

Résonance linéaire et non linéaire de trou à fond plat dans une plaque d'aluminium

KOUCHORO Biaou Jean-Baptiste

Cotutelle sous la direction de :

Anissa MEZIANE , Mathieu RENIER, Philippe MICHEAU, Nicolas QUAEGEBEUR



Projet financé par une bourse du programme IdEx-Université de Bordeaux.

Sommaire

- 1 Contexte de l'étude
- 2 Résultats
- 3 Conclusions et perspectives

- 1 Contexte de l'étude
- 2 Résultats
- 3 Conclusions et perspectives

Contexte général :

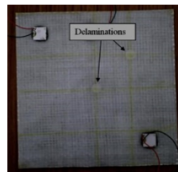
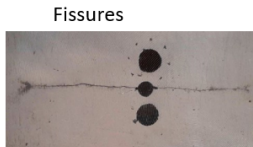
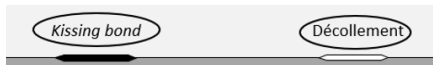
Contrôle Non Destructif (CND) et Evaluation Non Destructive (END) de structures.

- Caractérisation l'état de santé d'une pièce mécanique sans altérer ses propriétés.

Contexte spécifique :

- CND par ultrasons de structures élancées de types plaques (composites, métalliques, ..).
- Utilisation des ondes ultrasonores guidées pour inspecter dans l'épaisseur sur de grandes distances.

- En général, utilisation de méthodes linéaires classiques (détection d'un écho ou l'atténuation de l'amplitude d'une onde propagée).
- Limites :
 - Difficulté de détection de défauts faiblement échogènes.
 - Rupture d'impédance faible avec un essai ultrasonore linéaire (faible amplitude).



- **Ces insuffisances peuvent être levées par des méthodes non linéaires (Observation d'harmoniques supérieurs) :**
 - Mécanisme de contacts non linéaires lors de la propagation d'une onde guidée dans le défaut [Shkerdin2008, Yelve2017, Liu2018].
 - Résonance mécanique non linéaire pour de fortes amplitudes d'excitation [Solodov2011, Sarens2010].

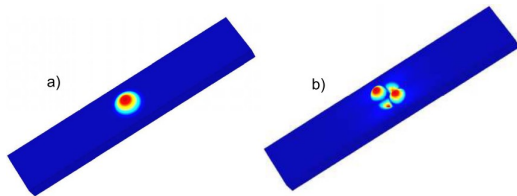
Objectifs de l'étude :

- Exciter un trou à fond plat à sa fréquence de résonance
- Activer une non linéarité locale dans le défaut

Intérêts de l'étude :

- Améliorer la compréhension de l'interaction ondes/défauts dans le cas d'une résonance locale de défaut.
- Améliorer la caractérisation et la détection de défauts.

Résonance locale de défauts



a) 10.4 kHz, b) 23.25 kHz [Solodov, 2014]

- Principe : Exciter le défaut au voisinage de la fréquence de résonance
- Amplification des vibrations dans la zone du défaut
- Manifestation de comportements non linéaires pour les fortes amplitudes d'excitation
- Détermination de la fréquence par :
 - Approche analytique - analyse modale - balayage fréquentiel

- 1 Contexte de l'étude
- 2 Résultats**
- 3 Conclusions et perspectives

2 Résultats

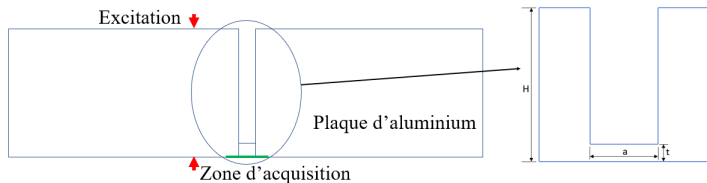
- Analyse du problème en 2D
- Résonance non linéaire

Mise en place d'outils numériques : Présentation du modèle

Objectif : Analyser la résonance linéaire et non linéaire d'un défaut modèle.

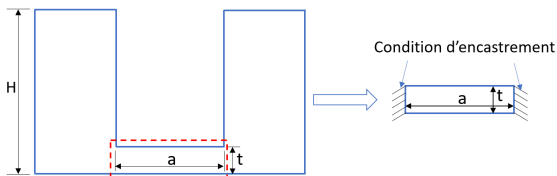
Modèle élément finis 2D sur Comsol Multiphysics

- Condition de surface libre avec bord faiblement réfléchissant
- Propagation temporel d'onde A_0
- Possibilité d'activer la non linéarité géométrique (composante quadratique du tenseur de déformation)



Détermination de la fréquence par l'approche analytique

- Objectif : calculer la fréquence du premier mode de résonance dans le cas des trous à fond plat.



- Fréquence analytique de résonance d'un trou à fond plat rectangulaire :

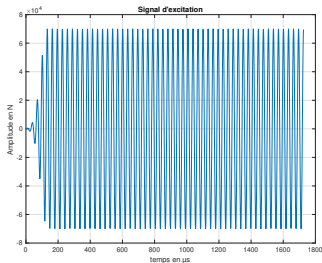
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}} \Rightarrow f_0 \approx \frac{\pi t}{3a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

- **Limites de l'approche** : un seul mode, indépendant de la profondeur.

Détermination de la fréquence par l'approche analytique

$$f_{LDR} = \frac{\pi t}{3a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} = 38.8162 \text{ kHz} \quad (2)$$

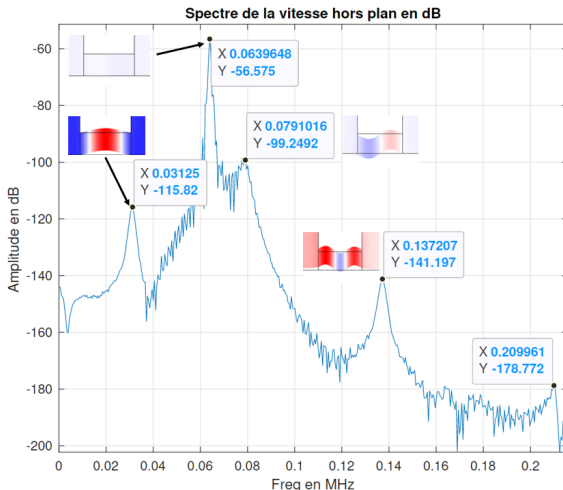
Matériaux	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	E (GPa)	ν	t (mm)	a (mm)	H (mm)
Aluminum	2700	70	0.30	1	12	9



$$f_0 = 31.25 \text{ kHz}, 70 \text{ kN.}$$

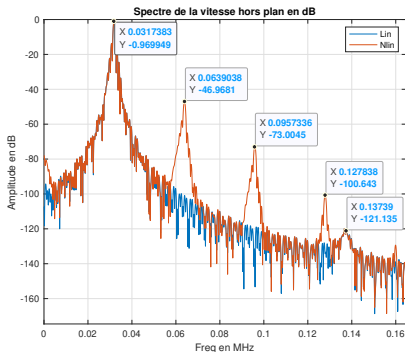
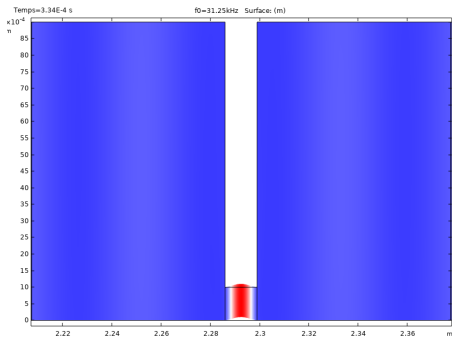
Analyse fréquentielle du transitoire de la réponse

Excitation à 64kHz et observation des fréquences de résonance.
Spectre mesuré au 1/4 du trou.



Comparaison résonance linéaire et non linéaire

Excitation à la première fréquence de résonance : 31.25 kHz

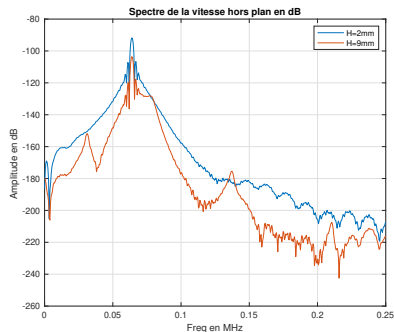
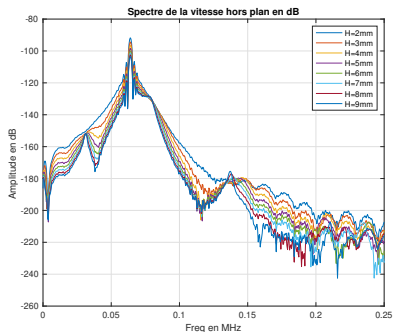


Mesure effectuée au centre du trou (noeud du 2^e mode) \Rightarrow absence du pic de résonance à 79 kHz.

Pour observer un harmonique à -40 dB il faut un déplacement minimal de $115 \mu\text{m}$ et ajouter la non linéarité géométrique au modèle Comsol.

Efficacité de la résonance

- Objectif : Observer l'influence de l'épaisseur H de la plaque sur la résonance d'un trou à fond plat d'épaisseur $t = 1$ mm.
- Intérêt : Aller vers des plaques plus fines.

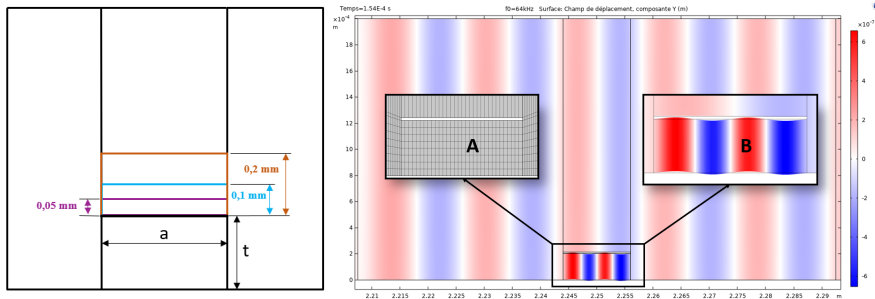


Absence de résonance pour $k = t/H \geq 50\% \Rightarrow$ diminuer t pour H petit.

Influence de la hauteur d'un défaut interne \Rightarrow délaminage

Plaque de 2 mm avec défaut interne ($k_{inf} = 10\%$ et $k_{sup} \geq 80\%$)

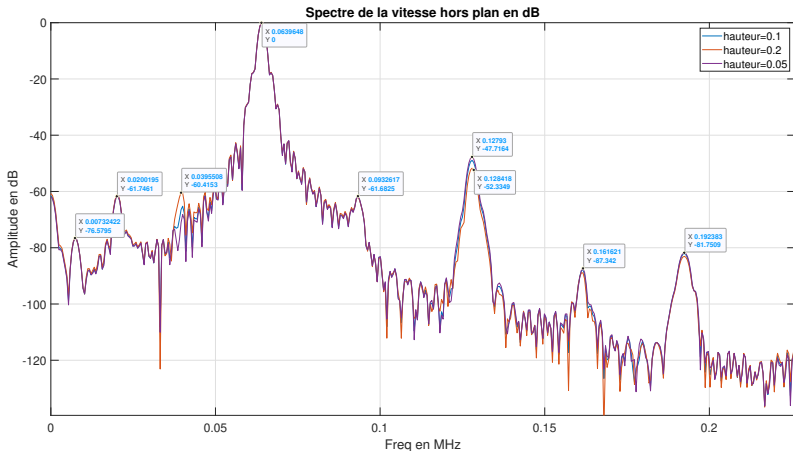
- Objectif : Observer l'influence de la hauteur du défaut
- Intérêt : Aller vers des délaminages



\Rightarrow Résonance de la partie de faible épaisseur ($k_{inf} = 10\%$).

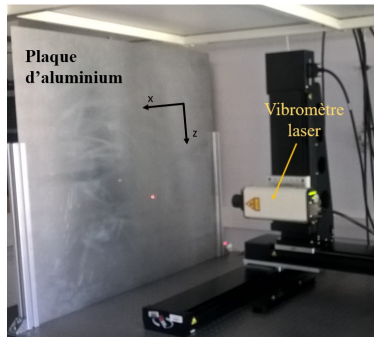
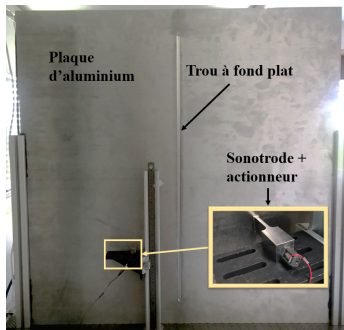
Influence de la hauteur d'un défaut interne \Rightarrow délaminage

- Avec non linéarité géométrique \Rightarrow harmoniques faiblement influencés
- Aucune influence de la hauteur sur les fréquences de résonance



Comparaison expérimentale pour le trou à fond plat

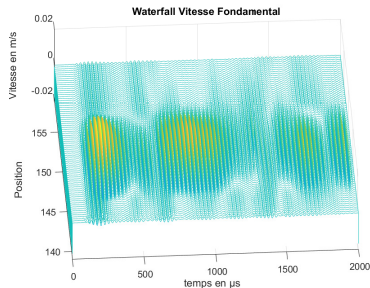
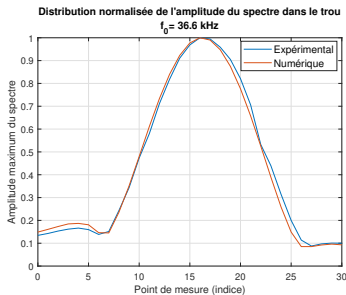
Setup expérimental sur une plaque d'aluminium de $1000 \times 1000 \times 6.13$ mm³.



Trou de 12 mm de large et 1 mm d'épaisseur.

Comparaison expérimentale pour le trou à fond plat

Corrélation entre les déformées modales numérique et expérimentale.



Niveau de déplacement mesuré expérimentalement : 100 nm.

Déplacement nécessaire pour observer un harmonique à -40 dB : 115 μm .

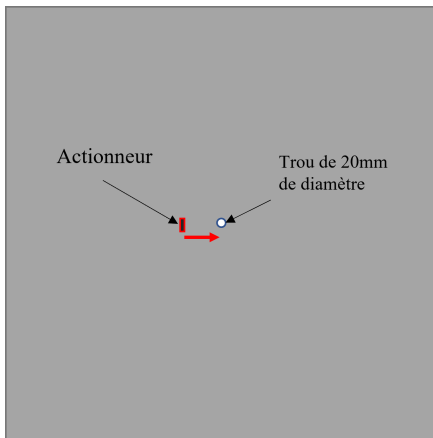
Conclusion partielle 1

- Détermination des fréquences d'excitation par analyse de transitoire.
- Résonance du premier mode observé numériquement et validé expérimentalement.
- Très fort niveaux de déplacement exigés pour observer des comportements non linéaires.
- Résonance de défauts internes de faibles hauteurs \Rightarrow délaminage.
- Possibilité d'utiliser des plaques plus fine pour lever le verrou des fortes amplitudes d'excitation.

2 Résultats

- Analyse du problème en 2D
- Résonance non linéaire

Configuration du setup 2



Feuille d'aluminium adhésive de $76,2 \mu\text{m}$ avec $25,4 \mu\text{m}$ d'aluminium et $50,8 \mu\text{m}$ d'adhésif recouvrant un trou débouchant sur une plaque en aluminium de $1000 \times 1000 \times 0,6 \text{ mm}^3$.

Détermination de la fréquence de résonance avec un chirp

Scan 2D à $500mV_{pp}$ pour un chirp entre 100 Hz et 5 kHz :

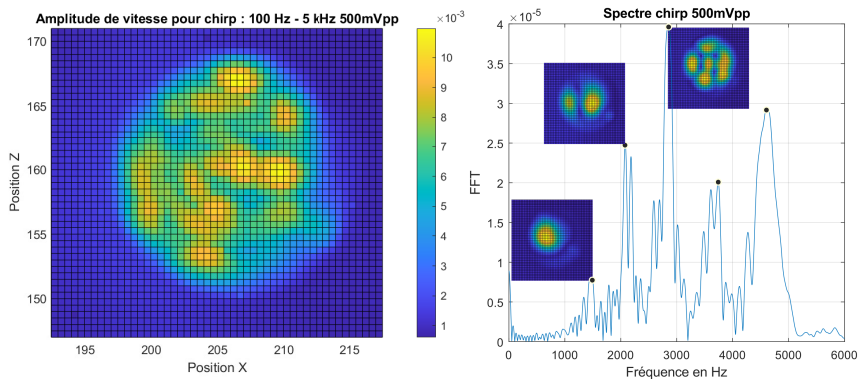
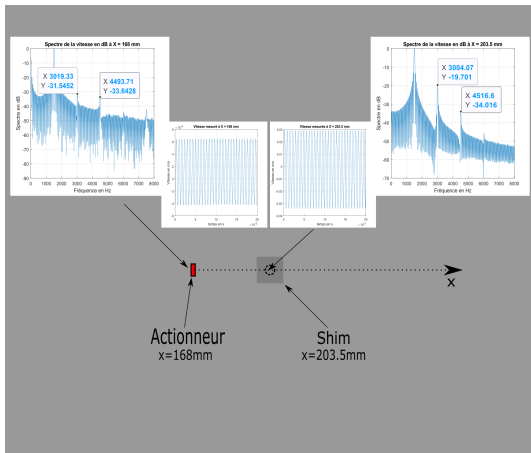


Figure 1 – Distribution de la vitesse à $500mV_{pp}$

Figure 2 – Spectre et forme modale associée

Analyse de la résonance : Excitation sinus à 1503 Hz



Observation d'harmoniques à l'excitation et dans le trou.

Analyse de la résonance : Excitation sinus à 1503 Hz

Scan 2D filtré autour de 1503 Hz et H_2 :

Amplitude de spectre de vitesse filtrée : 1.45kHz - 1.55 kHz
Sinus de 1503 Hz à 300mVpp

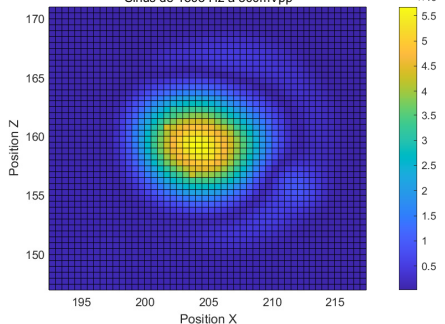


Figure 3 – Distribution de la vitesse autour de 1503 Hz

Amplitude de spectre de vitesse filtrée : 2.95kHz - 3.05 kHz
Sinus de 1503 Hz à 300mVpp

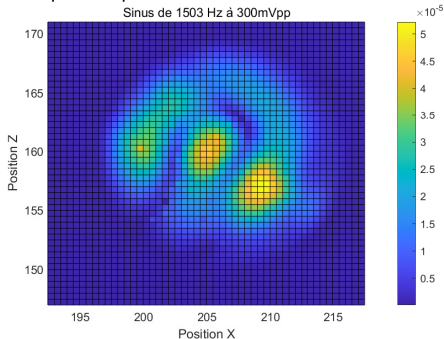


Figure 4 – Distribution de la vitesse autour de H_2

Conclusion partielle 2

A la résonance, on observe effectivement la présence d'harmonique dans le défaut traduisant un comportement non linéaire. Mais,

- le comportement non linéaire est-il quadratique ?
- les harmoniques observés sont-ils amplifiés ou générés localement ?

Analyse de la résonance : Excitation sinus à 1503 Hz

Variation de l'amplitude d'excitation et filtrage autour de f_0 et H_2 :

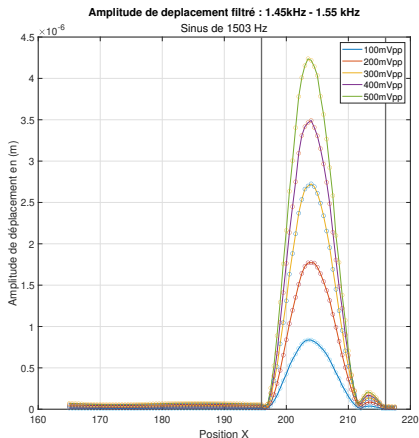


Figure 5 – Variation d'amplitude de déplacement en fonction de l'amplitude d'excitation autour de 1503 Hz

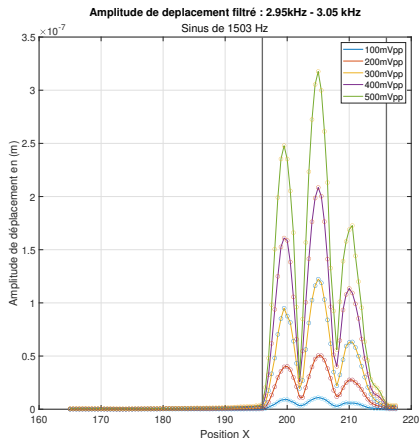


Figure 6 – Variation d'amplitude de déplacement en fonction de l'amplitude d'excitation autour de 3006 Hz

Analyse de la résonance : Excitation sinus à 1503 Hz

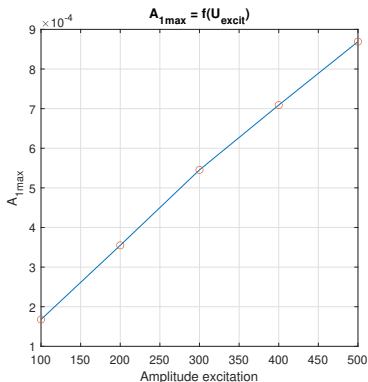


Figure 7 – Variation de l'amplitude de 1503 Hz en fonction de l'excitation

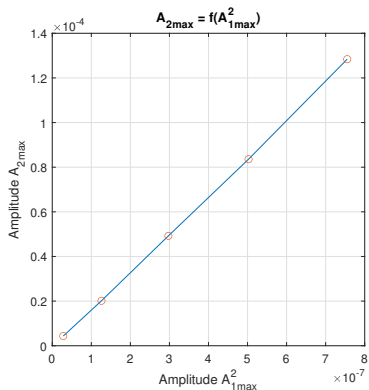


Figure 8 – Variation de l'amplitude de H_2 en fonction de f_0^2

Le comportement non linéaire est quadratique.

Excitation sinus à $H_{2(1503\text{Hz})} = 3006 \text{ Hz}$

Vérification de la source de génération du second harmonique avec une excitation à 3006 Hz :

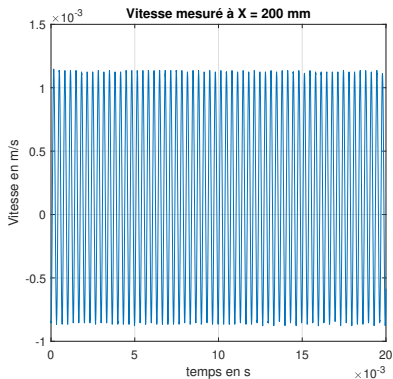


Figure 9 – Vitesse à $100mV_{pp}$ dans le trou

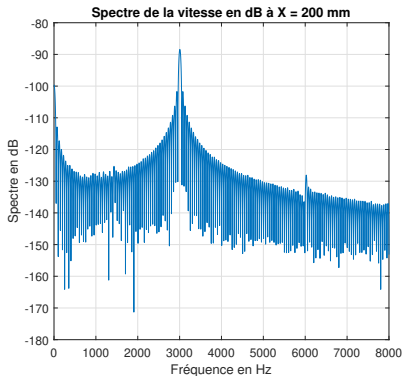


Figure 10 – Spectre en dB associé à la vitesse

Comparaison entre sinus 3006 Hz et $H_{2(1503\text{Hz})} = 3006\text{ Hz}$

Scan 2D à sinus = 3006 Hz et filtrage de $H_{2(1503\text{Hz})} = 3006\text{ Hz}$:

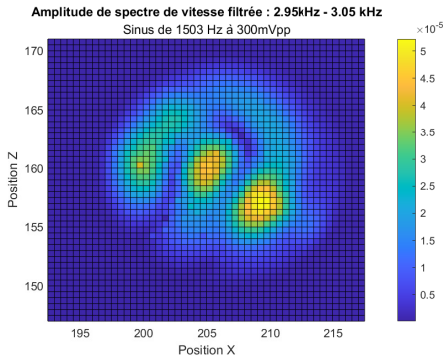
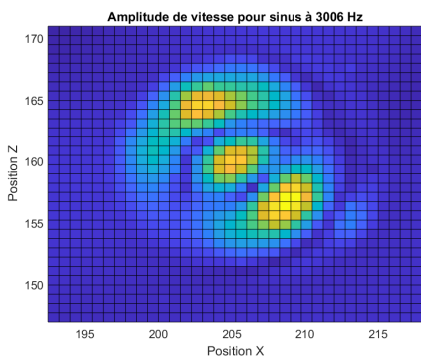


Figure 11 – Distribution de la vitesse autour du fondamental pour sinus 3006 Hz

Figure 12 – Distribution de la vitesse autour de $H_{2(1503\text{Hz})} = 3006\text{ Hz}$

Comparaison entre sinus 3006 Hz et $H_{2(1503\text{Hz})} = 3006\text{ Hz}$

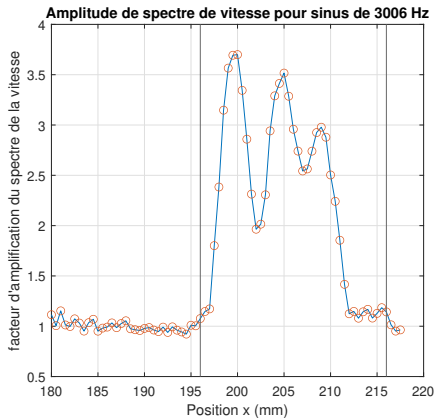


Figure 13 – Amplitude du spectre normalisé pour sinus 3006 Hz

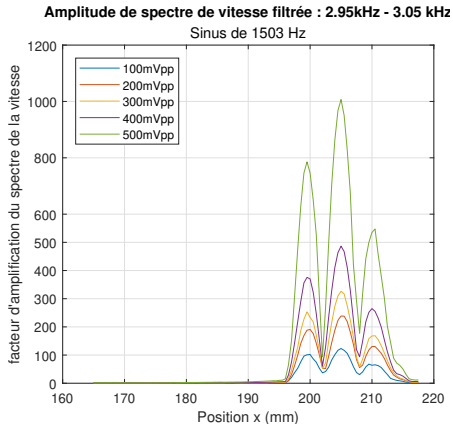


Figure 14 – Amplitude du spectre normalisé pour $H_{2(1503\text{Hz})} = 3006\text{ Hz}$

Le second harmonique est généré localement et amplifié à la résonance.

Conclusion partielle 3

Le second harmonique généré à la résonance est beaucoup plus important et très localisé dans le défaut. A 100 mVpp, on observe un facteur d'amplification supérieur à 100 à la résonance.

Cependant, la résonance est-elle indispensable pour observer un comportement non linéaire aussi amplifié ?

Excitation sinus hors de la résonance à 1156 Hz

Une excitation sinus en dehors de la résonance à 500 mVpp.

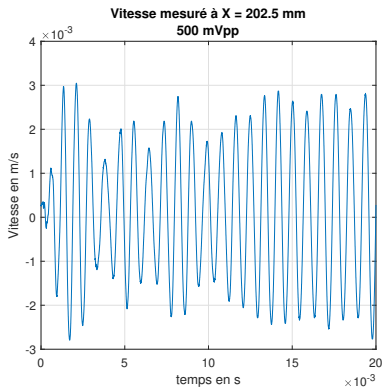


Figure 15 – Vitesse à $500mV_{pp}$ dans le trou

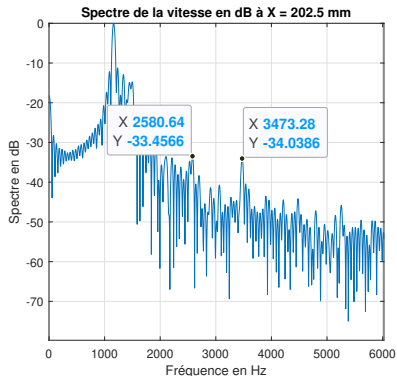


Figure 16 – Spectre en dB associé à la vitesse

Excitation sinus hors de la résonance à 1156 Hz

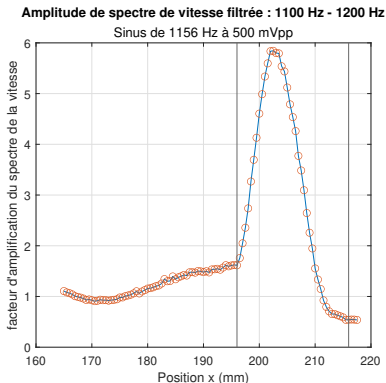


Figure 17 – Amplitude du fondamental normalisé

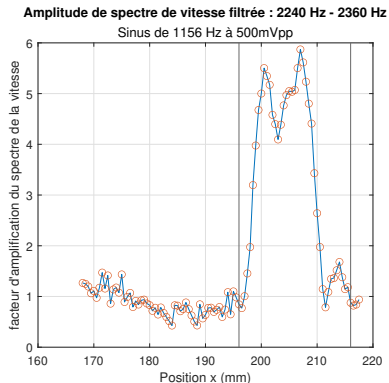


Figure 18 – Amplitude du second harmonique normalisé

Hors de la résonance, amplification du 2nd harmonique d'un facteur 6 contre un facteur 1000 à la résonance pour la même amplitude d'excitation.

- 1 Contexte de l'étude
- 2 Résultats
- 3 Conclusions et perspectives**

Conclusions

- La résonance est indispensable pour observer un comportement non linéaire de forte amplitude.
- Cette résonance locale génère un comportement non-linéaire localisé dans le défaut.

Perspectives

- Appliquer le protocole sur un shim sain (excité à de faibles amplitudes pendant des durées plus courtes pour éviter l'endommagement constaté ci-dessus)
- Appliquer le protocole sur une plaque en composite comportant des délaminages
- Identifier la non linéarité (équation de Duffing)

Merci pour votre Attention !!!