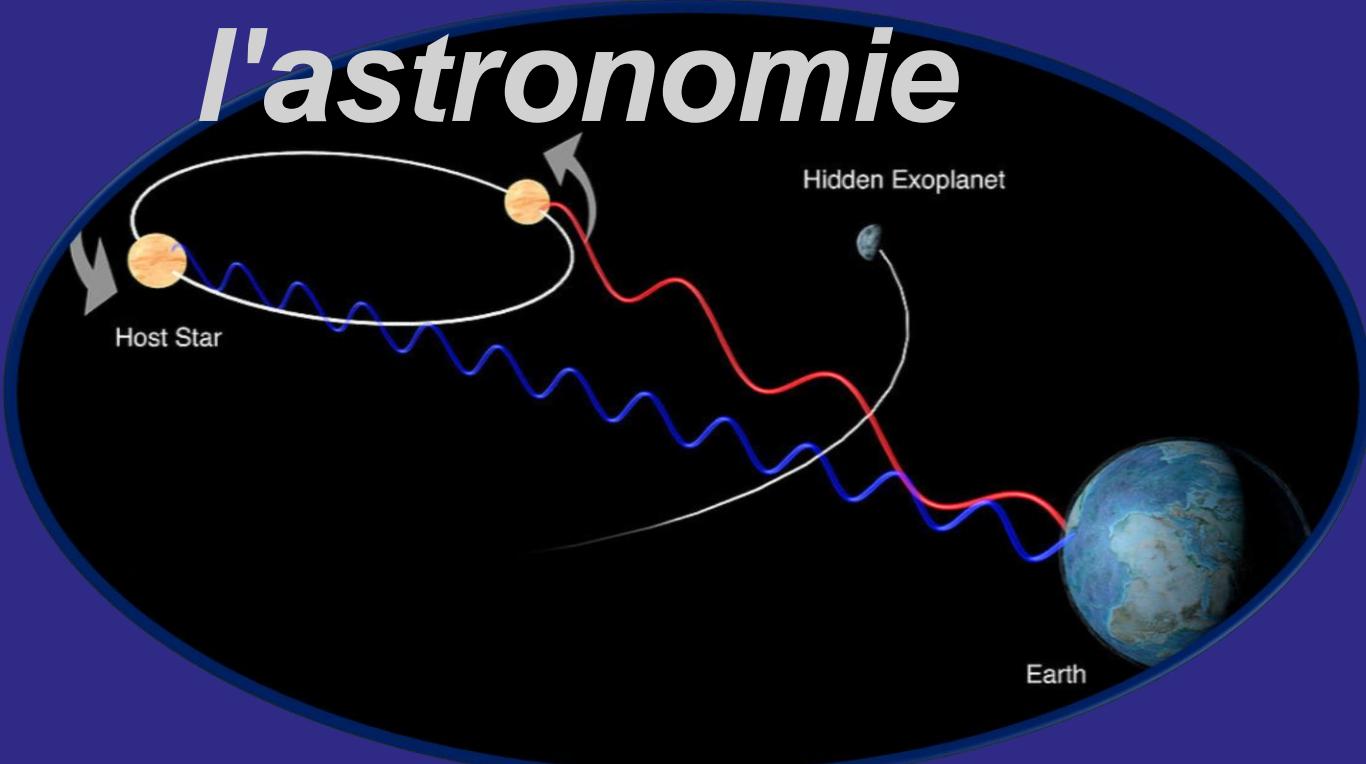


L'effet Doppler, de l'acoustique à l'astronomie



Tuteur : M. LEOPOLDES Julien

LEGER Mathieu
ELIMOUNI Widad

Remerciements

Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre profonde gratitude à Monsieur Julien Leopoldes, notre tuteur de projet, pour son encadrement, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail. Son expertise et ses orientations précieuses ont grandement contribué à la bonne conduite et à la réussite de notre projet.

Nous tenons également à remercier chaleureusement Pierre et Damien, techniciens de laboratoire, pour leur aide technique, leur soutien constant ainsi que pour la mise à disposition du matériel nécessaire à nos expérimentations. Leur réactivité et leur implication ont été des éléments essentiels au bon déroulement de nos travaux.

Table des matières

Remerciements	1
Introduction.....	3
I. Étude expérimentale de l'effet Doppler acoustique	3
1) Principe Physique de l'Effet Doppler	3
2) Objectifs expérimentaux.....	5
3) Présentations des expériences réalisées.....	6
Expérience 1 : Oscillation verticale d'une source sonore.....	6
Expérience 2 : Source sonore sur un plateau tournant motorisé	8
4) Analyse des signaux mesurés	10
5) Discussions des résultats	12
II. L'Effet Doppler appliqué à l'astronomie	16
1) L'Effet Doppler dans la lumière : décalage spectral.....	16
2) Lien avec le Redshift et l'expansion de l'Univers	17
3) Corrections relativistes.....	18
Conclusion :	19
Bibliographie	21
Annexes :.....	22

Introduction

L'effet Doppler est introduit pour la première fois en 1842 par Christian Doppler, un physicien autrichien, qui cherche à expliquer pourquoi la couleur des étoiles semble changer en fonction de leur mouvement par rapport à l'observateur. Quelques années plus tard, en 1845, le chimiste néerlandais Christoph Buys Ballot réalise une expérience sur les ondes acoustiques et confirme le phénomène décrit par Doppler, en observant le changement de fréquence du son émis par des musiciens embarqués sur un véhicule en mouvement. En 1848, Hippolyte Fizeau étend l'étude de cet effet au domaine lumineux : il propose une expérience de laboratoire pour montrer que la fréquence de la lumière varie également lorsque la source est en mouvement [1] [2].

Ces travaux ouvrent la voie à l'application de l'effet Doppler en astronomie, même si les premières observations concrètes n'ont lieu que plusieurs années plus tard. En 1871, l'astronome William Huggins parvient, en analysant la lumière d'étoiles comme Sirius, à détecter un décalage spectral. Cette découverte marque un tournant majeur : elle prouve que l'effet Doppler peut être utilisé pour étudier les mouvements des astres dans l'univers.

L'Effet Doppler est un phénomène physique correspondant à un décalage de fréquence d'une onde qu'elle soit mécanique, acoustique, électromagnétisme ou d'une autre nature. Cet effet est observé entre les mesures à l'émission et à la réception, ce décalage survient lorsque la distance entre l'émetteur (la source) et le récepteur (l'observateur) varie au cours du temps.

Ce phénomène physique s'observe très facilement dans la vie quotidienne, par exemple lorsqu'une ambulance passe à proximité : le son de sa sirène paraît plus aigu lorsqu'elle s'approche, puis plus grave lorsqu'elle s'éloigne. Ce changement de son, que l'on perçoit presque instinctivement, illustre de manière simple l'effet Doppler.

I. Étude expérimentale de l'effet Doppler acoustique

1) Principe Physique de l'Effet Doppler

Les ondes sonores ou dites acoustiques sont des ondes mécaniques progressives, et sont aussi sujettes à l'Effet Doppler dans le cas où la source et/ou le récepteur ne sont pas fixes. [8]

Prenons une source qui émet un signal acoustique comme le décrit la courbe rouge dans la figure suivante. Celle-ci se déplace par rapport à un observateur en mouvement également, donc lorsqu'elle se déplace, la longueur d'onde reçue est modifiée par la distance relative $d_s - d_o$ parcourue pendant une période relative $T_r - T_e$.

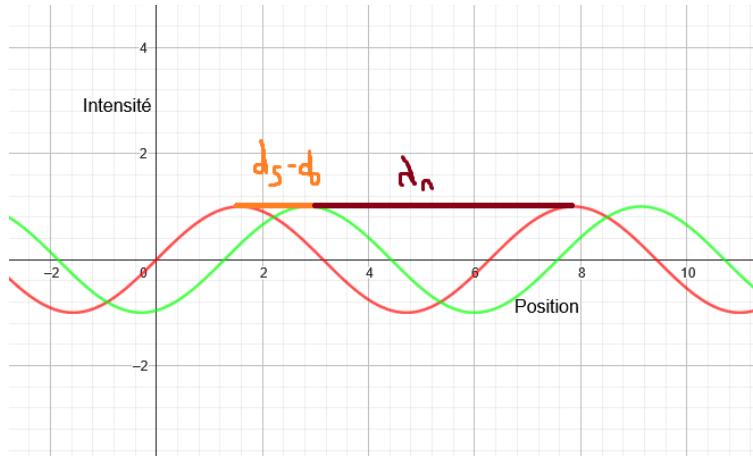


Figure 1 : Graphique expliquant le décalage fréquentiel lors du déplacement entre source et observateur

On a donc :

$$\lambda_e = \lambda_r + d_s - d_o$$

De plus :

$$d_o = v_o \cdot T_r \text{ et } d_s = v_s \cdot T_e$$

On sait également que :

$$f = \frac{c_s}{\lambda} = \frac{1}{T}$$

Ainsi, dans le cas d'une onde acoustique (défini ci-dessus) se propageant dans l'air, la fréquence f_r perçue par un observateur est reliée à la fréquence f_0 émise par la source par la relation suivante :

$$f_r = f_0 \cdot \frac{c_s - v_o}{c_s - v_r} \quad (1)$$

Avec :

- c_s : la vitesse de propagation du son dans l'air ($c_s = 331 \text{ m/s à } 20^\circ\text{C}$ [9])
- v_r : la vitesse de la source par rapport au milieu (positive si la source s'éloigne de l'observateur)
- v_o : la vitesse de l'observateur par rapport au milieu (positive si l'observateur s'éloigne de la source)

En effet les vitesses de la source et de l'observateur dépendent du milieu de propagation.
Par exemple, si la source s'approche de l'observateur, sa vitesse v_0 est négative ce qui augmente la fréquence perçue.

À l'inverse, si la source s'éloigne, sa vitesse v_r est positive, ce qui diminue la fréquence perçue.
De plus on peut interpréter ce phénomène avec la notion d'onde, lorsque la source se rapproche de l'observateur, les ondes sonores se compressent, ce qui se traduit par une fréquence perçue plus élevée (l'observateur perçoit un son plus aiguë, on a donc la relation $f_0 < f_r$). On a le phénomène inverse lorsque la source s'éloigne de l'observateur, les ondes sonores s'étirent ce qui se traduit par une fréquence perçue cette fois ci plus faible (l'observateur perçoit un son plus grave, on a donc la relation suivante : $f_r < f_0$).

Voici un schéma représentant l'explication d'une façon visuelle et précise afin de mieux comprendre le principe physique de l'effet Doppler dans différentes situations. Avec E l'émetteur (la source) qui émet une onde d'une certaine fréquence f_0 et R le récepteur (l'observateur) qui perçoit une fréquence f_r .

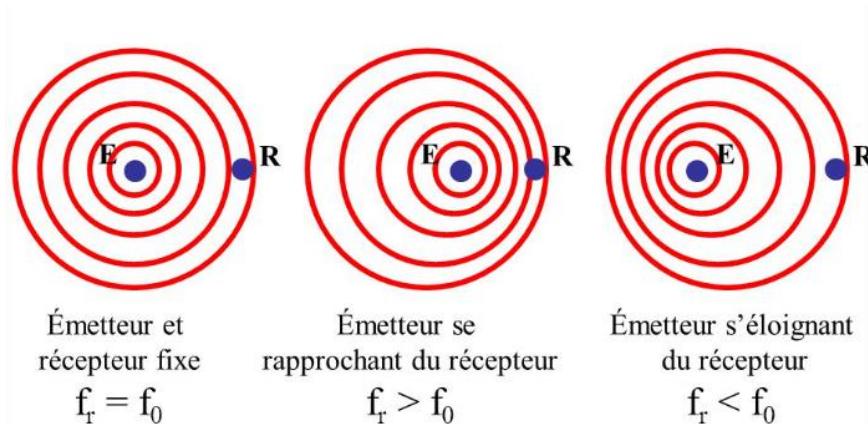


Figure 2 : Schéma représentatif de l'effet Doppler [19]

2) Objectifs expérimentaux

Dans ce projet, nous cherchons à mettre en évidence l'effet Doppler de manière expérimentale, en réalisant différentes expériences en utilisant des ondes acoustiques.

L'objectif principal est d'observer l'évolution de la fréquence d'un son perçu par un observateur en fonction du mouvement relatif entre la source sonore et l'observateur.

Le but étant donné de mesurer le décalage de fréquence lorsque la source se rapproche ou s'éloigne de l'observateur, afin de comparer ces mesures expérimentales aux résultats théoriques prévus par la formule classique de l'effet Doppler, et de vérifier leur cohérence.

Parmi les expériences mises en place, l'idée est également d'explorer différentes géométries et d'exploiter l'espace autour de nous, pour varier les configurations.

En effet cela permettra d'illustrer physiquement nos explications précédentes, notamment la compression des ondes lorsque la source s'approche et leur étirement lorsqu'elle s'éloigne.

3) Présentations des expériences réalisées

Expérience 1 : Oscillation verticale d'une source sonore

Dans cette première expérience nous avons utilisé un téléphone fourni par nos techniciens de TP, ce dernier a été utilisé comme source sonore émettant un son d'une certaine fréquence choisie. Le téléphone était suspendu à une barre métallique à l'aide d'un support et d'un ressort, de façon à pouvoir le faire osciller verticalement (de haut en bas).

Par la suite on a positionné un détecteur de signal qui était un ordinateur équipé d'un microphone intégré. Ce dernier jouait le rôle d'observateur fixe, enregistrant le son perçu au cours de l'expérience. On a placé l'ordinateur de sorte que son microphone soit situé sous le téléphone et afin d'éviter toute erreur liée à l'angle de réception et pour une meilleure optimisation de détection, l'entrée du son a été orienté de façon à bien être alignée avec la direction de propagation principale du son, et de manière à éviter toute mesure perpendiculaire.

Cette expérience est d'autant plus intéressante qu'elle permet d'étudier le mouvement du téléphone en plusieurs phases distinctes. En effet, au cours du mouvement, la vitesse du téléphone varie non seulement en fonction du temps, mais change également de direction. Par exemple, lorsque le téléphone se déplace vers le bas, il se rapproche de l'observateur, ce qui entraîne une augmentation de la fréquence perçue par l'ordinateur (effet Doppler positif). À l'inverse, lorsque le téléphone remonte vers le haut, il s'éloigne de l'observateur, provoquant une diminution de la fréquence perçue (effet Doppler négatif). De plus, le phénomène de la vitesse nulle à chaque extrémité de l'oscillation est particulièrement intéressant : c'est à ce moment que la fréquence perçue est égale à la fréquence émise, marquant ainsi la transition entre l'effet Doppler positif et négatif. Cette expérience offre donc une illustration concrète de l'effet Doppler dans un cadre où seule la source est en mouvement par rapport à un observateur fixe.

On peut représenter notre dispositif expérimental comme le schéma ci-dessous.

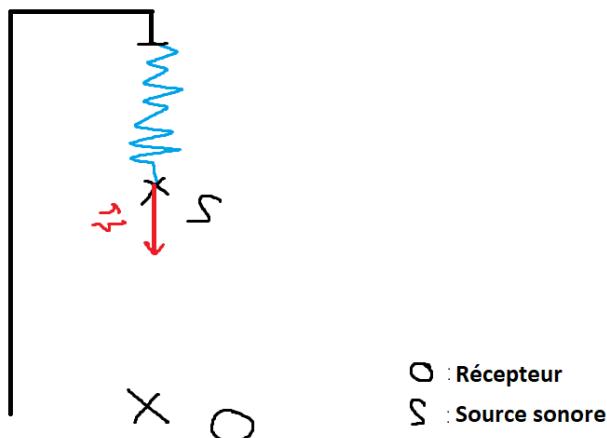


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental de l'expérience 1

On cherche à mesurer dans un premier temps la vitesse de l'émetteur par rapport au récepteur, pour faire cette analyse on commence à étudier les forces qui s'appliquent sur la source.

D'après le principe fondamental de la dynamique, on obtient l'équation différentielle suivante :

$$mg - kx = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

On peut écrire les solutions de cette équation comme :

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) + \frac{g}{\omega^2}$$

Avec $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Ainsi, on peut remonter à l'expression de la vitesse avec les conditions initiales en espace et en vitesse : $x(0) = l$ et $v(0) = 0$.

On obtient donc :

$$v(t) = \Delta l \times \sqrt{\frac{k}{m}} \times \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \times t\right)$$

Avec :

- Δl : l'allongement manuel du ressort avant de le lâcher (en m).
- k : la raideur du ressort (en N/m).
- m : la masse du téléphone et de son support (en kg).

Avant de commencer l'expérience il est nécessaire de connaître précisément la raideur de ce ressort. On analyse donc sans appliquer de force sur le téléphone ($\Delta l = 0$), ainsi on a la relation suivante grâce au principe fondamental de la dynamique (ici en statique) :

$$mg = k \times (l - lo)$$

Avec lo , l'allongement du ressort à vide et l la longueur du ressort avec la masse.

Ainsi on obtient :

$$k = \frac{mg}{(l - lo)}$$

En utilisant nos valeurs, on trouve :

$$k = 27 \text{ N.m}^{-1}$$

Maintenant, à partir de ces équations et de la relation (1), on peut aisément calculer le décalage fréquentiel théorique.

On peut effectuer un exemple, où l'on étire le ressort de 10cm avec une fréquence initiale de 500Hz.

On obtient un décalage fréquentiel de 1.2Hz, ce qui est parfaitement mesurable pour nos dispositifs.

Il est nécessaire d'ajouter une incertitude sur les mesures dû aux différentes imprécisions sur les mesures.

On obtient (avec tous les calculs en annexe) :

$$dv = v \cdot \left(\frac{d\Delta l}{\Delta l} - \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{L} \right)$$

Ainsi, on a :

$$d\Delta f = -\Delta f \cdot \left(\frac{dv}{c - v} \right)$$

Expérience 2 : Source sonore sur un plateau tournant motorisé

Dans cette deuxième et dernière expérience nous avons utilisé un dispositif en salle de TP qui est un plateau tournant motorisé constitué de deux extrémités, dont on a accroché dans une de ses deux extrémités une source sonore à l'aide d'un support de façon à que ce soit bien sécurisé. La source sonore utilisé est un téléphone qui émet un son d'une certaine fréquence choisie grâce à l'application phyphox. Nous avons d'abord placé un ordinateur à une distance définie du montage pour enregistrer le son, cependant nous avons observé que la qualité de l'enregistrement ne permettait pas une analyse précise de l'expérience. Nous avons donc placé un téléphone (iPhone de la marque Apple), en guise de récepteur grâce au dictaphone présent sur le smartphone.

De plus, pour étudier la vitesse de la source (et donc le décalage fréquentiel), il est nécessaire de calculer la vitesse de rotation ω de la platine tournante.

On installe donc, une porte de lumière, directement relié à un compteur, qui va nous indiquer la période de chaque rotation et donc par déterminer la vitesse de rotation par la relation suivante :

$$\omega = \frac{2 \times \pi}{T}$$

Avec T , la période de rotation de la platine.

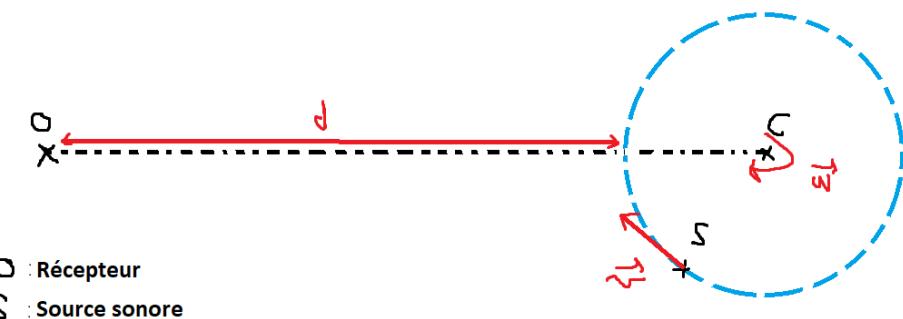


Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental de l'expérience 2

Étude théorique de l'expérience 2 :

On cherche à mesurer dans un premier temps la vitesse théorique de la source sonore capté par le récepteur, pour étudier comment varie la fréquence, et si l'effet Doppler est mesurable.
Dans un premier temps on peut facilement calculer la vitesse de la source, on sait que :

$$v = R \times \omega$$

Avec R , le rayon de la platine circulaire, on mesure : $R = 22\text{cm}$

Avec ω , la vitesse de rotation, que l'on peut calculer en fonction de la période mesurée.

Maintenant on cherche la composante de la vitesse orientée selon l'axe du récepteur avec la source, obtient ainsi :

$$v = R \times \omega \times \sin(\omega t - \varphi)$$

En faisant à présent une analyse géométrique, on obtient l'équation de la vitesse du son orientée selon l'axe récepteur-émetteur :

$$v(t) = R \times \omega \times \sin\left(\omega t - \tan^{-1}\left(\frac{R \sin(\omega t)}{d + R(1 + \cos(\omega t))}\right)\right)$$

Maintenant, on peut donc utiliser la formule du décalage fréquentiel (1) exprimée auparavant, pour avoir un aperçu du décalage fréquentiel.

Pour faire cette analyse, nous allons considérer le cas où la vitesse reçue est maximum, donc le cas où la vitesse est orientée selon l'axe du récepteur. En faisant tourner la platine, on s'aperçoit qu'elle atteint convenablement des vitesses de l'ordre de 3.5 m/s.

Ainsi en utilisant la relation (1), et en fixant la fréquence émise à 500Hz, on s'attend à trouver des décalages fréquentiels maximum de l'ordre de 5Hz, ce qui est parfaitement mesurable avec notre dispositif.

On calcule également les incertitudes liées aux imprécisions des mesures.

On obtient les formules (avec les démonstrations en annexe) :

$$dv = v \cdot \left(\frac{dR}{R} - \frac{dT}{T} \right)$$

Ainsi, on a également :

$$d\Delta f = -\Delta f \cdot \left(\frac{dv}{c-v} \right)$$

4) Analyse des signaux mesurés

Pour enregistrer le signal sonore, nous avons utilisé le logiciel Audacity (pour l'expérience 1) et le dictaphone d'un iPhone (pour l'expérience 2) placé à une distance précise de l'émetteur comme montré sur les schémas d'expérience. Une fois l'acquisition terminée on a extrait le signal sonore afin de le traiter sur Matlab [5] et d'extirper le décalage fréquentiel du son émis par le téléphone en fonction de la vitesse de ce dernier.

On obtient alors des signaux comme celui ci-dessous :

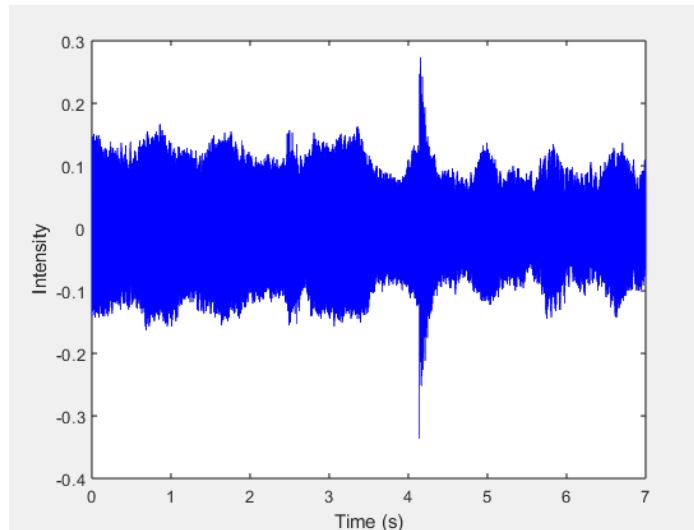


Figure 5 : Signal sonore enregistré pour une fréquence émise de 800Hz sur l'expérience 1 avec un allongement de 10cm

Lorsqu'on zoom sur le signal sonore on observe bien une forme sinusoïdale :

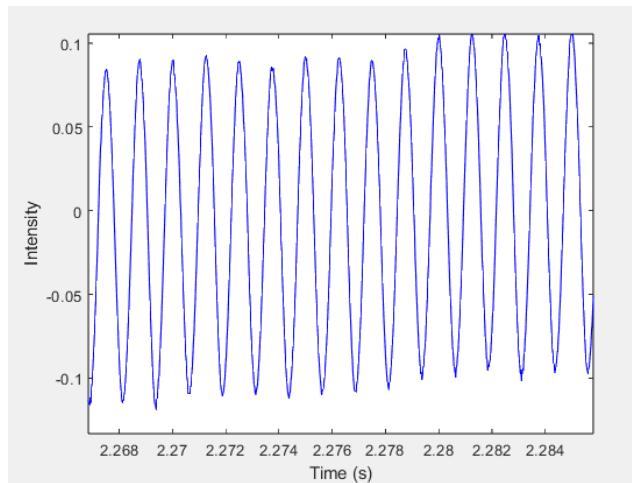


Figure 6 : Signal sonore zoomé enregistré pour une fréquence émise de 800Hz sur l'expérience 1 avec un allongement de 10cm

La première étape est de filtrer le signal sonore pour minimiser la présence de bruits parasites sur notre traitement. Nous avons donc appliqué un filtre passe-bande sur Matlab, qui ne garde que les fréquences proches de la fréquence théorique reçue calculée au préalable. Pour déterminer comment filtrer le signal, on applique une transformée de Fourier pour déterminer la fréquence fondamentale du signal. On obtient alors, la densité spectrale suivante pour le signal illustré précédemment :

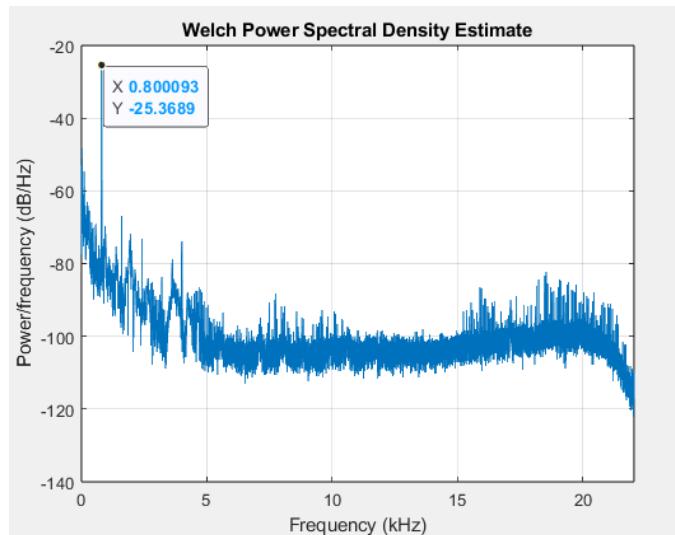


Figure 7 : Densité spectrale du signal précédent avec une fréquence fondamentale autour des 800Hz

On applique alors un filtre passe-bande (d'une fonction passe-bande dans Matlab [4]) entre les fréquences 790Hz et 810Hz pour observer les variations de fréquence relatives à l'effet Doppler pour notre expérience.

Une fois le signal filtré, nous pouvons commencer l'analyse en étudiant la variation de fréquence du signal. On a alors utilisé deux méthodes différentes pour obtenir ce décalage fréquentiel.

Premièrement nous avons traité le signal par la méthode des transformées de Fourier par fenêtre glissante, nous avons alors découper notre signal en n intervalles, puis effectuer une des transformées de Fourier sur chacun de ces intervalles grâce à la fonction "fft" de Matlab afin d'avoir un bon nombre de fréquences et permettant ainsi une analyse complète sur l'effet Doppler mesuré.

Deuxièmement nous avons appliqué une méthode plus directe sur le signal. En effet nous avons également découper notre signal en n intervalles, puis nous avons calculer la période moyenne de ces intervalles grâce à la fonction "findpeaks" [3] sur Matlab. On obtient alors :

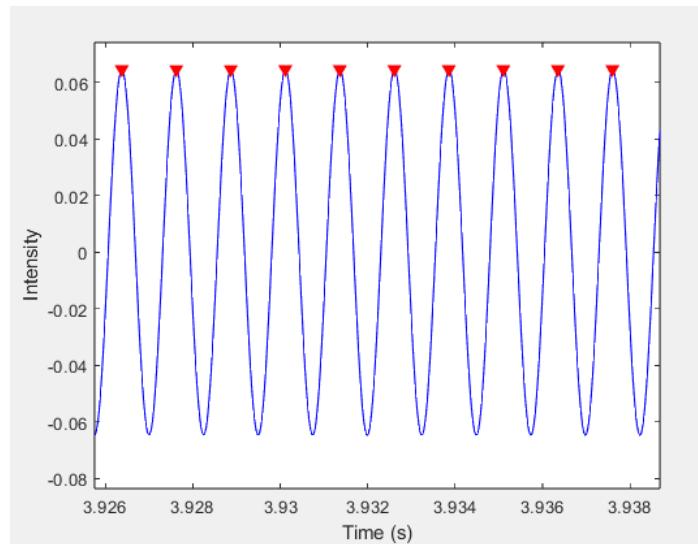


Figure 8 : Graphique du signal filtré, avec un marqueur sur tous les maximums des sinus.

On peut maintenant, prendre une période T (tel que $T = t/n$) entre deux maximum (non consécutifs), puis en déduire la fréquence moyenne sur cet intervalle grâce à la relation :

$$f = \frac{1}{T}$$

Ainsi, on obtient une liste complète de fréquence moyenne, qu'on peut alors afficher sur un graphique et le comparer avec les fréquences théoriques.

5) Discussions des résultats

Pour les deux expériences, nous avons pris plusieurs enregistrements avec des propriétés différentes. En effet, nous avons dans un premier temps changé les fréquences de la source puis changé les distances entre le récepteur et l'émetteur et enfin changé les vitesses de la source.

On trace alors sur Matlab, le décalage fréquentiel en fonction du temps, et on compare avec la courbe expérimentale calculée grâce à la relation (1) appliquée aux deux expériences.

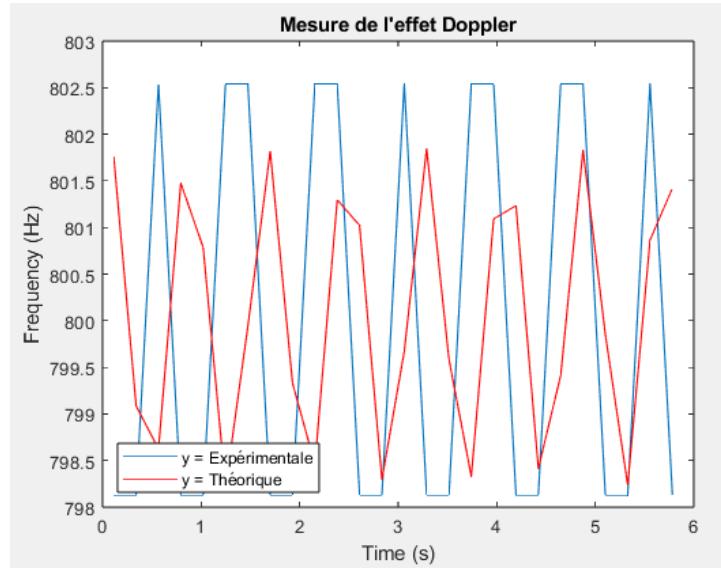


Figure 9 : Graphique représentant l'effet Doppler dans le temps sur l'expérience 1 avec une fréquence d'émission de 800Hz par la méthode de la fenêtre glissante.

Nous avons alors appliqué une fft sur le modèle théorique également, et les résultats semblent bien cohérents. Cependant, nous n'avons pas obtenu de clairs résultats avec la méthode de traitement par fenêtre glissante, comme le montre la figure précédente.

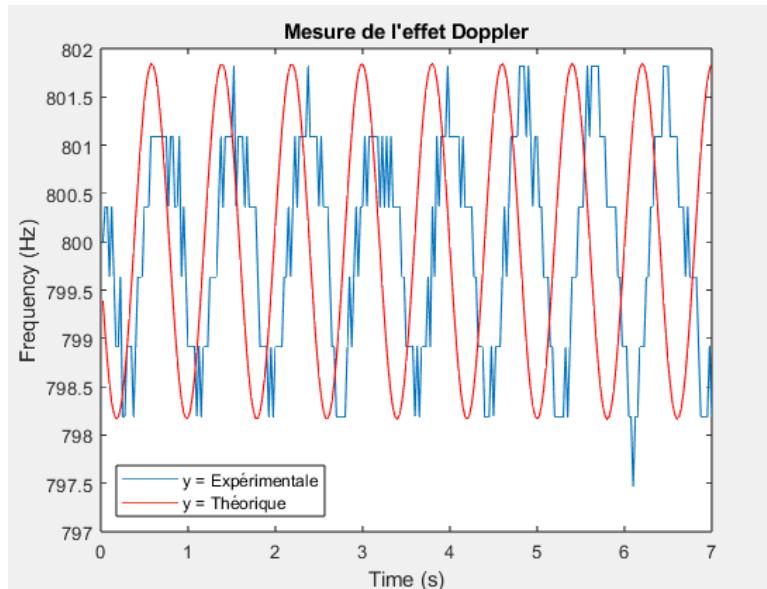


Figure 10 : Graphique représentant l'effet Doppler dans le temps sur l'expérience 1 avec une fréquence d'émission de 800Hz par la méthode “findpeaks”

Nous avons donc traité les résultats suivants par la seconde méthode, utilisant la fonction "findpeaks" de Matlab.

On remarque un décalage de phase qui s'accentue dans le temps entre les deux courbes, nous n'avons pas idée à ce jour de l'explication cette variation.

On obtient alors des courbes similaires à la figure 10 pour tous les enregistrements et on peut donc faire un graphique général comprenant deux effet Doppler mesurés sur chaque séquence (Δf maximum et Δf minimum) en comparaison avec l'effet Doppler maximum attendu.

Pour la première expérience, on obtient la série de résultat suivante :

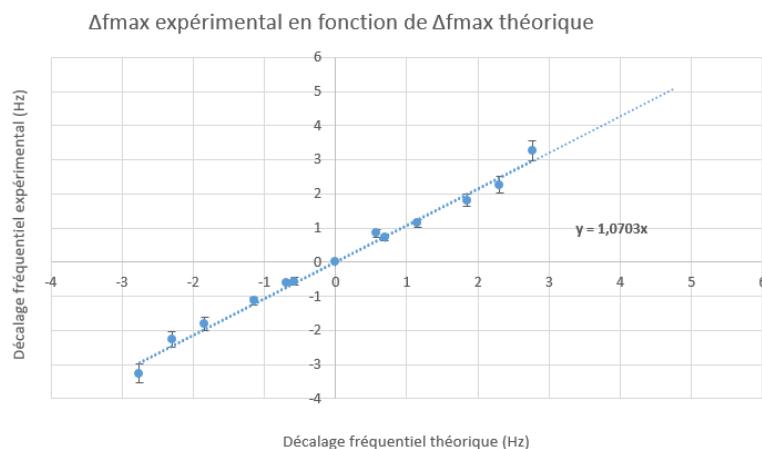


Figure 11 : Graphique représentant les effets Doppler mesurés sur la première expérience

On observe bien que la plupart des points pris avec leur incertitude respective, se situe sur la droite modèle. De plus le coefficient linéaire de cette droite est de 1.07, ce qui est proche de 1, donc on peut affirmer avoir détecter et mesurer précisément l'effet Doppler sur ces enregistrements.

Concernant la deuxième expérience, nous avons procédé à deux méthodes différentes. Pour la première méthode, où l'on enregistre le son avec le moteur de la platine allumé, on obtient la série de résultat suivante :

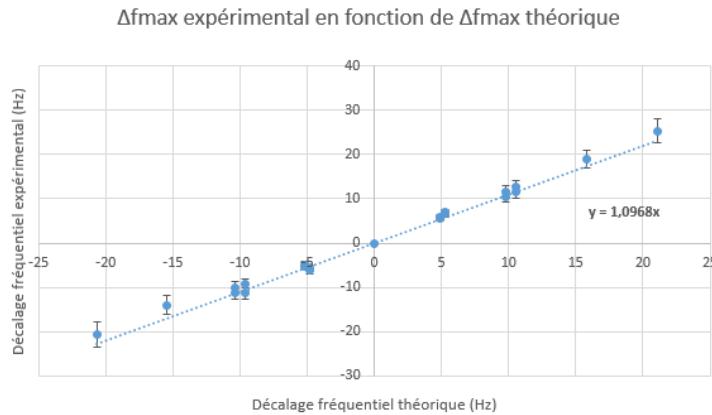


Figure 12 : Graphique représentant les effets Doppler mesurés sur la deuxième expérience avec la première méthode

On observe ici, que les valeurs mesurées avec leur incertitude sont cohérentes avec une précision semblable à la première expérience, on effet on obtient un coefficient linéaire de 1.097, ce qui est proche de 1.

Il est maintenant intéressant d'étudier l'effet Doppler lorsque le système se situe dans un régime transitoire. On peut alors procéder aux résultats de la méthode suivante, en enregistrant à l'arrêt du moteur.

On obtient alors la série de résultat :

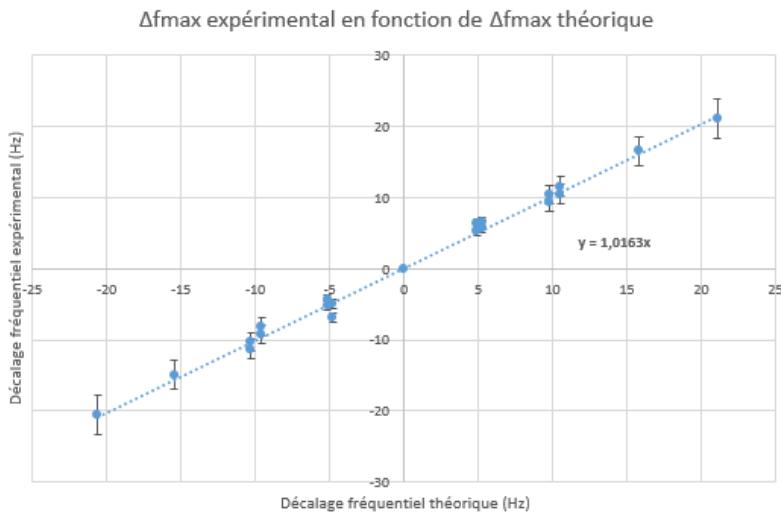


Figure 13 : Graphique représentant les effets Doppler mesurés sur la deuxième expérience avec la deuxième méthode

On observe ici, que presque toutes les valeurs théoriques prises avec leur incertitude sont cohérentes avec les valeurs théoriques. De plus le coefficient linéaire de cette droite est de 1.016, ce qui est très proche de 1, ainsi les valeurs mesurées pour l'effet Doppler sont également assez précises avec cette

méthode. Cependant, nous avons eu moins de données d'enregistrement à traiter car en effet, lors de l'arrêt du moteur, il faut prendre un faible intervalle de données pour considérer la vitesse due à l'inertie constante sur cet intervalle.

Il est alors intéressant de finir cette analyse par le graphe superposant les trois courbes de résultats expérimentaux.

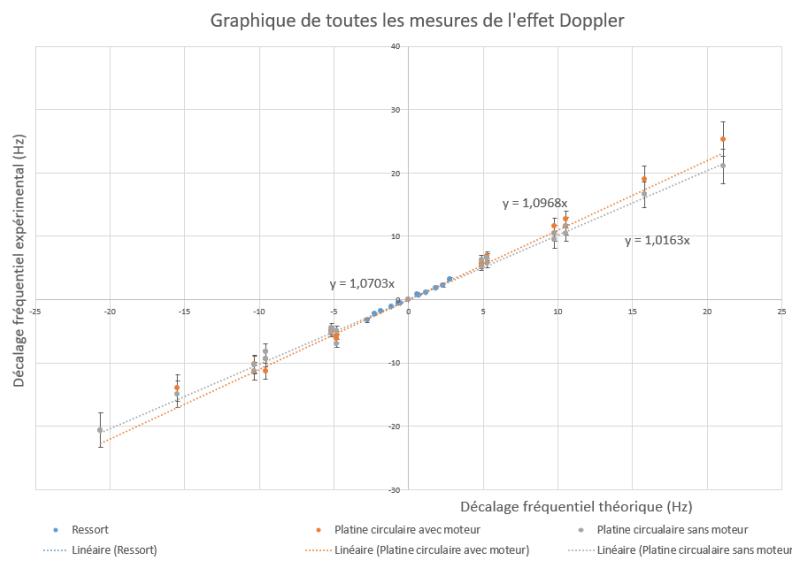


Figure 14 : Graphique général représentant les effets Doppler mesurés sur toutes les expériences

En conclusion, les trois expériences ont donné des résultats satisfaisants, on a clairement pu étudier l'effet Doppler avec un oscillateur harmonique, une platine circulaire et en régime transitoire.

II. L'Effet Doppler appliqué à l'astronomie

1) L'Effet Doppler dans la lumière : décalage spectral

Une application bien connue de l'effet Doppler dans l'astronomie est la mesure des vitesses d'éloignement ou de rapprochement des objets célestes.

En effet, on peut appliquer la relation (1) à des ondes électromagnétiques et s'intéresser cette fois-ci à un décalage de longueur d'onde, qu'on appelle le décalage spectral.

On sait que la fréquence et la longueur d'onde des ondes électromagnétiques sont reliés par la relation suivante :

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Avec c , la vitesse de la lumière, et λ la longueur d'onde de l'onde lumineuse.

En utilisant la relation (1), on peut écrire :

$$\lambda_r = \lambda_0 \times \left(\frac{c - v_s}{c - v_r} \right)$$

Avec :

- λ_r : la longueur d'onde de l'onde reçue par le récepteur
- λ_0 : la longueur d'onde émise par la source
- v_s : la vitesse de la source
- v_r : la vitesse de l'observateur

On dit alors, que lorsque l'objet céleste s'éloigne de la Terre, la lumière est décalée vers le rouge car sa longueur d'onde augmente (en considérant la vitesse de la Terre nulle puisqu'on mesure une vitesse relative pour l'objet en question). C'est ce qu'on appelle le "redshift" [18].

À contrario, on appelle le décalage vers le bleu (blueshift) quand la source se rapproche de la Terre. Pour déterminer la vitesse d'un astre, il faut donc connaître la longueur d'onde émise par la source, or on connaît bien les raies spectrales des atomes, c'est même en quelques sortes leur signature. On peut donc utiliser l'effet Doppler pour mesurer l'éloignement ou le rapprochement des astres dans notre galaxie.

C'est grâce à l'effet Doppler notamment qu'on a constaté que la galaxie la plus proche de la Voie Lactée, Andromède, se rapprochait de nous.

2) Lien avec le Redshift et l'expansion de l'Univers

Au-delà des effets observables à notre échelle, l'effet Doppler prend une tout autre dimension à l'échelle cosmologique, où il devient un instrument essentiel pour comprendre et décrire les changements et l'évolution de l'Univers.

Lorsqu'on observe la lumière de galaxies très lointaines, on remarque qu'elle est décalée vers le rouge du spectre lumineux (c'est à dire que la lumière reçue a une longueur d'onde plus grande que celle émise à l'origine), c'est ce qu'on appelle un Redshift (ou décalage spectral vers le rouge), noté z . Plus une galaxie est éloignée, plus ce décalage est important. Ce phénomène signifie que la longueur d'onde de la lumière a été étirée pendant son trajet jusqu'à nous [18].

Le décalage spectral est mesuré par la relation suivante :

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{émise}}{\lambda_{émise}}$$

Ce décalage est observé vers le rouge (décalage vers les grandes longueurs d'onde, $z>0$) ou vers le bleu (vers les courtes, $z<0$).

Avec :

- z : Redshift (sans unité)
- λ_{obs} : longueur d'onde perçue par l'observateur
- $\lambda_{\text{émise}}$: longueur d'onde émise par la source

L'expansion de l'Univers ne s'explique pas seulement avec l'effet Doppler comme pour un objet se déplaçant dans un espace-fixe [16]. En effet c'est un phénomène décrit à très grande échelle par lequel la distance entre les objets composant l'Univers (les galaxies lointaines, mas...) augmente avec le temps, non pas par leur mouvement dans l'espace vide, mais par l'espace lui-même qui se dilate pendant que la lumière voyage. C'est de ce fait que les objets célestes sont amenés à s'éloigner les uns des autres. Ce décalage vers le rouge est donc directement lié au phénomène de l'expansion de l'Univers [16]. Ce dernier est mis en évidence par Edwin Hubble au début du XXe siècle et est à l'origine du concept de Redshift cosmologique [17].

Pour expliquer ce phénomène de décalage vers le rouge cosmologique, nous faisons appel à une relation fondamentale essentielle : la loi de Hubble qui énonce que les galaxies se déplacent l'une par rapport à l'autre à une vitesse qui semble être proportionnelle à la distance qui les sépare. En d'autres termes, plus une galaxie est distante de nous, plus elle semble s'éloigner rapidement en traduisant cela par un Redshift plus grand.

La loi de Hubble qui relie la vitesse d'éloignement d'une galaxie à sa distance est :

$$v = H_0 \cdot D$$

- H_0 : constante de Hubble (donne le taux d'expansion actuel de l'Univers)
- D : distance de la galaxie à l'observateur
- v : vitesse d'éloignement de la galaxie

3) Corrections relativistes

Lorsque les vitesses relatives des objets étudiées sont proches de la vitesse de la lumière, il devient nécessaire de prendre en compte les effets relativistes. Effectivement la formule de l'effet Doppler classique doit être modifiée afin d'introduire ces corrections relativistes pour décrire de manière précise les décalages observés. Dans ces cas, la variation de fréquence perçue n'est pas seulement due au mouvement de la source par rapport à l'observateur, mais est également affectée par le temps qui se dilate, un concept fondamental dans la théorie de la relativité [10]. Ces corrections relativistes sont d'autant plus importantes dans le domaine de l'astrophysique, où les objets composants l'Univers en mouvement pouvant atteindre des vitesses significatives par rapport à celle de la lumière. [11]

Effet Doppler relativiste (les calculs sont en annexes [12] [13]) :

$$f'_r = f_0 \cdot \sqrt{\left(\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}\right)}$$

On peut dès lors, comparer cette nouvelle relation à celle de l'effet Doppler classique pour en étudier ses limites :

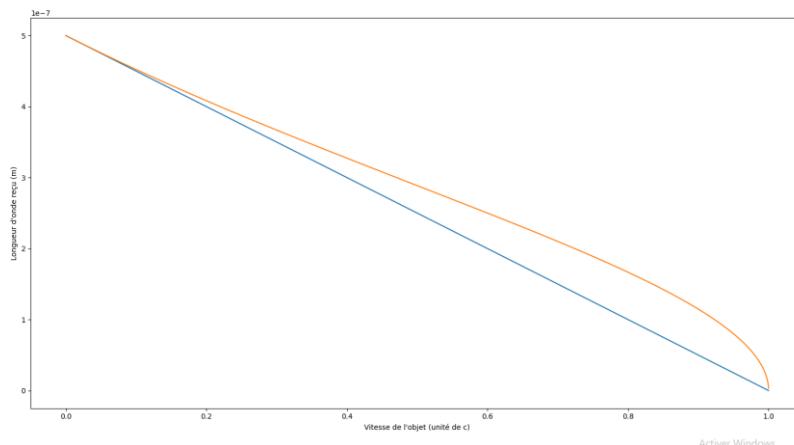


Figure 15 : Graphique comparant l'effet Doppler classique et relativiste

On constate que l'effet Doppler relativiste commence à s'observer pour des vitesses avoisinant les 10% de la vitesse de la lumière, c'est donc la limite de l'effet Doppler classique. [13]

Pour des objets à très haute vitesse [7], il est donc nécessaire d'appliquer cette correction relativiste pour déterminer leur vitesse d'éloignement ou de rapprochement.

Ce type de correction est particulièrement utile en astrophysique, notamment dans l'étude de certains systèmes binaires [6] (système astronomique regroupant deux objets de l'espace généralement des étoiles constituées d'une naine blanche orbitant autour d'une étoile compagne) [15].

La naine blanche effectuant un éloignement ou un rapprochement par rapport à la Terre, impacte son spectre lumineux subissant un décalage respectivement vers le rouge ou vers le bleu. Cette dernière ayant une vitesse orbitale non négligeable devant la vitesse de la lumière, l'Effet Doppler relativiste devient primordiale pour pouvoir étudier, expliquer précisément ces décalages spectroscopiques observés et en déduire par la suite des informations physiques sur le système, comme la vitesse orbitale ou la masse de la naine blanche [14].

Conclusion :

À travers ce projet, nous avons pu explorer de manière progressive et concrète le phénomène de l'effet Doppler, en partant d'expériences simples utilisant des ondes acoustiques, jusqu'à des

exemples issus de l'astrophysique, permettant de mettre en perspective ce phénomène à l'échelle de l'Univers. Ces travaux nous ont permis de mieux comprendre comment le mouvement relatif entre une source et un observateur peut modifier la fréquence perçue, et comment ce principe, une fois appliqué au domaine de la lumière, joue un rôle fondamental dans l'étude de l'Univers.

Les expériences menées nous ont aidés à visualiser clairement les effets de rapprochement, d'éloignement, et même de vitesse nulle, et à confronter nos résultats aux prédictions théoriques. En prolongeant cette étude avec des cas astrophysiques comme le Redshift cosmologique ou les systèmes binaires à naine blanche, nous avons aussi découvert l'importance des corrections relativistes dans l'interprétation de certaines observations.

Ce projet nous a donc offert l'opportunité de faire le lien entre théorie, pratique expérimentale et de faire le lien avec les observations astronomiques réelles, ce qui nous a permis de renforcer notre compréhension globale de la physique des ondes et de l'Univers.

Bibliographie

- [1] : Source : Wikipédia, [L'effet Doppler: cours de Tle - Physique-chimie](#) , image ([Effet doppler principe – Goulotte protection cable exterieur](#))
- [2] : [Comment fonctionne l'effet Doppler sur les ondes électromagnétiques ? – Electricity – Magnetism](#)
- [3] : <https://fr.mathworks.com/help/signal/ref/findpeaks.html>
- [4] : <https://fr.mathworks.com/help/signal/ref/bandpass.html>
- [5] : <https://fr.mathworks.com/videos/signal-processing-with-matlab-88918.html>
- [6] : <https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fid>
- [7] : <http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-id?Ident=NGC%203842>
- [8] : <https://femto-physique.fr/optique/pdf/presentation-doppler.pdf>
- [9] : <https://www.cochlea.eu/son>
- [10] : <http://www.bibnum.education.fr/sites/default/files/einstein-1905-texte.pdf>
- [11] : <https://www.youtube.com/watch?v=a5Ixw9uuqis>
- [12] : <https://www.youtube.com/watch?v=J2JK46bF9Zc&t=585s>
- [13] : [Effet Doppler relativiste — Wikipédia](#)
- [14] : [★ ÉTOILES DOUBLES OU MULTIPLES : ASTRONOMIE POUR DÉBUTANTS](#)
- [15] : [Système binaire \(astronomie\) — Wikipédia](#)
- [16] : [Expansion de l'Univers — Wikipédia](#)
- [17] : [Loi de Hubble-Lemaître — Wikipédia](#)
- [18] : [Décalage vers le rouge — Wikipédia](#)
- [19] : <https://facmed.univ-constantine3.dz/wp-content/uploads/2021/11/RADIOLOGIE-UEI-1-G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s-et-principes-de-l%E2%80%99imagerie-ultrasonographique-Dr-Benmamar.pdf>

Annexes :

Calcul de vitesse théorique pour la platine circulaire :

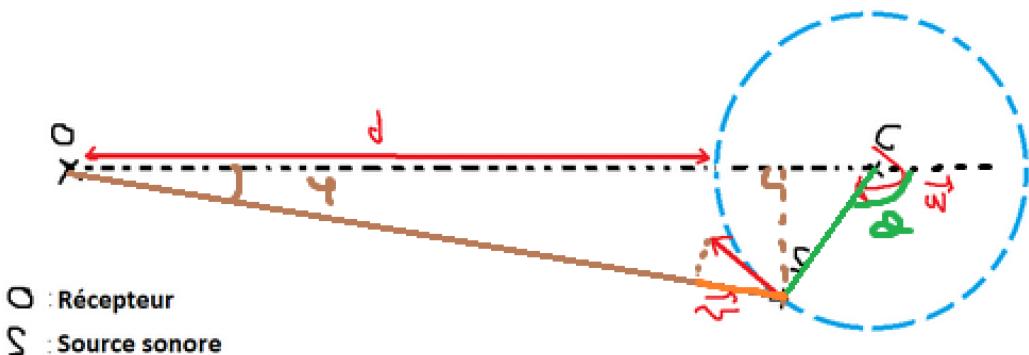


Figure 16 : Schéma du montage 2

On cherche à calculer la composante de la vitesse sur l'axe observateur-source (la partie orange sur le graphique).

On s'aperçoit géométriquement que :

$$v = R \cdot \omega \cdot \sin(\theta - \varphi)$$

De plus, on peut écrire :

$$\theta(t) = \omega \cdot t$$

On peut voir également :

$$\tan(\varphi) = \frac{R \cdot \sin(\theta)}{d + R \cdot (1 + \cos(\theta))}$$

Ainsi, on retrouve bien l'équation :

$$v(t) = R \times \omega \times \sin\left(\omega t - \tan^{-1}\left(\frac{R \sin(\omega t)}{d + R(1 + \cos(\omega t))}\right)\right)$$

Calculs d'incertitudes :

Pour l'expérience 1, on quantifie les incertitudes de mesures de la façon suivante.

On a : $dm = 0.001\text{kg}$, dl (à vide) = 0.005m , et $d\Delta l = 0.01\text{m}$ et $l = L - l_0$

On peut donc calculer l'incertitude sur la raideur du ressort dk on a :

$$\ln(k) = \ln(gm) - \ln(l)$$

Ainsi :

$$\frac{dk}{k} = \frac{dm}{m} - \frac{dl}{l}$$

On calcule maintenant l'incertitude sur la vitesse dv :

$$\ln(v) = \ln(\Delta l) + \frac{1}{2} \cdot (\ln(k) - \ln(m))$$

On se retrouve bien donc avec :

$$dv = v \cdot \left(\frac{d\Delta l}{\Delta l} + \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{dl}{l} \right) \right)$$

Ainsi, on peut finir par calculer l'incertitude sur le décalage de fréquence d'après la relation (1), on a :

$$\ln(\Delta f) = \frac{1}{\ln(c - v)}$$

Donc :

$$d\Delta f = \Delta f \cdot \left(-\frac{dv}{(c - v)} \right)$$

Pour l'expérience 2, on a les incertitudes sur le rayon R et sur la période T, on peut fixer les valeurs à : dR = 0.005m et dT = 0.005s

Ainsi, on a :

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T}$$

Donc :

$$\ln(v) = \ln(2 \cdot \pi) + \ln(R) - \ln(T)$$

Alors, on peut calculer l'incertitude sur la vitesse dv :

$$dv = v \cdot \left(\frac{dR}{R} - \frac{dT}{T} \right)$$

Scripts Matlab :

```
%%% FILTRAGE ACOUSTIQUE SUR RESSORT

%Constantes expérimentales
l=0.10; %allongement du ressort (m)
kr=27; %raideur du ressort (N/m)
m=0.441; %masse du téléphone sur le ressort (kg)
cs=340; %célérité du son dans l'air (m/s)
f=300; %fréquence émise par la source (Hz)

%Enregistrement de l'audio
[son,Fe]=audioread('A10et300Hz.wav'); % Fe est la fréquence d'échantillonage
son = son(8*Fe+220500:220500+15*Fe,1); % SonMono
%sound(son,Fe)
N = length(son); % le nombre de points du signal
Te = 1 / Fe; % durée entre deux échantillons
t = 0:Te:(N-1)*Te;

%Affichage de l'audio et de Fe
%figure
%plot(t,son,"b")
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Intensity')
% display(Fe)

%Densité spectrale de puissance
%figure
%pwelch(son,[],[],[],Fe); % Fonction de densité spectrale
%hold off

%Application du filtre adapté
xfilter=filter(passebande,son); % Choix du filtre
%figure
%pwelch(xfilter,[],[],[],Fe); % Fonction de densité spectrale
%hold off

%Affichage de l'audio filtré
%figure
%sound(xfilter,Fe)
%plot(t,xfilter,'b')
% xlabel('Time (s)')
% ylabel('Intensity')
% hold on

%Calcul et affichage de la courbe expérimentale (bleue)
n=20 ; % nombre d'intervalle de Te
[y,x]=findpeaks(xfilter);
%plot(t(x),y,'vr','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',6)
for k=1:floor((length(x)/n))
    a=k*n;
    x1(k)=x(a);
end
cycles=diff(t(x1));
freq=n./(cycles);
freq=[f,freq];
figure
plot(t(x1),freq)
title("Mesure de l'effet Doppler")
xlabel('Time (s)')
ylabel('Frequency (Hz)')
hold on

%Calcul et affichage de la courbe théorique (rouge)
v=1*sqrt(kr/m)*sin(sqrt(kr/m).*t(x1)+3.3);
delta=(f.*v./ (cs-v))';
plot(t(x1),delta+f,'r')
legend({'y = Expérimentale','y = Théorique'},'Location','southwest')
clearvars
```

Figure 17 : Script Matlab sur le filtrage du son de l'expérience 1 (méthode "findpeaks")

```
%% FILTRAGE ACOUSTIQUE SUR PLATINE CIRCULAIRE

%Constantes expérimentales
R=0.22; %rayon de la platine (m)
d=3; %distance du récepteur au bord de la platine circulaire (m)
T=0.39; %période de rotation de la platine circulaire (s)
w=2*pi/T; %vitesse de rotation de la platine (rad/s)
cs=348; %vitesse du son dans l'air (m/s)
f=1500; %fréquence émise par la source (Hz)

%Enregistrement de l'audio
[son,Fe]=audioread('décelération-f_1500Hz-d_300cm-T_0_39s.wav'); % Fe est la fréquence d'échantillonage
son = son(1:Fe:4*Fe,1); % SonMono
%sound(son,Fe)

N = length(son); % le nombre de points du signal
Te = 1 / Fe; % durée entre deux échantillons
t = 0:Te:(N-1)*Te;

%Affichage de l'audio et de Fe
%figure
%plot(t,son,"b")
display(Fe)

%Densité spectrale de puissance
%figure
%pwelch(son,[],[],[],Fe); % Fonction de densité spectrale
%hold off

%Application du filtre adapté
xfilter=filter(passebande,son); % Choix du filtre
%figure
%pwelch(xfilter,[],[],[],Fe); % Fonction de densité spectrale
%hold off

%Affichage de l'audio filtré
%figure
%sound(xfilter,Fe)
%plot(t,xfilter,'b')
%hold on

%Calcul et affichage de la courbe expérimentale (bleue)
n=20 ; % nombre d'intervalle de Te
[y,x]=findpeaks(xfilter);
%plot(t(x),y,'vr','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',6)
for k=1:floor((length(x)/n))
    a=k*n;
    x1(k)=x(a);
end
cycles=diff(t(x1));
freq=n./cycles;
freq=[f,freq];
figure
plot(t(x1),freq)
title("Mesure de l'effet Doppler")
xlabel('Time (s)')
ylabel('Frequency (Hz)')
hold on

%Calcul et affichage de la courbe théorique (rouge)
v=R*w*sin(w.*t(x1))-atan((R*sin(w.*t(x1))/d+R*(1+cos(w.*t(x1)))))-3.5;
delta=(f.*v./(cs-v))';
plot(t(x1),delta+f,'r')
legend({'y = Expérimentale','y = Théorique'},'Location','southwest')
clearvars
```

Figure 18 : Script Matlab sur le filtrage du son de l'expérience 2 (méthode "findpeaks")

```

function Hd = passebande
%PASSEBANDE Returns a discrete-time filter object.

% MATLAB Code
% Generated by MATLAB(R) 24.2 and Signal Processing Toolbox 24.2.
% Generated on: 21-Feb-2025 00:03:26

% Chebyshev Type I Bandpass filter designed using FDESIGN.BANDPASS.

% All frequency values are in Hz.
Fs = 48000; % Sampling Frequency

N      = 12;    % Order
Fpass1 = 1450; % First Passband Frequency
Fpass2 = 1550; % Second Passband Frequency
Apass  = 1;     % Passband Ripple (dB)

% Construct an FDESIGN object and call its CHEBY1 method.
h = fdesign.bandpass('N,Fp1,Fp2,Ap', N, Fpass1, Fpass2, Apass, Fs);
Hd = design(h, 'cheby1');

% [EOF]

```

Figure 19 : Script de la fonction passe-bande utilisée sur Matlab

Graphiques de l'effet Doppler mesuré :

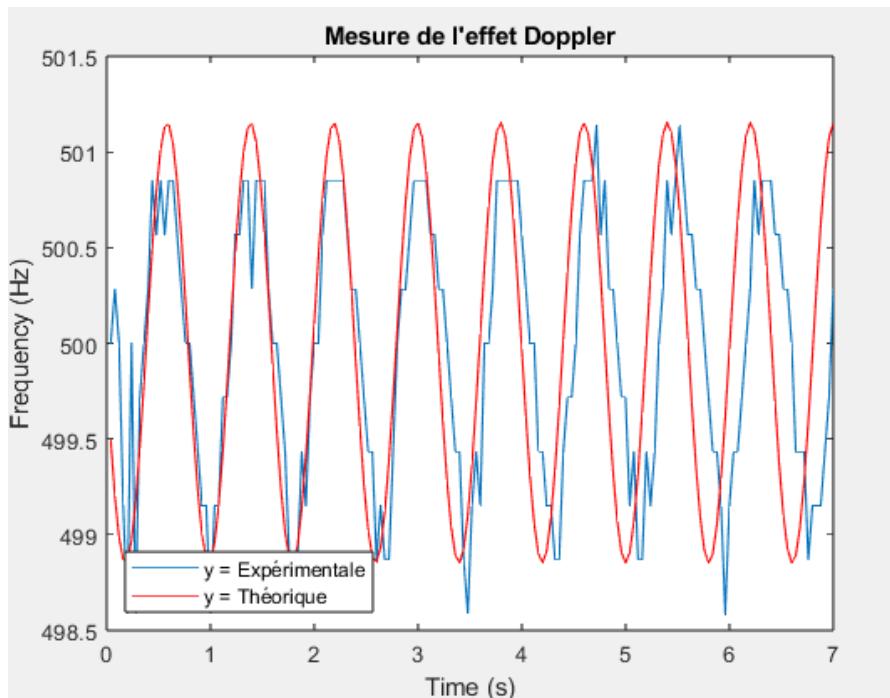


Figure 20 : Graphique mesurant l'effet Doppler sur l'expérience 1 avec une fréquence émise de 500 Hz

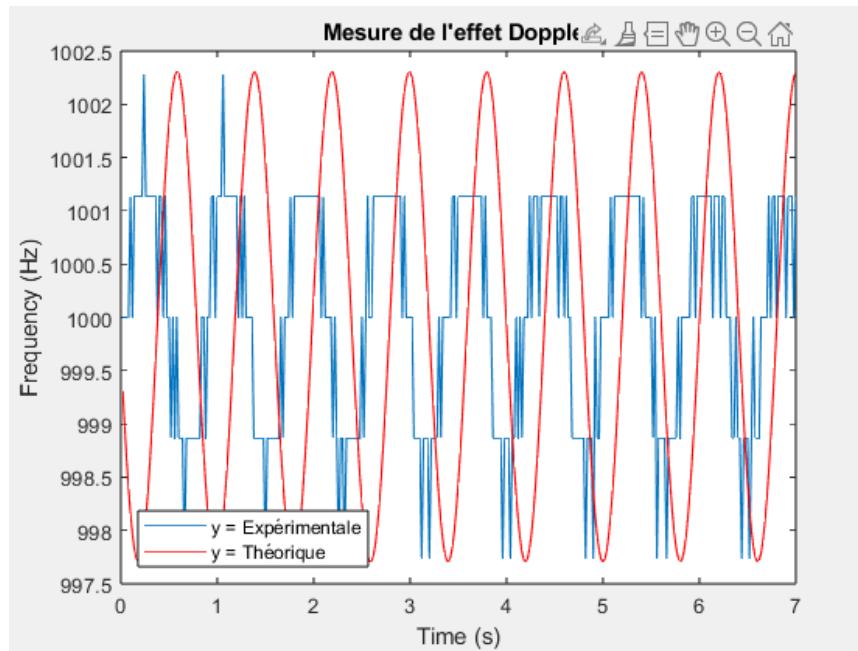


Figure 21 : Graphique mesurant l'effet Doppler sur l'expérience 1 avec une fréquence émise de 1000 Hz

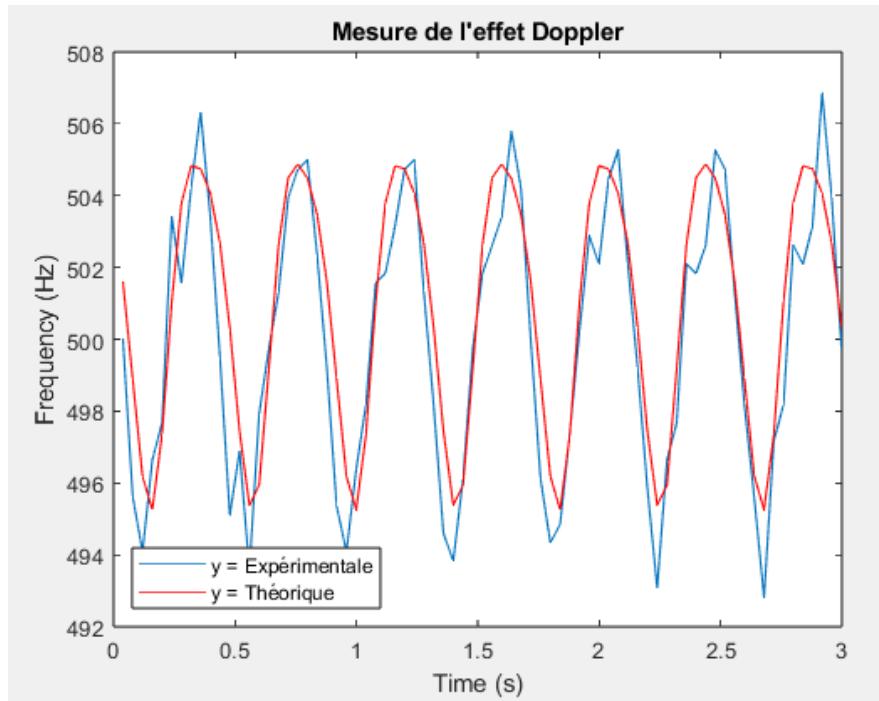


Figure 22 : Graphique mesurant l'effet Doppler sur l'expérience 2 avec une fréquence émise de 500 Hz

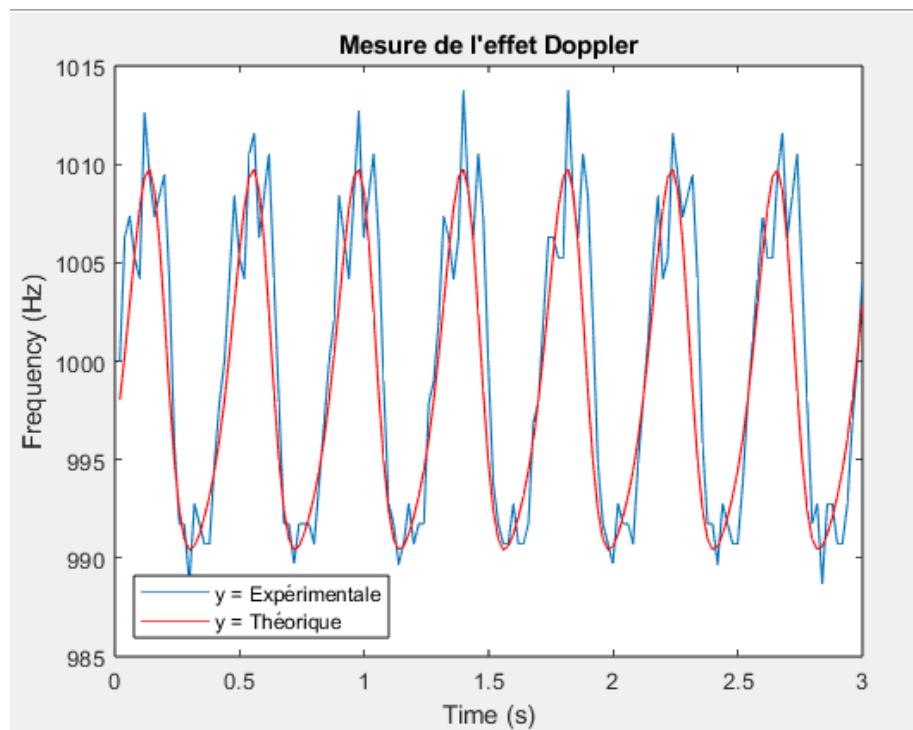


Figure 23 : Graphique mesurant l'effet Doppler sur l'expérience 2 avec une fréquence émise de 1000 Hz

Calcul relativiste :

On peut appliquer la dilatation du temps, pour calculer la fréquence reçue relativiste :

Ainsi on a :

$$f'_r = \frac{f_r}{\gamma}$$

Avec :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Donc :

$$f'_r = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \cdot f_r$$

Avec l'équation 1, on obtient :

$$f'_r = f_0 \cdot \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{v}{c}\right)\left(1 + \frac{v}{c}\right)}}{1 - \frac{v}{c}}$$

On met en forme pour obtenir l'équation de l'effet Doppler relativiste :

$$f'_r = f_0 \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

ELIMOUNI Widad

Contribution personnelle au projet disciplinaire.

Chronologie du projet :

10/10/2024

Demande d'encadrement
auprès de notre tuteur
M.Leopoldes, après réflexion
de notre sujet de projet.



21/10/2024

Premier rendez-vous avec
notre tuteur, échange sur les
pistes de travail et sur le
cadrage du projet.



30/01/2025

Elaboration de la structure
et des plans de travail,
exploration des différentes
approches méthodologiques.



10/02/2025

Calcul et prédictions théoriques
préalables aux expériences.



20/02/2025

Premier rendez-vous en salle
de TP avec notre tuteur et
techniciens de laboratoire.



24/02/2025

Début du traitement de signal
sous MATLAB : explorations de
différentes méthodes d'analyse.



27/02/2025

Premières courbes et
résultats, comparaison avec
les prédictions théoriques.



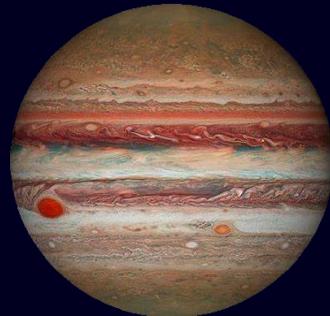


13/03/2025

Explications du tuteur et clarification des méthodes de traitement de signal :
Méthode spectrale et méthode Transformée de Fourier à fenêtre glissante.

15/03/2025

Réflexion sur le décalage vers le rouge (Redshift) et partie Effet Doppler-Fizeau avec exploitation des données issus de la littérature.



25/03/2025

Réalisation de la page de couverture du projet.



10/04/2025

Rendez-vous en salle de TP début de la deuxième expérience (installation), calculs théoriques avec les différents paramètres de l'expérience.



27/04/2025

Mise en forme et rédaction complète de la structure du rapport avec toutes les idées.



08/05/2025

Modification des détails du rapport suite aux remarques de notre tuteur
Début du diaporama (oral).

Durant mon projet, j'ai pu réinvestir certaines notions et compétences acquises au cours de ma licence, notamment en physique des ondes (spectres de fréquence, phénomènes de propagation...), en mécanique classique et en physique relativiste (effet Doppler relativiste).

Les nombreux travaux pratiques réalisés au cours de ces trois dernières années m'ont également permis de mieux gérer l'analyse et l'exploitation des données expérimentales. En effet, cela nous a ensuite permis de comparer l'approche théorique à l'approche expérimentale.

Enfin, les différents comptes rendus réalisés rigoureusement durant ma licence m'ont permis d'acquérir des compétences en rédaction scientifique, qui m'ont aidé à produire un rapport clair et structuré.

En complément de ces acquis réinvestis, ce projet m'a également permis de renforcer et d'approfondir plusieurs compétences. Ma compréhension de la relativité restreinte et du Redshift s'est précisée par rapport à ce qui avait été abordé en cours.

J'ai également pu développer mes compétences sur MATLAB, en particulier pour le traitement temporel et fréquentiel des signaux, qui constituait un aspect central du projet. Ce projet, par l'ampleur du travail qu'il a nécessité, m'a aussi permis de renforcer ma capacité à collaborer efficacement en binôme, en répartissant les tâches et en discutant des résultats à chaque étape. Le travail mené avec mon binôme, LEGER Mathieu, a été particulièrement efficace : notre complémentarité, développée au fil des séances de TP tout au long de l'année, a grandement contribué à la réussite de ce projet.

De plus, un travail de recherche bibliographique a été nécessaire tout au long du projet, avec des recherches approfondies sur des exemples d'application de l'effet Doppler-Fizeau, comme les naines blanches ou l'expansion de l'Univers.

À l'aide de cette recherche bibliographique, j'ai également pu élaborer un plan de projet et définir une problématique pertinente.

En conclusion, ce projet m'a permis de développer de nouvelles compétences qui seront précieuses pour mes futurs projets en physique. Il m'a donné un véritable avant-goût de la recherche, tout en me permettant de mettre en pratique mes connaissances théoriques dans un cadre stimulant, en lien avec mon intérêt pour la physique fondamentale et l'astrophysique.

BILAN PERSONNEL CHRONOLOGIQUE

LEGER MATHIEU



10/10/2024

Demande d'encadrement de notre projet disciplinaire auprès de M.Leopoldes.



21/10/2024

Premier rendez-vous avec notre tuteur de projet pour discuter de notre projet et de nos objectifs.



30/01/2025

Mise en structure complète du projet.



06/02/2025

Deuxième rendez-vous avec notre tuteur de projet pour discuter des possibilités différentes d'expérience.



08/02/2025

Début des calculs théoriques pour anticiper sur nos expériences en laboratoire.



20/02/2025

Premier rendez-vous pour la réalisation de notre première expérience en salle de TP avec les techniciens de laboratoire et notre tuteur.



21/02/2025

Début du travail sur la création de script Matlab pour analyser nos données.



27/02/2025

Finition des scripts Matlab et analyse des premières données d'expérience.



13/03/2025

Explication avec notre tuteur pour différentes analyses du signal possibles (transformée de Fourier à fenêtre glissante)



10/04/2025

Mise en place et réalisation de la deuxième expérience en salle de TP et écriture du rapport



07/05/2025

Envoie d'une première version de notre rapport à notre tuteur.



12/05/2025

Envoie du rapport terminé.

Bilan des compétences utilisées et développés lors de ce projet :

Lors de ce projet disciplinaire, j'ai pu mettre en pratique plusieurs connaissances apprises durant ces trois années de licence. En commençant par l'étude préliminaire, j'ai pu utiliser les différents cours de mécanique (classique et relativiste) pour étudier en amont de l'expérience, les différentes valeurs théoriques attendues.

De plus, j'ai pu utiliser les compétences apprises pour traiter des données grâce à des logiciels de programmation comme Matlab ou python, puis j'ai su quantifier le domaine de validité de nos mesures par le biais des calculs d'incertitudes.

En outre, le bagage théorique général apporter par cette licence m'a permis de conclure ce projet par la présentation des résultats en les comparant de façon rigoureuse avec la théorie.

Enfin, tous les comptes rendus réalisés durant cette licence m'ont développés de solides compétences pour la présentation de rapport scientifique, ce qui m'a particulièrement été utile dans le cadre de la rédaction de ce projet.

Durant la réalisation de ce projet, j'ai eu l'occasion de développer certaines compétences. En effet j'ai du apprendre à imaginer un dispositif expérimental qui soit compatible avec le matériel disponible dans les salles de TP, puis rédiger un protocole et enfin mettre en place l'expérience souhaitée.

De plus j'ai du renforcer ma qualité de travail notamment sur des logiciels de programmation, pour traiter de façon efficaces les différents signaux acoustiques enregistrés.

Enfin, la quantité de travail de ce projet, m'a appris à travailler de façon efficace et complémentaire avec mon binôme ELIMOUNI Widad, notamment sur la gestion et la répartition du travail, ce qui est la clé essentiel de l'avancée du projet.

Pour conclure, ce projet m'a permis de mettre en pratique et de développer plusieurs compétences acquises tout au long de la licence, ce qui est de bonne augure pour mes projets futures. Enfin, j'ai surtout pu apprendre énormément grâce aux différentes recherches bibliographiques, et toute la réflexion ainsi que toute la réalisation de ce projet m'a conforté dans ma passion pour poursuivre dans la recherche scientifique.