

Effet Doppler

Table des matières

1. Description du projet	2
2. Objectifs	2
3. Démarche expérimentale	2
4. Contraintes et obstacles	4
5. Observations	8
6. Interprétation et comparaison :	12
7. Conclusion	13

1. Description du projet

Notre projet a pour objectif principal d'étudier l'effet Doppler appliqué aux ondes sonores. L'effet Doppler désigne le décalage de fréquence perçu entre l'émission et la réception d'une onde lorsque la distance entre la source et l'observateur varie au cours du temps. Concrètement, ce phénomène se manifeste par une compression des ondes lorsque l'émetteur et le récepteur se rapprochent, ce qui diminue la période T et augmente la fréquence $f = \frac{1}{T}$. À l'inverse, lorsqu'ils s'éloignent, les ondes se dilatent, entraînant une augmentation de la période et donc une baisse de la fréquence perçue. Pour travailler sur ce phénomène, nous utiliserons un dispositif composé de capteurs fonctionnant à une fréquence de 40 kHz, permettant l'émission et la capture d'un signal sonore afin d'observer les variations de fréquence liées au mouvement d'un capteur placé au bout d'un ressort.

2. Objectifs

Le but de notre projet est d'étudier un signal sonore afin de remonter à la vitesse d'un objet grâce aux variations de fréquences engendrées par l'effet Doppler. Celui-ci permet de déterminer la vitesse relative entre une source sonore et un observateur en mesurant le décalage de fréquence perçu. À travers ce projet, nous cherchons à mettre en œuvre un protocole de mesure et d'analyse permettant de capter ce décalage, de le traiter numériquement, puis d'en déduire si possible la vitesse de l'objet en mouvement.

3. Démarche expérimentale

Avant de pouvoir observer ce phénomène, nous avons d'abord développé une approche théorique en modélisant numériquement l'onde reçue par le récepteur. Cette étape nous a permis d'étudier le comportement du signal et les effets du déplacement de la source ou du récepteur sur la fréquence perçue. Une fois cette base théorique établie, nous avons pu concevoir un montage expérimental afin de réaliser des observations physiques et valider nos hypothèses.

Tout d'abord l'émetteur au repos (supposé immobile) envoie donc une onde de la forme :

$$S_2(t) = A_0 * \cos(\omega t)$$

Avec :

$$\omega = 2\pi f \text{ et } f = 40\text{kHz}$$

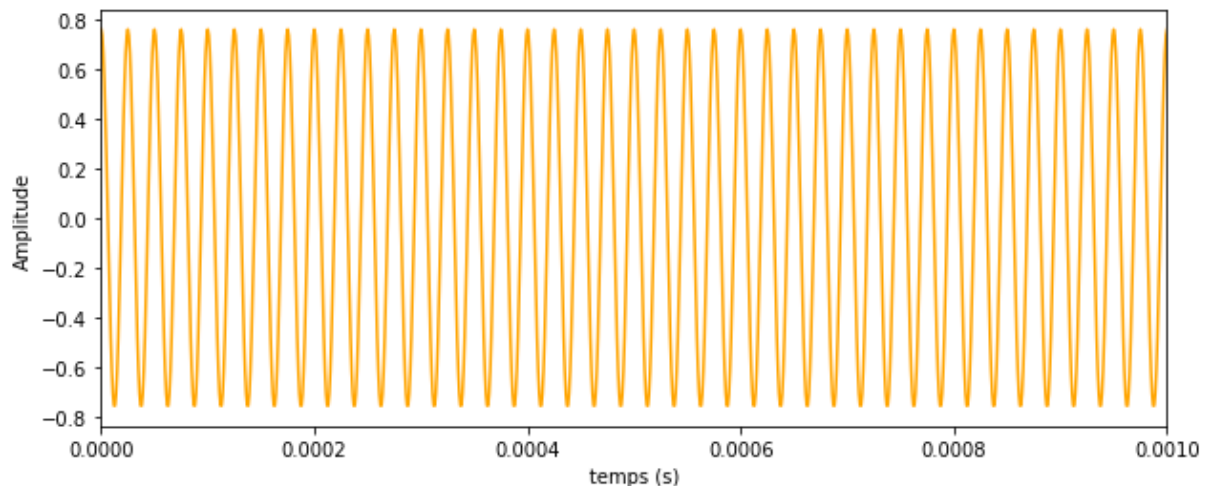


Figure 1 – Signal émis au repos

Lorsque l'on met l'émetteur en mouvement, la fréquence change et est régie par la formule de l'effet doppler qui s'écrit de la sorte :

$$f_{re,a} = \frac{f_e}{1 \pm \frac{v}{c}}$$

Avec v qui est la vitesse de l'émetteur et c la vitesse des ultrasons dans l'air (343 m.s^{-1})

Le signe \pm de la formule est compris directement dans la vitesse, dérivée de la position, qui est en effet déphasée de $\pi/2$ par rapport à celle-ci. Cela signifie, que lorsque la position atteint un maximum d'amplitude, la vitesse atteint un minimum qui correspond à 0 et peut être positive ou négative.

$$v_2(t) = A_0 * \omega * (-\sin(\omega t))$$

Une fois la partie théorique achevée, nous avons pu aborder l'aspect expérimental en concevant un montage permettant d'observer concrètement le phénomène étudié. Toutefois, certaines contraintes techniques ont limité nos choix. En particulier, le récepteur utilisé ne pouvait détecter que des fréquences comprises entre 39 kHz et 41 kHz (soit $40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$), ce qui limitait la vitesse maximale détectable de l'émetteur en mouvement. Cette contrainte ne s'est finalement pas révélée problématique. En effet, d'après la formule de l'effet Doppler, une fréquence émise de 40 kHz correspondant à une fréquence reçue de 41 kHz permet de calculer une vitesse maximale d'environ $8,40 \text{ m.s}^{-1}$. Or, dans notre cas, la vitesse maximale atteinte avec le système expérimental — basé sur un ressort de raideur $k = 90 \text{ N/m}$ ne dépassait pas $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ en le tirant de quelques cm, ce qui reste largement dans les limites de détection du récepteur.

Nous sommes donc partis sur le principe d'attacher un émetteur à une masse que l'on positionnera au mieux possible au-dessus d'un récepteur.

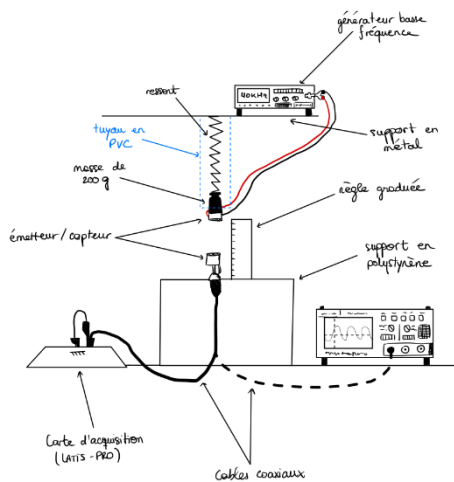
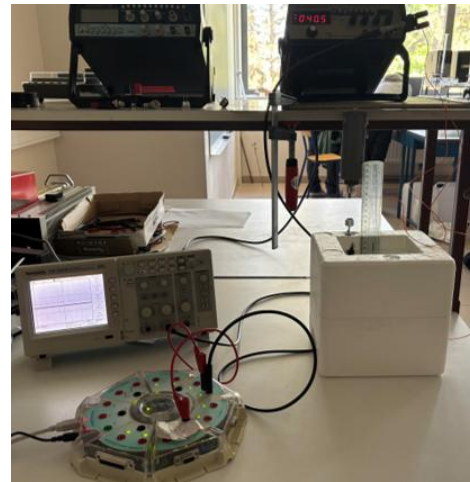


Schéma 1 – Plan expérimental



Photographie 1 -Montage expérimental

Ce montage (Photographie 1) nous offre la possibilité d'acquérir des signaux de manière reproductible, que ce soit en présence ou en absence de l'effet Doppler, selon que l'on mette ou non le ressort en mouvement. Grâce à cette configuration, nous avons pu recueillir des données exploitables, que nous avons ensuite transférées vers un environnement de traitement tel que Python. À partir de là, plusieurs analyses ont pu être réalisées, notamment l'application de la transformée de Fourier rapide (FFT), permettant d'observer l'évolution du spectre fréquentiel au cours du temps et d'estimer la vitesse de déplacement de l'émetteur en fonction du temps. Ce processus nous donne ainsi une méthode concrète pour mettre en évidence et quantifier l'effet Doppler dans un cadre expérimental.

Fonctionnement :

Un GBF (générateur basse fréquence), aussi appelé générateur de fonctions, peut envoyer un signal à un émetteur d'ultrasons en générant un signal électrique (généralement sinusoïdal) à une fréquence correspondant à celle des ultrasons, en l'occurrence dans notre cas cette fréquence était de 40kHz.

Ce signal fait vibrer le matériau piézoélectrique de l'émetteur d'ultrasons et ces vibrations produisent des ondes acoustiques dans l'air à des fréquences ultrasonores, inaudibles pour l'humain.

Le récepteur, qui est placé en dessous de l'émetteur est identique à l'émetteur : aussi un composant piézoélectrique, mais utilisé en sens inverse. L'onde ultrasonore provoque de très légères vibrations mécaniques dans le matériau piézoélectrique du récepteur. Grâce à l'effet piézoélectrique inverse, ces vibrations sont transformées en tension électrique. C'est un signal alternatif, de même fréquence que l'onde reçue (typiquement 40 kHz).

Dans notre montage, nous pouvons soit brancher le récepteur à un oscilloscope pour permettre l'observation du signal, ou à une carte d'acquisition permettant l'enregistrement du signal reçu.

4. Contraintes et obstacles

Dans ce projet, nous avons été confrontés à plusieurs contraintes et problèmes qui sont arrivés tout au long du semestre, le premier étant la contrainte sur la vitesse du ressort qui a pu rapidement être solutionné.

Ensuite est venu le problème du 50Hz. Lors de nos acquisitions, nous avons constaté la présence d'un parasitage à 50 Hz, visible sous forme de bruit superposé au signal mesuré (petites vaguelettes en haut du signal). Ce phénomène est vraisemblablement dû au réseau électrique, notamment via la prise

murale utilisée pour l'alimentation ou encore par les câbles de connexion insuffisamment blindés, qui se comportent comme de véritables antennes captant les ondes parasites. Pour déterminer d'où provenait ce 50Hz, on a décidé de court-circuité la carte d'acquisition, cela signifie que l'entrée de la carte a été reliée à la masse, éliminant toute source de signal externe, pour pouvoir vérifier si oui ou non ce bruit provenait de la carte ou des câbles.

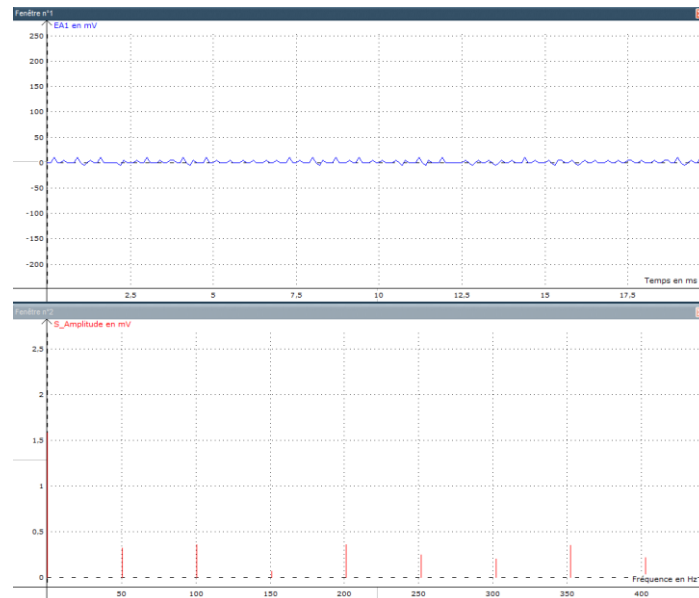


Figure 2 – Acquisition du bruit

L'analyse du signal temporel obtenu sur la figure 2 montre une absence de composantes significatives, mis à part un léger bruit de fond, ce qui est tout à fait normal dans ce genre de configuration. En revanche, la transformée de Fourier (FFT) révèle la présence de pics faibles mais réguliers tous les 50 Hz, depuis 0 Hz jusqu'à plusieurs centaines de Hz.

Ces pics sont caractéristiques d'un bruit de type secteur, émis à 50 Hz par le réseau électrique, et qui se propage dans l'environnement sous forme de perturbations électromagnétiques. Le fait que ces harmoniques apparaissent même en l'absence de capteur ou de câblage externe suggère que la carte d'acquisition n'est pas totalement isolée électriquement et peut être sensible aux interférences ambiantes, bien qu'elle ne soit pas la source principale du bruit.

Cela confirme que le bruit à 50 Hz observé dans nos mesures n'est pas généré directement par la carte, mais est plutôt capté par le reste du montage (câbles, environnement). Ce test valide donc que pour améliorer la qualité des mesures, il faudra plutôt se concentrer sur l'isolation des câbles ou bien l'utilisation de filtres électroniques adaptés.

Un autre problème majeur rencontré au cours du projet a été lié à la modulation d'amplitude observée dans les signaux acquis. En effet, lors de la tentative de modélisation de l'amplitude du signal émis par l'émetteur, dans le but de raffiner notre traitement sous Python, nous avons constaté que l'amplitude ne variait pas uniquement de manière progressive en fonction de la distance. Elle présentait également une composante sinusoïdale, ce qui rendait la modélisation bien plus complexe.

Après discussion avec nos enseignants, nous avons envisagé une explication plausible : le signal émis par l'émetteur pourrait se réfléchir sur le socle en polystyrène récepteur, engendrant une interférence entre l'onde incidente et l'onde réfléchie. Ce phénomène aboutirait alors à la formation d'une onde stationnaire, dans laquelle l'amplitude varie de manière périodique dans l'espace. Cette superposition de signaux compliquait donc fortement l'analyse et l'exploitation des données.

Premièrement, comme il s'agit d'une onde sphérique qui se propage dans la salle, à priori l'amplitude évolue en $\frac{1}{r^2}$, avec r la distance entre la source et l'émetteur. Or, les courbes que nous avons obtenues diminuaient beaucoup moins. Il semblerait que l'émission de l'onde sonore autour de la source n'est pas isotrope, c'est-à-dire qu'elle ne se propage que selon une direction imposée par l'émetteur et non de manière totalement sphérique. L'évolution de l'amplitude n'est alors plus du tout la même. Après quelques expériences, il semblerait que nous soyons plus proche d'une évolution en $\frac{1}{r}$. Nous avons donc conservé ce modèle.

	Amplitude (mV)
A0	708
Amin	640
Amax	840
m	0,761904762
Aref	95,67567568
A0/Aref	14%

Tableau 1 – Amplitude du signal

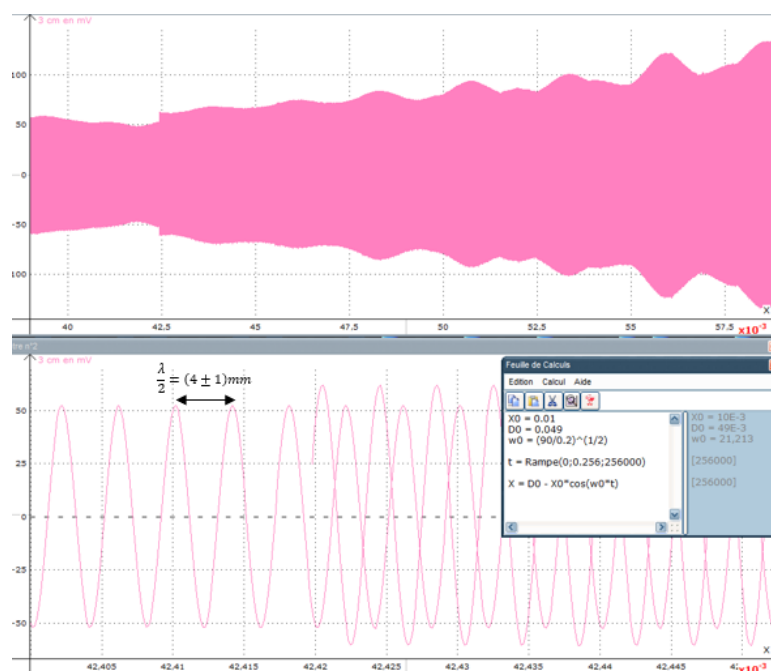


Figure 3 : signal en fonction de la position

On a supposé qu'entre un ventre et un nœud la composante en $\frac{1}{r}$, pour $r = 4.5\text{cm}$, était constante. Nous avons alors pu mesurer l'amplitude de l'onde incidente A_0 , puis celle de l'onde réfléchie A_{ref} en mesurant $A_{min} = A_0 - A_{ref}$ et $A_{max} = A_0 + A_{ref}$ (valeurs sur tableau 1). Sur Latis-Pro, nous avons pu retrouver la longueur d'onde du ressort et la vérifier à la valeur théorique (figure 3).

Finalement, nous avons $A(x(t)) = A_0(1 + \frac{13.51}{100} * \cos(k * (\frac{x(t)}{2})))$

Pour finir nous avons dû étudier la modulation de phase car nous avons remarqué au début de nos observations que la phase du signal était modifiée en fonction de la position du capteur. En effet, nous avons ici une onde plane progressive qui se propage dans l'air, donc elle dépend du temps et de l'espace. On sait que sa propagation est régie par l'équation de propagation de d'Alembert, où les solutions sont de la forme :

$$f\left(t - \frac{x}{c}\right) + g\left(t + \frac{x}{c}\right)$$

Ainsi dans la fonction sinusoïdale le terme de phase $-k * x(t)$ apparaît, et nous avons bien une onde de la forme $S_1(x, t) = A(x(t)) * \cos(2\pi f_{re,a} - k * x(t))$, où $x(t) = d_0 - x_0 * \cos(\omega_0 t)$.

Par ailleurs nous avons comparé l'influence de l'effet Doppler à celle de la phase sur la variation de fréquence.

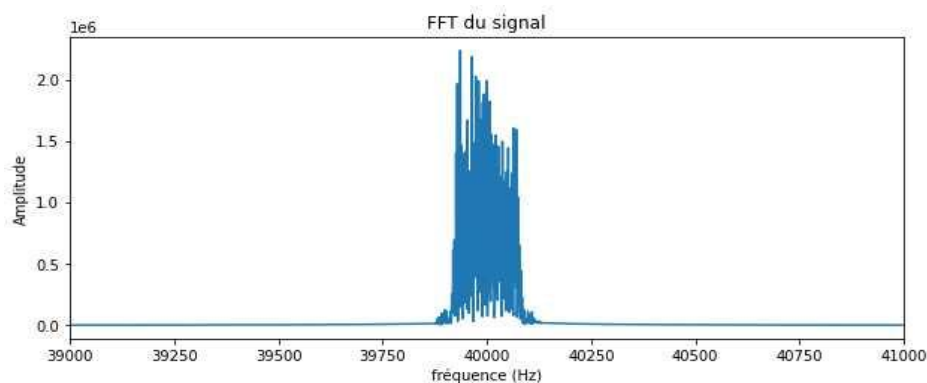


Figure 4 : FFT du signal sans effet Doppler

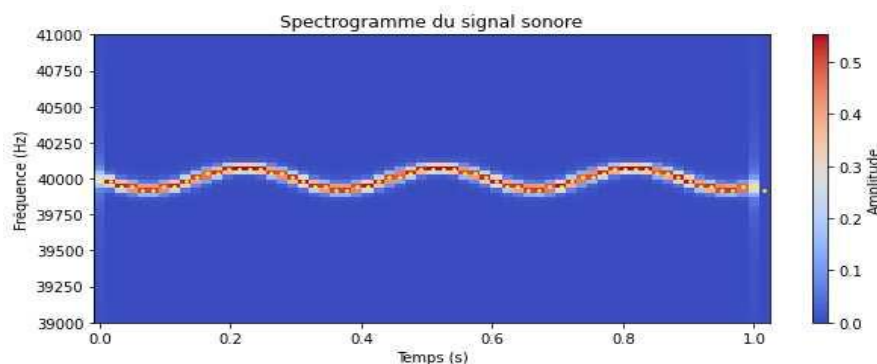


Figure 5 : spectrogramme signal sans effet Doppler

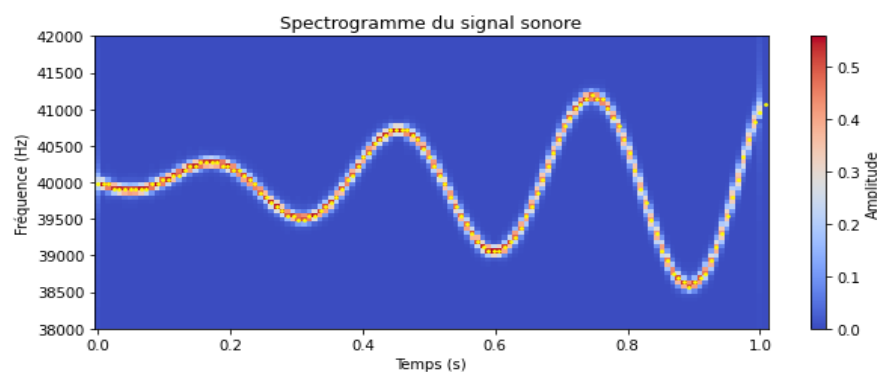


Figure 6 : spectrogramme signal sans modulation de phase

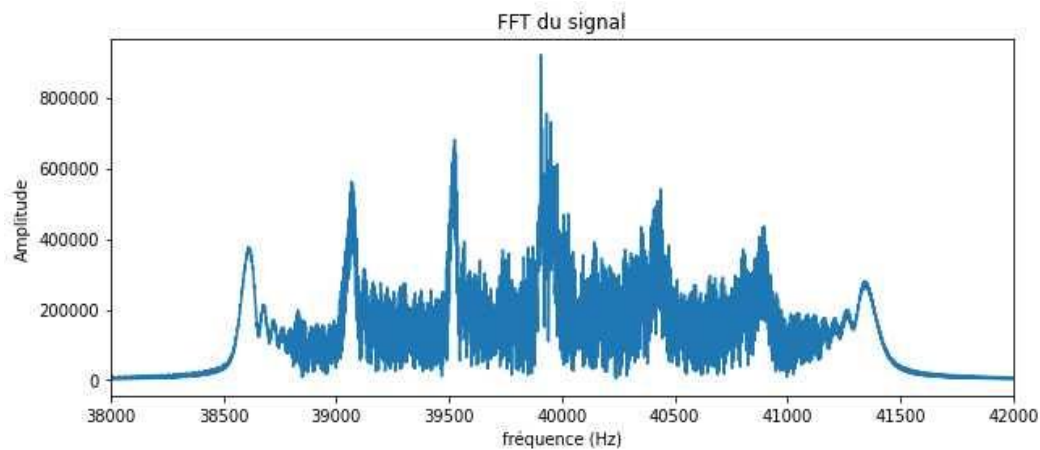


Figure 7 : FFT du signal sans modulation de phase

Après analyse sur python, on voit que la FFT du signal sans phase (figure 7) est beaucoup plus étalée, et que son diagramme de Gabor (figure 6) ressemble à celui du signal complet (voir figure 10). Les variations de fréquences uniquement dues à la modulation de phase restent relativement faibles comparées à celles dues à l'effet Doppler.

On conclut donc que c'est bien l'effet Doppler qui prédomine et que nous sommes bien en train d'étudier les variations de fréquence dues à l'effet Doppler.

5. Observations

Avant d'analyser nos acquisitions expérimentales, nous avons développé une modélisation théorique du phénomène sur Python, en particulier pour anticiper les effets du décalage Doppler sur le signal reçu. Cette étape nous a permis de simuler le comportement du signal en fonction du mouvement de l'émetteur (rapprochement ou éloignement) afin d'avoir une base de comparaison fiable pour les données mesurées. Grâce à cette modélisation, nous avons pu prévoir les variations de fréquence attendues, visualiser les effets temporels et fréquentiels, et ainsi mieux comprendre les résultats obtenus lors des expériences.

Théorie :

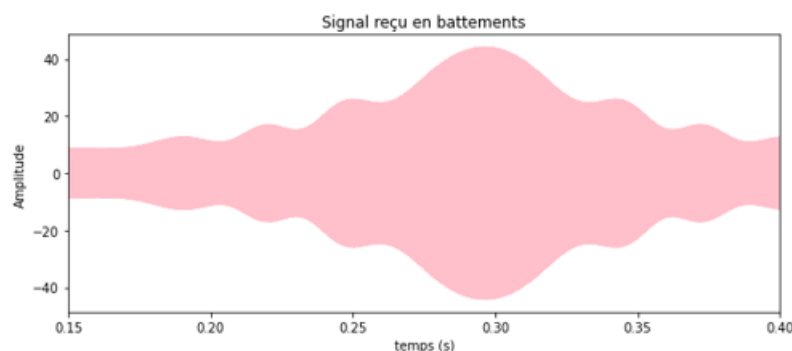


Figure 8 : Signal théorique reçu avec le ressort tiré de 3 cm

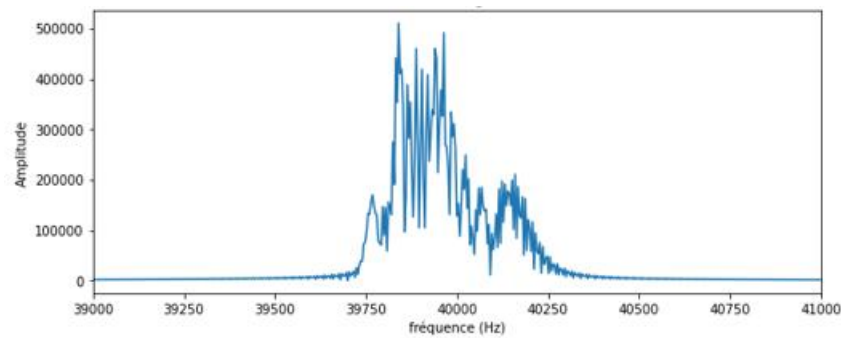


Figure 9 : FFT théorique du signal avec un tirage de 3 cm (figure 9)

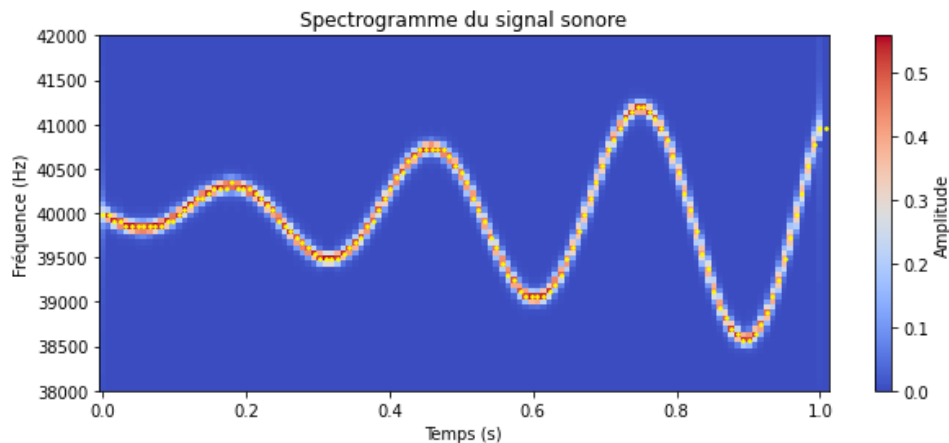


Figure 10 : Spectrogramme du signal de la figure 9

Sur la Figure 8, on observe le signal reçu par le récepteur lorsque le ressort est tiré de 3 cm depuis sa position d'équilibre. L'amplitude du signal augmente dans un premier temps, ce qui indique que l'émetteur se rapproche du récepteur, avant de diminuer progressivement, traduisant un éloignement. Cette variation d'amplitude reflète bien le mouvement oscillatoire de la masse suspendue. On note également la présence de petites ondulations régulières en haut et en bas de l'enveloppe du signal : il s'agit de la modulation d'amplitude, un phénomène expliqué plus en détail dans la section consacrée aux contraintes et obstacles rencontrés.

Quant à la Figure 9, elle présente la transformée de Fourier du signal acquis. Celle-ci met en évidence une série de pics symétriques autour de la fréquence de référence, fixée ici à 39 921 Hz. Cette répartition des composantes fréquentielles confirme la présence de l'effet Doppler, qui induit un léger décalage spectral du signal en fonction du mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur.

La figure 10 présente le diagramme de Gabor du signal de la figure 8, on peut y voir des différences de fréquences marquées et qui évoluent avec le temps. Le signal durant 1 secondes, on peut voir que sur l'intervalle de temps de 250ms, les variations en fréquences sont moins marquées mais sont présentes. La fréquence passe bien en dessous et au-dessus de la fréquence de référence de 39 921Hz ce qui correspond bien à un rapprochement et un éloignement de l'émetteur par rapport au récepteur.

Cependant, une interrogation subsiste : la différence de fréquence tend à augmenter au cours du temps, alors que notre modèle ne prend en compte ni amortissement, ni accélération.

Des tests complémentaires ont été réalisés afin d'analyser plus en détail le comportement du signal dans le cadre de l'effet Doppler, notamment en ce qui concerne le terme $-kx$ (la phase variable). En utilisant une fréquence fixe, comme dans les expériences précédentes, on observe que le diagramme de Gabor reste stable et cohérent : l'amplitude n'a aucun impact significatif sur l'analyse, et les fréquences de Doppler ne présentent aucune divergence. Cela suggère que la divergence

observée ne provient pas directement du signal ou de ses composantes fréquentielles, mais plutôt d'un décalage ou d'une incohérence entre le signal lui-même et sa représentation via un diagramme de Gabor. Il semble donc que cette divergence provienne du traitement par la fonction utilisée, et non d'une instabilité intrinsèque du signal.

Pratique :

Paramètres Latis-Pro :

- Temps échantillonnage : $1\mu s$
- Nombre de points : 256000
- Temps acquisition : 256ms

Les paramètres choisis sur Latis Pro sont adaptés à l'enregistrement d'un signal ultrasonore de 40 kHz. Un temps d'échantillonnage de $1\mu s$ (soit une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz) permet de respecter largement le critère de Shannon, en échantillonnant plus de 20 fois par période de l'onde (25 échantillons par cycle de 40 kHz), ce qui garantit une reconstruction fidèle du signal sinusoïdal. Le nombre de points de 256 000 (ce qui est le max sur Latis-Pro) offre une bonne résolution temporelle tout en permettant un enregistrement de 256 ms au total, une durée suffisante pour observer pratiquement une période entière du système mécanique (ressort + émetteur $\sim 300ms$) et analyser l'évolution du signal reçu en fonction de son mouvement. Ces paramètres assurent un bon compromis entre précision temporelle, qualité de signal, et durée d'observation.

Le montage nous a permis de faire de multiples acquisitions qui nous permettent de pouvoir observer un signal sous différentes formes, lorsque le ressort est supposé au repos donc immobile, et lorsque l'on étend le ressort d'un certain déplacement à l'origine, allant de quelques millimètres à 2 ou 3cm ($\pm 1mm$) suivant si l'on veut voir plus ou moins de différence de fréquences.

Ci-dessous, une acquisition avec TF où l'on tire le ressort de 2mm et une autre où on le tire de 3cm.

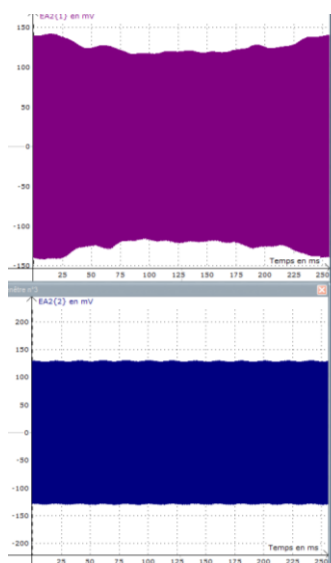


Figure 11 : Différents signaux (au repos / 2mm de tirage) et FFT du signal (tiré à 2mm)

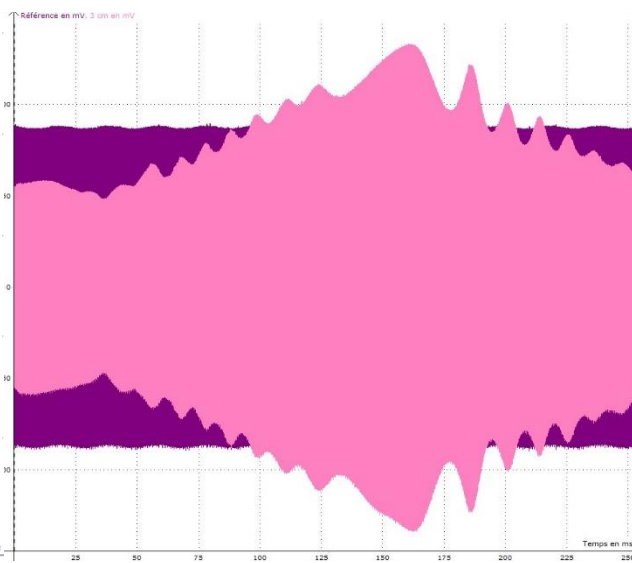
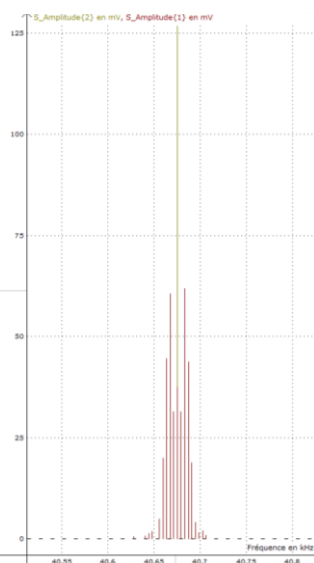


Figure 12 : Comparaison par superposition de 2 signaux par rapport au temps en violet lorsque le ressort est au repos et en rose lorsque nous avons déplacé le ressort de 3cm de sa position d'origine

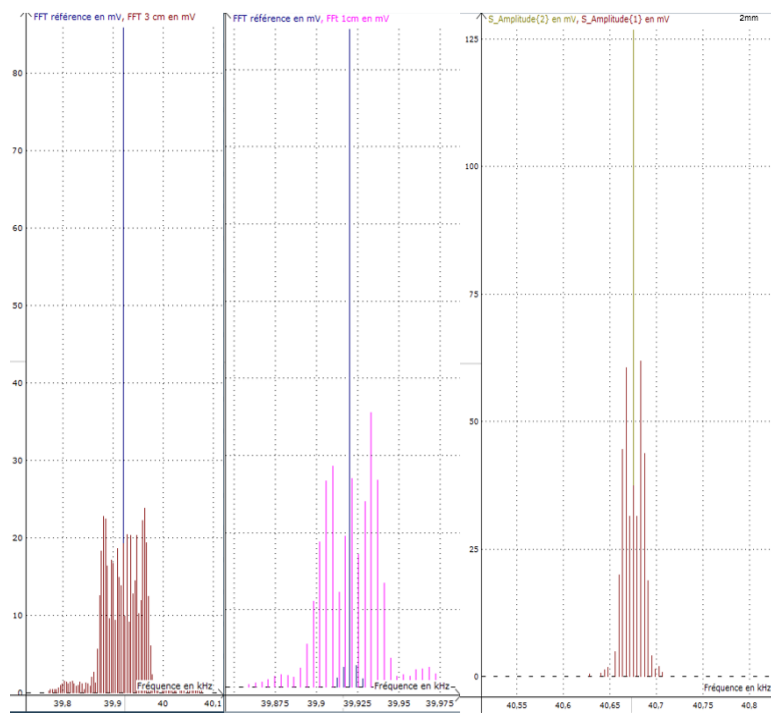


Figure 13 : FFT de 3 différents signaux (déplacé de 3cm / 1cm / 2mm)

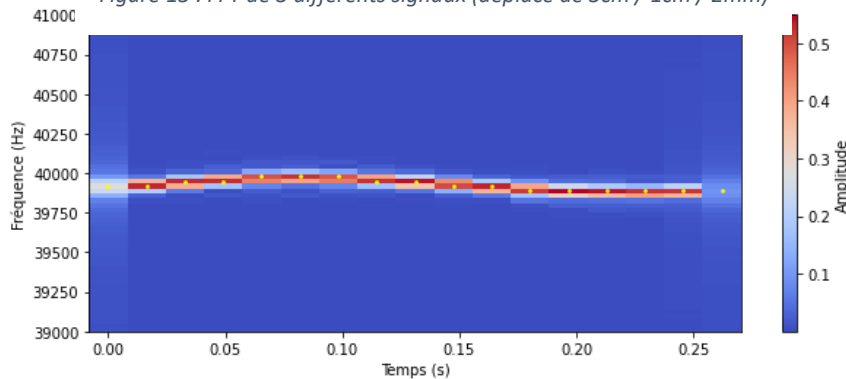


Figure 14 : Spectrogramme du signal sonore pour un déplacement initial de 3 cm

La figure 11 présente :

- En bas à gauche : le signal capté au repos
- En haut à gauche : le signal capté lorsque l'émetteur est déplacé de 2 mm
- À droite : le spectre de Fourier (FFT) du signal déplacé de 2 mm

Ici, les signaux semblent similaires visuellement, ce qui est cohérent avec un déplacement très faible (2 mm) : l'effet Doppler est alors très peu marqué. Cependant, la FFT (transformée de Fourier rapide) à droite montre déjà un léger élargissement spectral autour de la fréquence centrale ($\pm 8\text{Hz}$), traduisant la présence d'un mouvement, bien que faible.

La figure 12 illustre la superposition de deux signaux dans le domaine temporel. Le signal en rose correspond au cas où l'émetteur est déplacé de 3 cm vers le bas, provoquant un mouvement et donc un effet Doppler. Le signal en violet représente le signal de référence, enregistré lorsque le ressort (et donc l'émetteur) est au repos.

On observe une modification de l'enveloppe du signal lorsque le ressort est déplacé. Cela suggère une variation de la fréquence perçue par le récepteur, conséquence directe de l'effet Doppler : le mouvement de l'émetteur modifie la fréquence du signal capté selon qu'il se rapproche ou s'éloigne du capteur.

La figure 13 représente la FFT du signal capté lorsque l'émetteur est déplacé de 3 cm, 1cm et 2mm. On remarque une largeur de bande plus importante : $\sim 300\text{Hz}$ pour 3cm ; $\sim 100\text{Hz}$ pour 1cm ; $\sim 20\text{Hz}$ pour 2mm. Un décalage spectral par rapport au pic de référence (39921Hz) est visible, plus net qu'à 2mm. Cela reflète une variation de fréquence plus marquée, confirmant la présence d'un effet Doppler notable. En effet, un émetteur se déplaçant modifie la fréquence du signal capté : si l'émetteur se rapproche, la fréquence augmente ; s'il s'éloigne, elle diminue.

La figure 14 représente un spectrogramme, également appelé diagramme de Gabor, qui permet de visualiser l'évolution de la fréquence du signal acoustique en fonction du temps. Sur l'axe vertical, on retrouve les fréquences en Hertz, tandis que l'axe horizontal correspond au temps en secondes. La couleur indique l'amplitude du signal pour chaque fréquence à chaque instant, selon l'échelle de droite (du bleu pour les faibles amplitudes au rouge pour les plus élevées).

Ce graphique met en évidence une variation progressive de la fréquence centrale au cours du temps. On observe en effet une légère montée de fréquence au début de l'enregistrement, suivie d'une baisse progressive. Bien que ces variations restent faibles en amplitude (environ quelques centaines de Hz autour de 39921Hz), elles sont suffisamment marquées pour être détectées visuellement sur le spectrogramme.

Ce comportement traduit un changement progressif de la fréquence perçue par le récepteur, ce qui est compatible avec un mouvement d'approche puis d'éloignement de l'émetteur par rapport au capteur.

6. Interprétation et comparaison :

Après avoir réalisé les acquisitions expérimentales et développé un modèle théorique du phénomène étudié, cette partie a pour objectif de mettre en relation les résultats obtenus en pratique avec les prédictions issues de notre modélisation. L'analyse des signaux mesurés nous permet de vérifier la cohérence des phénomènes observés, comme l'effet Doppler, et d'identifier les écarts ou limites éventuelles entre la théorie idéale et les conditions expérimentales réelles. Cette comparaison est essentielle pour évaluer la validité de notre approche théorique et mieux comprendre les sources d'erreurs ou de variations.

Expérimentalement, on tire le ressort de 3cm (figure 12). On obtient le signal rose : les crêtes correspondent à la modulation d'amplitude, et l'amplitude augmente lorsque le capteur se rapproche. Cependant l'ordinateur et le logiciel Latis-Pro doit avoir une certaine latence car on voit bien qu'il manque au début de l'enregistrement la première montée du ressort une fois qu'on le lâche.

Nous avons donc essayé ensuite de reproduire le signal sur python, la forme globale est correcte même si on voit que notre modulation en amplitude est moins visible.

Pour les FFT expérimentale (figure 13, première FFT), le pic central correspond à la fréquence envoyée par le GBF, qui était de 39.92kHz, et la FFT du signal s'étale autour du pic de manière symétrique. La FFT théorique (figure 9) semble centrée également autour de 39kHz, ce qui confirme ce qu'on observe. Même si évidemment la théorie n'est là que pour soutenir nos expériences et les comparer entre eux, elle ne possède pas un rôle capital pour la suite.

Le diagramme de Gabor théorique (figure 10) est quant à lui caractéristique de l'effet Doppler : cette « sinusoïde » montre bien que nous sommes en dessous de la fréquence émise lorsque le ressort s'éloigne, puis au-dessus lorsque le ressort se rapproche.

Pour l'expérience, comme le temps d'acquisition est de 256ms, on distingue moins bien la forme de l'effet Doppler, mais la variation de fréquence est assez nette. On peut deviner le mouvement du ressort par ces fréquences enregistrées, et ainsi pouvoir calculer la vitesse de déplacement de l'objet ! Par ailleurs il a fallu trouver la précision nécessaire pour obtenir le meilleur compromis entre résolution temporelle et résolution fréquentielle pour la FFT court-terme. Une des conséquences ici est un nombre relativement petit de points, mais une bonne détection des variations de fréquence.

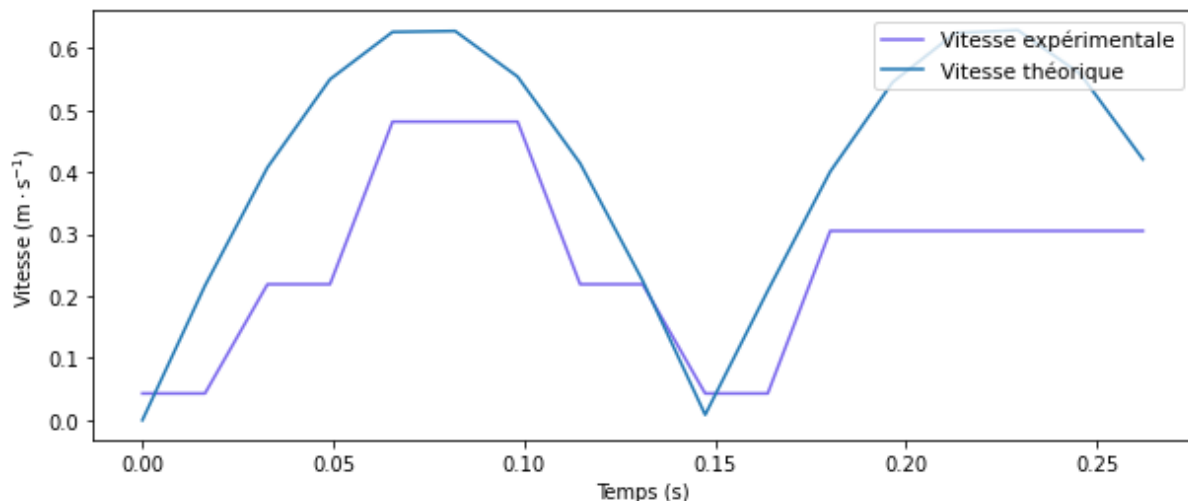


Figure 15 : Comparaison des vitesses expérimentale et théorique en valeur absolue

La figure 15 nous montre l'évolution de la vitesse théorique en fonction du temps, on peut remarquer que les maximums et les minimums correspondent avec la théorie. Etant donné le faible nombre de points, la courbe expérimentale n'est pas bien lissée. Cependant, le deuxième maximum expérimental est plus bas que le premier. Cela est probablement dû aux frottements qui ralentissent le ressort assez rapidement, et peut-être au manque de points.

7. Conclusion

Pour conclure, on peut en déduire que notre montage est vraisemblablement correct pour pouvoir étudier l'effet Doppler sur de petites différences de fréquences. Si nous devions refaire le projet, nous prendrions sûrement un ressort avec une plus grande raideur pour pouvoir accéder à de plus grandes vitesses et voir de plus grands delta différentiels qui se verraient mieux sur nos analyses python.