ondes émises peuvent subir plusieurs phénomènes lorsqu'elles entrent en contact d'une interface. Elles peuvent être par exemple réfléchies, diffractées, etc. La vitesse peut être obtenue par le biais d'une acquisition de données réalisée avec la mise en place d'un capteur piézo-électrique, situé logiquement à la surface de la pièce analysée.

Une faible amplitude captée, c'est-à-dire aux alentours de cinquante décibels, correspond à la fissuration de la matrice. Les amplitudes majeures, au-dessus de soixante dix décibels, sont attribuées à la décohésion de fibres, ce que l'on appelle la délamination.

Puis grâce à un logiciel, on traite ses données en utilisant la transformée de Fourier ou la transformée par ondelettes. On discerne ainsi le bruit des signaux, puis on localise la source des signaux et finalement on évalue l'endommagement des pièces.

Deux objectifs clairs sont visés par le suivi des émissions acoustiques lors d'essais mécaniques. Cela permet de déterminer le lieu où l'endommagement de la pièce a lieu. Le second objectif est de mettre en rapport les paramètres des signaux d'émissions acoustiques avec des mesures.

3.1.3. *Thermographie* ^{[7][8][9][10][11][12]}

La thermographie infrarouge permet de mesurer la température d'un corps, ici de matériaux, sans avoir besoin de créer un contact. Grâce à cette méthode, on peut détecter la chaleur émise par le rayonnement électromagnétique. La caméra thermique enregistre les températures de surface des matériaux, puis à l'aide de ces données crée une image visible. Méthode largement utilisée dans le bâtiment ou dans le diagnostic industriel, notamment dans les industries de pointe, elle peut, entre autres, détecter des éventuelles fuites. En effet, les dommages peuvent être détectés grâce à cette méthode car on observe toujours une différence de température lors d'un défaut. De plus, elle a l'avantage de ne pas nécessiter l'arrêt de l'activité des machines. Plusieurs logiciels existent pour introduire la thermographie dans l'industrie : Kilnscan, Pyroscan.

3.1.4. *Ressuage* ^{[13][14]}

Le ressuage est une méthode qui détecte les dommages à la surface sur des matériaux non poreux. Il faut que le défaut soit ouvert à la surface pour garantir sa détection. Le procédé est relativement simple : on applique tout d'abord un pénétrant (un liquide coloré ou fluorescent) sur la pièce, que l'on nettoie par la suite. Puis on applique un révélateur, qui

va « aspirer » le pénétrant resté dans les défauts, ce qui amènera une couleur différente aux endroits où se situent les dommages.

Cette méthode peut être déclinée avec plusieurs procédés : « ressuage coloré, lumière blanche et pénétrant coloré ou ressuage fluorescent, lumière ultraviolette et pénétrant fluorescent ». Le ressuage est intéressant pour les dommages en surface car il peut être utilisé sur tous les matériaux qui ne sont ni rugueux, ni poreux, et on peut examiner la pièce dans sa globalité.

3.1.5. Stéréo-corrélation^{[15][16]}

La stéréo-corrélation est une méthode qui compare deux images numériques correspondant à une surface. Il y a une image de l'état de référence, et une d'un état du matériau "déformé". Cette méthode fonctionne d'autant mieux que la texture du matériau est aléatoire. Les images sont obtenues grâce à une caméra CCD (Charge Coupled Device). Pour utiliser la stéréo-corrélation il faut définir une zone d'étude, la diviser en "zones d'intérêt", puis il faut corrélérer ces dernières. Concernant la corrélation, il faut comparer chaque "zones d'intérêt" avec l'image de référence, ce qui permet ensuite de trouver le déplacement de ces zones. Finalement on obtient un champ de déplacement grâce à un algorithme de calcul.

La stéréo-corrélation est notamment utilisée pour observer des fissures dans différents matériaux. Il y a cependant plusieurs inconvénients concernant cette méthode : elle ne peut être utilisée que sur des surfaces planes, de plus elle détecte les déformations qui sont seulement sur la surface.

3.1.6. Radiographie^{[17][18]}

Les rayons X sont utilisés comme méthode de détection des dommages. Cette méthode permet d'obtenir une mesure de champ en 2D (radiographie) ou en 3D (tomographie). L'analyse des dommages par radiographie est basée sur les différences d'absorption des radiations par la matière. La présence d'une fissure ou d'un impact sera caractérisée sur la radiographie par une différence d'absorption entre le matériau sain et les défauts dans celui-ci.

Dans l'industrie, le contrôle à l'aide des rayons X est utilisé pour le contrôle de soudures dans les centrales nucléaires ou les chantiers navals, et le contrôle de la structure des matériaux composites. La radiographie X permet la détection de défauts avec une bonne précision, cependant la réalisation des clichés nécessite des conditions de sécurité contraignantes pour l'opérateur.

3.1.7. Courants de Foucault^{[19][20]}

Les courants de Foucault sont des courants qui apparaissent dans un matériau conducteur lorsque l'on fait varier le flux magnétique à proximité. Ils sont une conséquence de la loi de Lenz-Faraday.

Afin de réaliser la détection des défauts, on utilise une bobine parcourue par un courant électrique, qui crée un champ magnétique. Ce champ magnétique traverse alors la pièce à analyser et un courant électrique apparaît à sa surface. Lorsqu'un défaut est présent sur la surface de la pièce, le contour du courant électrique est modifié, et réciproquement le flux magnétique est perturbé. Cette perturbation est mesurée et donc le défaut peut être détecté.

Cette technique de contrôle est présente dans l'industrie car la sensibilité de détection est très élevée et on peut facilement contrôler à la chaîne de nombreuses pièces. Cependant elle ne détecte les défauts que sur une faible profondeur, seuls les défauts en surface ou proches de la surface peuvent être détectés. Cette méthode est donc plus adaptée pour les fils, les barres et les tubes de faible diamètre.

3.2. Comportement d'une poutre

3.2.1. Principe de détection des dommages par analyse vibratoire

3.2.1.1.1. Introduction

Généralement, les ingénieurs ont besoin de connaître les fréquences de résonance dans le cas où la structure est exposée à des forces d'excitation. Dans ce cas de figure, la pièce peut résonner et se rompre si les fréquences d'excitation coïncident avec la fréquence naturelle de la structure. Même si une fréquence d'excitation est décalée par rapport à la fréquence naturelle, il est possible qu'elle soit toujours suffisamment proche pour produire des vibrations indésirables.

A travers ce projet nous avons cherché à identifier différents modes de vibration.

3.2.1.1.2. Fréquence de résonance

Toute structure a tendance à vibrer à certaines fréquences, appelées fréquences de résonance. A chaque fréquence de résonance correspond une déformée, appelée mode propre, que la structure tend à prendre lorsqu'elle atteint cette fréquence. Lorsqu'une structure est excitée par un chargement dynamique avec une fréquence coïncidant à l'une de ses fréquences de résonance, elle subit de grands déplacements et contraintes. Ce phénomène est connu sous le nom de résonance. Pour des systèmes non-amortis, la résonance génère théoriquement des mouvements d'amplitude infinie provoquant la rupture du système. Toutefois, un amortissement (caractérisé par son coefficient d'amortissement k) limite la réponse de la structure suite aux excitations.

Si la conception est soumise à des efforts dynamiques, les études statiques ne peuvent pas être utilisées pour évaluer la réponse du système. Les études fréquentielles peuvent aider à éviter l'effet de résonance et à concevoir des systèmes contre les vibrations.

3.2.2. Application de l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire permet de comprendre le comportement de systèmes lorsqu'ils sont soumis à une excitation. Pour nous approprier le sujet, nous avons effectué des mesures sur une poutre verticale en configuration encastree libre. Le but était de déterminer les modes vibratoires de la poutre.

Nous avons donc divisé la poutre en 5 parties (figure 3). Pour chaque partie, nous avons excité la poutre en frappant celle-ci à l'aide d'un marteau.



Figure 2 : Montage

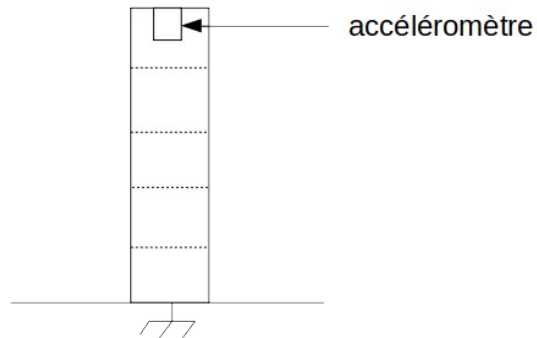


Figure 3 : Schéma de la configuration

On réalise l'acquisition de 2 types de signal : les signaux d'entrées apportés par la force du marteau, et les signaux de sorties prélevés par l'accéléromètre, au-dessus de la poutre.

Les signaux mesurés sont temporels ($E(t)$, $S(t)$). Ils permettent de rendre compte de l'amortissement de la poutre : les signaux de sorties sont représentés par une superposition de sinusoides, dont les variations diminuent au fil du temps. Il est nécessaire d'étudier les signaux dans le domaine fréquentiel ($E(f)$, $S(f)$) pour obtenir les fréquences de résonances. On obtient les signaux dans le domaine fréquentiel en réalisant une transformée de Fourier des signaux temporels. La fonction de transfert associée ($H(f) = S(f) / E(f)$) permet de repérer les fréquences de résonances. Celles-ci sont caractérisées par des pics (voir figure 4).

Selon l'endroit où on se trouve sur la poutre, le comportement qu'elle aura ne sera pas le même si on passe d'un mode vibratoire à un autre. En divisant la poutre en 5 parties, on peut la représenter en 5 systèmes masse-ressort à un degré de liberté. De ce fait la poutre est modélisée par un système à 5 degrés de liberté.

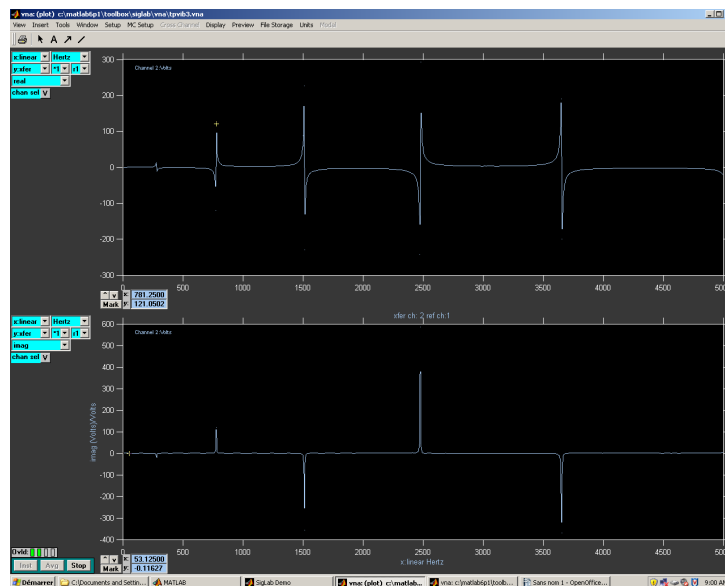
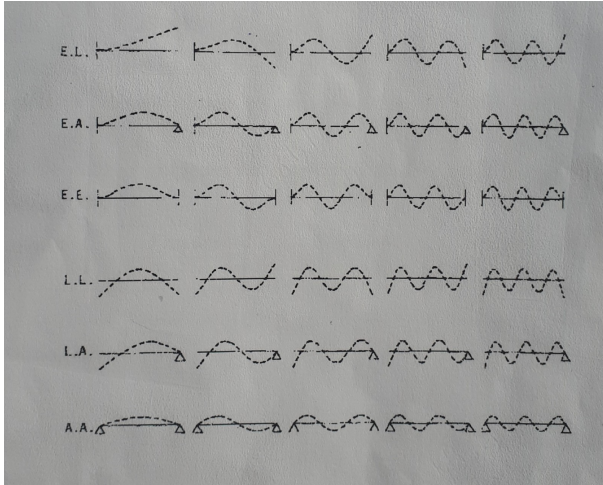


Figure 4 : un signal réponse purement imaginaire, avec les fréquences de résonance en évidence

En calculant la fonction de transfert $H(f)$ et en mesurant l'amplitude des pics pour chaque fréquence de résonance et pour chacune des 5 positions, on peut déterminer la manière dont se comporte la poutre pour chacun de ses modes.

La fonction de transfert est une fonction complexe. Lorsque la fréquence de résonance est atteinte ($H(f = f_r)$), celle-ci est purement imaginaire. Il suffit donc de tracer l'amplitude de la partie imaginaire en fonction de la position sur laquelle on se trouve sur la poutre pour obtenir l'allure des déformées modales.



Sur la figure 5, la première ligne correspond aux déformées modales d'une poutre en configuration encastree libre.

Figure 5 : déformées modales d'une poutre en flexion

3.3. Détection de dommages sur éprouvettes

3.3.1. Présentation des manipulations

3.3.1.1.1. Description du montage

Le banc de vibration est constitué d'un excitateur électrodynamique (ici une bobine) relié à un chariot, qui permet de fixer l'éprouvette. Le banc de test va permettre d'exciter l'éprouvette par un signal sinus balayé (sinus qui change en fréquence) sur une plage de fréquences. La bobine génère une accélération, et est refroidie par un ventilateur. De plus, le signal d'entrée est amplifié à l'aide d'un amplificateur. L'excitation est contrôlée par le logiciel "Jaguar" qui permet de générer un signal sinusoïdal à accélération constante. Le signal d'entrée est représenté par une fonction constante en fonction de l'accélération [en g], et est contrôlé grâce à un accéléromètre placé sur le chariot. Le signal de sortie est mesuré par un vibromètre laser (appareil qui mesure la vitesse). Le laser pointe le bout de l'éprouvette et est réfléchi sur l'extrémité supérieure de l'éprouvette en mouvement. Le vibromètre laser mesure l'effet Doppler entraîné par la vibration entre le signal émis et réfléchi. Grâce à ces deux signaux, nous obtenons la fonction de transfert. Cette fonction nous permet ensuite de déduire les fréquences de vibration.

Lors de ces essais nous nous sommes focalisés sur les 3 premiers modes, à savoir les modes de flexions.

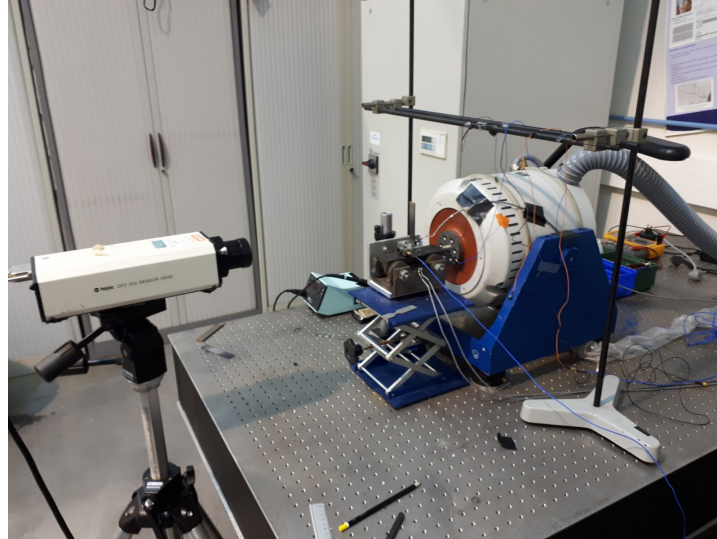


Figure 5 : Montage mis en place pour réaliser les essais

3.3.1.1.2. Objectifs de la manipulation

Le test de vibration que nous avons mis en place permet dans notre cas de détecter la présence d'entailles sur des éprouvettes en acier. Nous souhaitons également déterminer la position de ces entailles.

Notre test consiste à réaliser des vibrations forcées en utilisant un banc d'excitation sinusoïdal. Lorsque le signal sinusoïdal atteint la fréquence résonance de l'éprouvette, la structure entre en résonance. Ce sont ces fréquences qui caractérisent la structure. Le décalage des différentes fréquences de résonance doit nous permettre de déterminer la nature, la dimension et la position d'un défaut.

3.3.1.1.3. Modèle théorique

L'analyse numérique permet de calculer les fréquences de résonances théoriques et les déformations de l'éprouvette. Notre étude sera réalisée numériquement dans la partie suivante et se concentrera sur le 3 premiers modes de déformation, car se sont les seuls modes qui sont observables pour notre expérience. Nous effectuerons une étude grâce à la théorie de la résistance des matériaux et une étude avec un logiciel simulation numérique.

Les résultats des différentes méthodes pour obtenir les fréquences de résonances des éprouvettes seront comparés aux résultats expérimentaux. Ces comparaisons nous permettent d'ajuster les paramètres, comme le module d'Young, afin de mieux faire coïncider les résultats théoriques avec la réalité. On prendra en compte les paramètres suivants dans nos calculs :

- la nature du composant : acier A37
- le module d'Young de la pièce : 210 000 MPa
- la masse volumique de la pièce: 7800 kg/m³
- le nombre de modes en vibration à calculer : 3 premiers modes
- la plage de fréquences sélectionnée: 0 à 5000 Hz

3.3.2. Recherche des fréquences de résonances théoriques

3.3.2.1.1. Calcul analytique

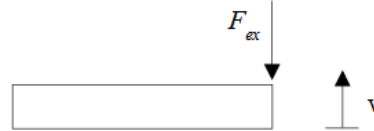
Afin de déterminer les fréquences de résonances théoriques nous utilisons la théorie de la résistance des matériaux. Pour cela nous réalisons plusieurs hypothèses :

- La longueur de l'éprouvette est largement supérieure aux autres dimensions
- Les sections droites restent perpendiculaires à la courbe moyenne.

En toute rigueur, ces deux hypothèses ne sont pas vérifiées, mais permettent tout de même d'approcher les résultats.

La poutre peut être modélisée comme ci-dessous :

- v flèche
- v' pente due au moment fléchissant
- T effort tranchant
- C moment fléchissant
- F_{ex} force extérieure par unité de longueur
- I inertie de section



Les pulsations sont déterminées par l'application des conditions aux limites. Les conditions pour une poutre encadrée sont les suivantes : $v=0$, $v'=0$

Grâce à ces conditions, nous pouvons simplifier les équations données par le principe fondamental de la statique. Les solutions de ces équations permettent d'obtenir :

$$\omega_n = \frac{X_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}$$

En utilisant X_n les solutions de l'équation pour une poutre encadrée-libre :
 $1 + \cos \square L + \cosh \square L = 0$ avec $X_n = \square L$
 En résolvant cette équation on trouve les valeurs X_n suivantes :
 $X_1^2=3,516$; $X_2^2=22,03$; $X_3^2=61,69$

En injectant ces valeurs dans l'équation (1), on trouve alors

w1 =	1566,472879	rad·s-1	f1 =	249,311902	Hz
w2 =	9814,959481	rad·s-1	f2 =	1562,099318	Hz
w3 =	27484,55971	rad·s-1	f3 =	4374,303536	Hz

A partir de ces résultats nous modifions les valeurs de E et de p utilisées afin que les résultats soient le plus proches des valeurs observées expérimentalement.

p	9000Kg/m3
E	160GPa

Nous remarquons que nous nous sommes grandement écartés des valeurs initiales de l'acier. Cette méthode de calcul est donc peu fiable en raison des hypothèses de départ, mais elle nous permet de

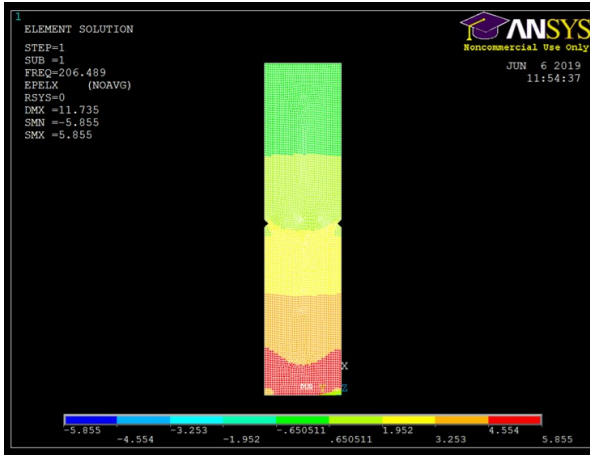
définir un ordre de grandeur des paramètres E, et p. Nous savons donc que nous devons augmenter la masse volumique et diminuer le module d'Young.

3.3.2.1.2. Calcul numérique

Pour réaliser cette étude nous utilisons le logiciel Ansys. Grâce à ce logiciel nous modélisons notre éprouvette et nous réalisons un maillage sur le corps créé. Nous modélisons également les 3 autres éprouvettes présentant une encoche.

Nous commençons par calculer les fréquences de résonances pour l'éprouvette qui ne présente aucun défaut. Une fois que le calcul est effectué, nous faisons varier les paramètres E et p afin de recalibrer la première fréquence pour qu'elle soit proche de celle obtenue expérimentalement.

p	8400Kg/m ³
E	192GPa



Grâce à cette méthode nous avons des valeurs plus proches d'un acier standard. Les valeurs de p et E ont subi des modifications dans la direction prévue par le calcul précédent. Ensuite nous calculons les 3 premières fréquences obtenues sur les éprouvettes présentant un dommage, en utilisant les valeurs de E et p trouvées précédemment.

Nous pouvons également observer que pour l'éprouvette E30, la concentration de contrainte n'est pas localisée au niveau des entailles, mais au niveau de la liaison encastrement (voir annexe 6.1).

Figure 6 : modélisation de l'éprouvette avec Ansys

Le fait que la concentration ai une localisation différente des autres, nous donne un résultats particulier. On aperçoit sur le graphique que la troisième fréquence de résonance de cette éprouvette ne suit pas une évolution normale.

3.3.3. Expériences pratiques

3.3.3.1.1. Description de l'expérience

Nous avons utilisé quatre éprouvettes de même longueur, mais avec une entaille située à des emplacements différents.

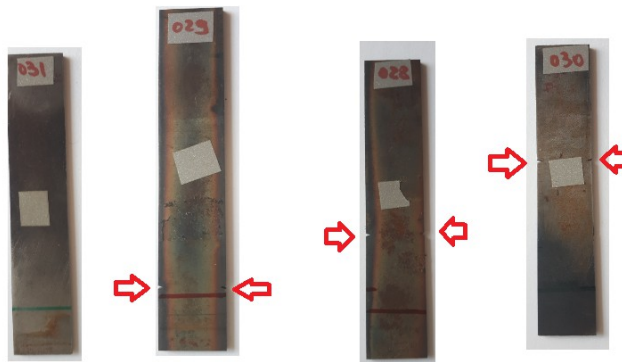


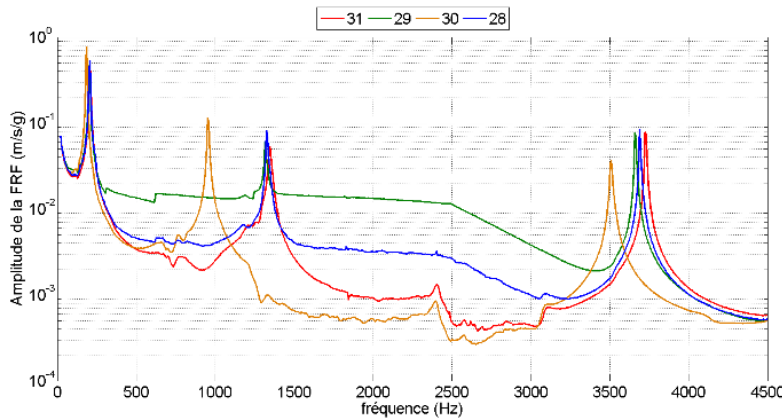
Figure 7 : Éprouvettes utilisées lors de l'expérience

Nous avons ensuite positionné le laser afin qu'il se reflète sur la bande réfléchissante placée sur chaque éprouvette.

Une fois le laser bien placé, nous avons lancé l'acquisition, sur Jaguar.

L'acquisition a été effectuée sur des temps longs pour obtenir un maximum de points afin d'obtenir des courbes les plus représentatives possibles.

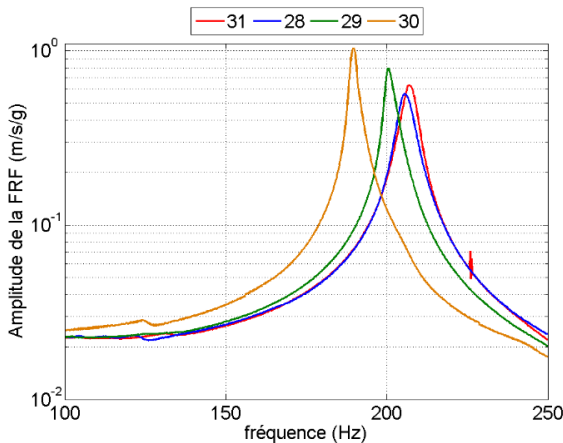
En ce qui concerne les bandes de fréquences, le balayage a été effectué entre 0 et 5000Hz afin d'observer les 3 pics correspondant à nos 3 modes de flexion.



L'acquisition nous a permis de collecter un ensemble de données pour chaque éprouvette. Nous avons finalement utilisé le logiciel Matlab pour retranscrire ces données sur un même graphique.

Figure 8 : Graphique de l'amplitude FRF en fonction de la fréquence pour nos quatre éprouvettes

3.3.3.1.2. Observations expérimentales



Ces courbes nous permettent de déterminer les trois fréquences de résonance pour chacune de nos éprouvettes.

L'ordre des pics pour chaque fréquence de résonance étant la même, nous nous sommes intéressés au premier pic en particulier.

Figure 9 : Amplitude FRF en fonction de la fréquence

On observe un décalage vers la gauche des pics de fréquence. La courbe rouge 31 la plus à droite correspond bien à l'éprouvette sans dommages. On en déduit que le décalage vers la gauche est bien dû aux entailles.

Cependant on remarque qu'un décalage de la position de l'entaille par rapport à l'encastrement ne se traduit pas forcément par un décalage de fréquence au niveau des pics. Par exemple l'éprouvette 29 (entaille à 0,8 cm de l'encastrement) voit son pic plus décalé vers la gauche que la 28 (entaille à 3cm de l'encastrement). On ne peut donc pas déduire de relation liant la position de l'entaille et le décalage de fréquence de résonance.

Ainsi notre expérience nous permet de détecter la présence d'un endommagement, mais pas sa position.

3.3.3.1.3. Résultats et comparaison

Nos observations sont en accord avec les formules théoriques. Notamment, $F_0 = k/m$ avec :

k : constante de raideur de l'éprouvette

m : masse de l'éprouvette

F0 : fréquence propre de l'éprouvette

Une entaille engendrant une diminution de la constante de raideur, il est logique de voir F0 diminuer pour les éprouvettes endommagées. Cependant les entailles provoquent une perte de masse et faussent un peu plus nos résultats. Il aurait donc été plus approprié d'effectuer nos mesures sur des éprouvettes fissurées, avec une perte de masse minimale.

On peut maintenant comparer les résultats obtenus expérimentalement et analytiquement.

Le logiciel Ansys présente des résultats similaires pour l'éprouvette sans dommage.

	1 ^{er} pic (Hz)	2 ^e pic (Hz)	3 ^e pic (Hz)
28 (3cm)	199,5	1316	3659
29 (0,8cm)	184,5	952,2	3505
30 (5cm)	204,4	1326	3689
31 (SD)	204,4	1346	3729

Figure 10 : Tableau des fréquences expérimentales analytiques

	1 ^{er} pic(Hz)	2 ^{ème} pic(Hz)	3 ^{ème} pic(Hz)
28 (3cm)	206,1	1289,9	3061,17
29 (0,8cm)	205,64	1284,8	3592,47
30 (5cm)	206,5	1287,36	3603,9
31 (SD)	206,561	1289,81	3605

Figure 11 : Tableau des fréquences analytiques

On obtient donc après un simple calcul d'erreur le tableau suivant, relatant des écarts de pics de fréquence entre l'étude analytique et expérimentale.

	Ecart f1(%)	Ecart f2(%)	Ecart f3(%)
28 (3cm)	3,2	2,02	19,3
29 (0,8cm)	10	25,8	2,42
30 (5cm)	1,02	3	2,38
31 (SD)	1,05	4,36	3,44

La méthode de calcul utilisant la résistance des matériaux a correctement prévu les fréquences de résonance de l'éprouvette sans dommage.

Le logiciel Ansys présente des résultats similaires pour l'éprouvette sans dommage. De même pour les éprouvettes présentant des dommages, nos résultats sont cohérents avec la réalité. Cependant Ansys nous a permis de remarquer que les concentrations de contraintes sont différentes en fonctions des éprouvettes. Cela provoque une étude de cas différente pour l'éprouvette E30. Nous ne pouvons donc pas appliquer les résultats expérimentaux à la localisation du dommage. Le cas de l'éprouvette E30 nous empêche de comparer nos valeurs, puisqu'il ne s'agit pas de la même étude de sollicitation.

Nous savons qu'il existe une méthode permettant de déterminer avec précision la position d'un dommage, elle consiste à calculer ce qu'on appelle le DLAC (Damage Location Assurance Criterion)

$$DLAC(j) = \frac{|\{\Delta f\}^T \cdot \{\delta f_j\}|^2}{(\{\Delta f\}^T \cdot \{\Delta f\}) (\{\delta f_j\}^T \cdot \{\delta f_j\})}$$

L'utilisation de cette méthode n'as pas été possible dans le cadre de notre projet, car celle-ci nécessite des mesures tous les millimètres le long de notre éprouvette, ou alors une multiplication des capteurs, ce qui représente des manipulations longues par rapport à la durée de nos TP.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Globalement, ce projet nous aura été instructif. Étant en continuité avec la mécanique du point étudiée en première année par l'ensemble des étudiants du projet, il nous a introduit le domaine des vibrations en général.

D'un point de vue technique, le projet aura été enrichissant pour notre bagage technique. Il nous aura permis d'utiliser des machines destinées à réaliser des mesures précises (Jaguar). En effet il est important pour nous, futurs ingénieurs de mener des travaux de manière précise et rigoureuse. De plus, cela reste avantageux pour nous de manipuler de tels outils, étant donné que certains d'entre nous se dirigent l'année prochaine vers les départements Mécanique et Génie Civil. Dans le même sens, ce projet nous aura aussi permis d'appréhender des logiciels de traitement de données notamment à travers Matlab, qui nous a permis de tracer les fonctions caractéristiques nécessaires à la compréhension des modes vibratoires.

Tous ces outils ont été utilisés dans le but d'effectuer une démarche scientifique (expérience, mesures, exploitation des résultats...).

Nous remercions finalement madame Leila KHALIJ, notre responsable de projet, qui nous a guidé lors du déroulement de notre projet et qui a toujours été disponible pour nous aider et nous permettre d'avancer.

5. BIBLIOGRAPHIE

Analyse vibratoire

- [1] <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/mise-en-uvre-de-la-maintenance-42136210/maintenance-conditionnelle-par-analyse-des-vibrations-mt9285/> (valide à la date du 28/02/2019)
- [2] <https://www.adm-vib.fr/principe-vibration/analyse-vibratoire-spectrale.html> (valide à la date du 09/04/2019)

Analyse acoustique

- [3] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00539746/document> (valide à la date du 07/03/2019)
- [4] <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/controle/general/acou.PDF> (valide à la date du 07/03/2019)
- [5] <https://www.isgroupe.com/fr/metiers/controle/contrôles-non-destructifs/Pages/Controle-par-%C3%A9mission-acoustique.aspx> (valide à la date du 07/03/2019)
- [6] <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiiu92ox-gAhWuzlUKHUMbAlgQFjAJegQIChAC&url=http%3A%2F%2Fwww.cetim.fr%2Fcontent%2Fdownload%2F78647%2F2316741%2Fversion%2F2%2Ffile%2F6%2BNoticeTechnique-EmissionAcoustique.pdf&usg=AOvVaw1EJDfDHLsPRzgSbJjnY4a4> (valide à la date du 07/03/2019)

Thermographie

- [7] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermographie> (valide à la date du 28/02/2019)
- [8] <https://lemag.bureauveritas.fr/a-quoi-sert-la-thermographie-infrarouge/> (valide à la date du 28/02/2019)
- [9] <https://www.hgh.fr/Produits/Thermographie-industrielle/Pyroscan-Camera-pyrometrique-HDR-durcie> (valide à la date du 28/02/2019)
- [10] <https://www.hgh.fr/Produits/Thermographie-industrielle/Kilnscan-Scanner-de-four-rotatif> (valide à la date du 28/02/2019)
- [11] <https://www.hgh.fr/Applications/Thermographie-industrielle/Detection-de-points-chauds-sur-les-fours-rotatifs> (valide à la date du 28/02/2019)
- [12] <http://www.ecoikos-thermographie.fr/thermographie-des-batiments/les-principes-de-la-thermographie-infrarouge.html> (valide à la date du 28/02/2019)

Ressuage

- [13] <https://www.alticontrol.com/ressuage/> (valide à la date du 28/02/2019)
- [14] <http://www.scancap.fr/services/essai-non-destructif/controle-ressuage-pt.html> (valide à la date du 28/02/2019)

Stéréo-corrélation

[15] http://oatao.univ-toulouse.fr/8930/1/Fazzini_8930.pdf (valide à la date du 07/03/2019)

[16] <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/5561/5561-principe-de-la-corrélation-dimages-numeriques-ens.pdf> (valide à la date du 07/03/2019)

Radiographie

[17] <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00003111/01/munoz.pdf> (valide à la date du 07/03/2019)

[18] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Contr%C3%B4le_non_destructif#Rayons_X_\(RTX\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Contr%C3%B4le_non_destructif#Rayons_X_(RTX)) (valide à la date du 07/03/2019)

Courants de Foucault

[19] https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Lenz-Faraday (valide à la date du 07/03/2019)

[20] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/cnd-methodes-globales-et-volumiques-42585210/contrôle-non-destructif-cnd-r1400/principes-de-détection-des-défauts-différentes-techniques-du-cnd-r1400niv10002.html#niv-sl4620344> (valide à la date du 07/03/2019)

Figure 1 : <https://www.adm-vib.fr/principe-vibration/analyse-vibratoire-spectrale.html>

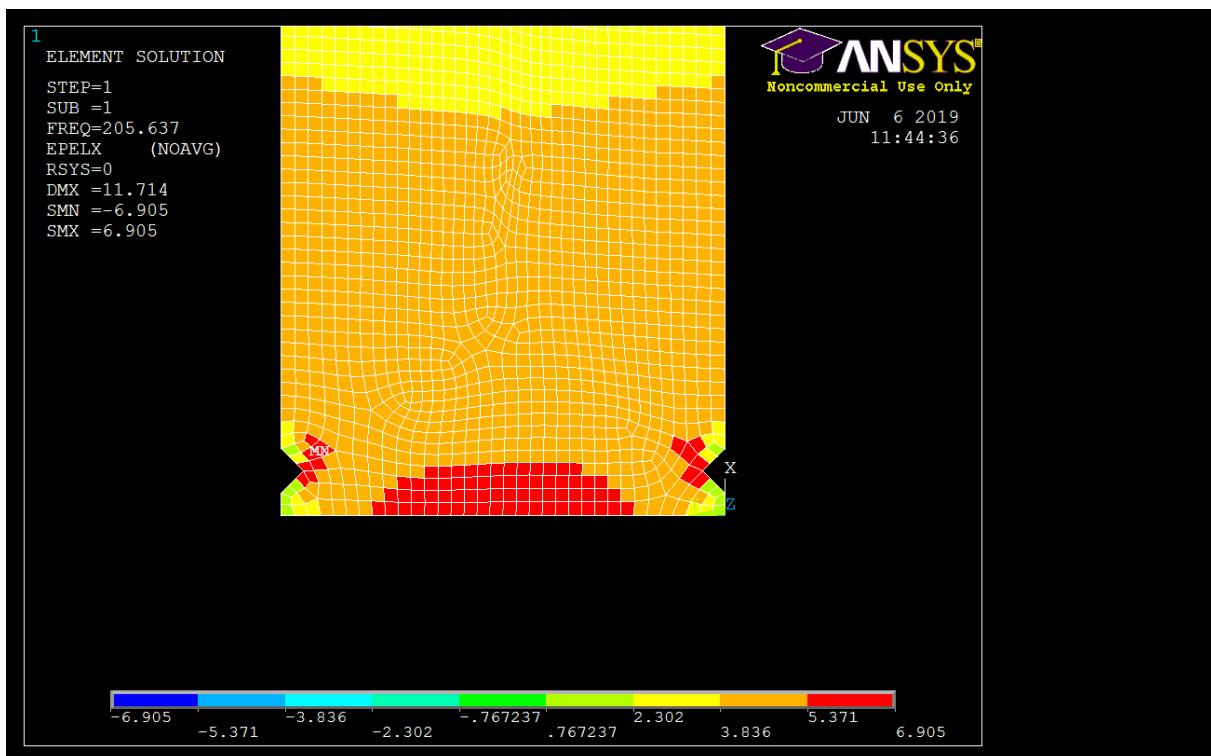
6. ANNEXES

6.1. Résultats

Résultats de la simulation numérique sur Ansys

	E31	E29	E28	E30
f1	206,561	205,64	206,1	206,5
f2	1289,81	1284,8	1289,9	1287,36
f3	3605	3592,47	3061,17	3603,9

Concentration de contraintes au niveau des entailles sur l'éprouvette E30



6.2. Listings des programmes réalisés

6.2.1. Programme Ansys

```
FINISH ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
/PREP7
BLC4,0,0,82e-3,20e-3
ET,1,SHELL181
KEYOPT,1,1,0
```

```

KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,8,0
KEYOPT,1,9,0
R,1,2e-3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,210e9
MPDATA,PRXY,1,,0.3
SMRT,6
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
!*
LESIZE,ALL,1e-3, , , 1, , , 1,
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
/SOLU
LSEL,S, , , 4
DL,ALL, ,ALL,0
ALLSEL,ALL
f0=1
f1=5000

```

```
NUM_MODES=5
ANTYPE,MODAL
MODOPT,LANB,NUM_MODES
EQSLV,SPAR
MXPAND,NUM_MODES, , , 1
MODOPT,LANB,NUM_MODES,f0,f1, , OFF
DMPRAT,0.02
SOLVE
```

6.2.2. *Programme Matlab*

```
clear all
clc
%signal temporel

data = load('test_stpi.028.frf');
f=data(:,1);
Mag_31=data(:,2);
mx=max(Mag_31);
k=find(Mag_31==mx);
f0_31=f(k);

data = load('test_stpi.029.frf');
Mag_28=data(:,2);
mx=max(Mag_28);
k=find(Mag_28==mx);
f0_28=f(k);

data = load('test_stpi.030.frf');
Mag_29=data(:,2);
mx=max(Mag_29);
k=find(Mag_29==mx);
f0_29=f(k);

data = load('test_stpi.031.frf');
Mag_30=data(:,2);
mx=max(Mag_30);
k=find(Mag_30==mx);
f0_30=f(k);

disp('31 / 28 / 29 / 30')
f0=[f0_31 f0_28 f0_29 f0_30]
disp('pour 31 / 28 / 29 / 30')
```