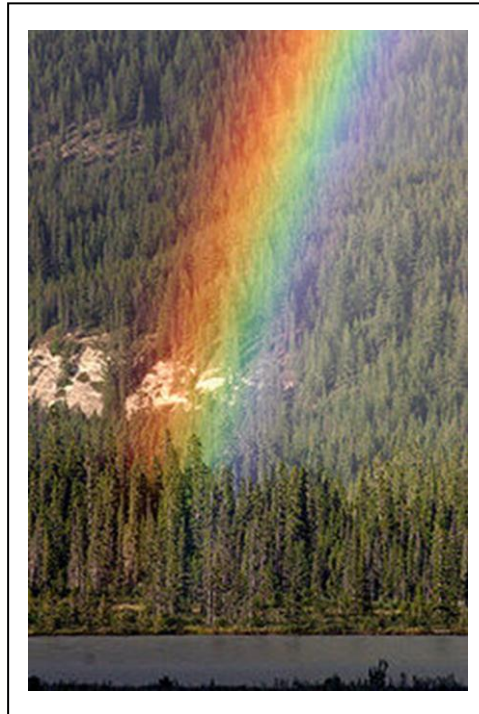


*Projet de Physique P6-3*  
*STPI/P6-3/2012 – 27*

**Simuler le phénomène de dispersion des ondes  
(acoustiques et lumineuses)**



**Etudiants :**

**Yousra BOUMHINI**

**Martin GABORIT**

**Imane STITOU**

**Antoine De KERAUTEM**

**Laetitia SAUER**

**Meng ZHANG**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Jerôme YON**



Date de remise du rapport : **18/06/2012**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2011 – 27**

Intitulé du projet : **Simuler le phénomène de dispersion des ondes (acoustiques et lumineuses)**

Type de projet : **Bibliographie/Modélisation**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

**Étudier le phénomène de dispersion et comprendre la théorie. Réaliser un programme permettant de modéliser le phénomène de dispersion des ondes sonores, et ainsi qu'une expérience permettant de mettre en évidence le phénomène de dispersion des ondes lumineuses.**

Mots-clefs du projet (4 maxi) : **dispersion, Fourier, ondes, absorption**

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction .....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail .....	5
3. Travail réalisé et résultats .....	7
3.1. Explication théorique du phénomène de dispersion des ondes .....	7
Qu'est-ce que la dispersion ? .....	7
3.2. Phénomène de dispersion des ondes lumineuses .....	8
3.2.1. Expérience : .....	8
3.2.2. Observations .....	9
3.2.3. Analyse .....	9
3.3. Phénomène de dispersion des ondes acoustiques .....	11
3.3.1. Étude du phénomène de dispersion à travers la réalisation d'un programme ..	11
3.3.2. Résultat et analyse du programme .....	13
3.3.3. L'Absorption .....	15
4. Conclusions et perspectives .....	16
5. Bibliographie .....	17
6. Annexes .....	18
6.1. Documentation technique .....	18
6.2. Listings des programmes réalisés .....	18
6.3. Propositions de sujets de projets (en lien ou pas avec le projet réalisé) .....	23

## 1. INTRODUCTION

Nous avons travaillé ce semestre sur le phénomène de dispersion des ondes. Ainsi, dans un milieu dispersif, la vitesse des ondes dépend de sa fréquence. Ce phénomène présent dans la nature reste peu visible, à l'exception des arcs-en-ciel, qui mettent en évidence la dispersion de la lumière dans l'eau. Cependant, il est beaucoup plus difficile de mettre en évidence la dispersion des ondes sonores dans notre vie quotidienne. En effet, l'air n'est presque pas un milieu dispersif, ainsi nous ne pouvons entendre que très faiblement cette dispersion, dans une atmosphère très humide par exemple. De plus la dispersion est souvent accompagnée d'autres phénomènes tels que l'absorption ou l'atténuation.

Après avoir effectué de nombreuses recherches bibliographiques, nous avons donc décidé de séparer notre travail en trois parties. Tout d'abord, nous avons réalisé une expérience pour expliquer et mettre en évidence le phénomène de dispersion des ondes lumineuses. Le phénomène de dispersion acoustique a ensuite été modélisé puis programmé afin de simuler ce phénomène sur un fichier son. Enfin nous nous sommes intéressés également au phénomène d'absorption des ondes.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Au départ, nous avons tous des notions sur le phénomène de la dispersion de la lumière, puisque nous avons eu l'occasion de l'étudier dans le cadre de l'EC P4. Cependant, la dispersion du son nous était peu connue. C'est pour cela que, dans un premier temps, nous avons commencé par une phase de documentation sur le phénomène qui nous a, par la suite, menée vers une répartition des tâches en 2 sous-groupes :

-Imane STITOU et Meng ZHANG se sont chargées de réaliser l'expérience mettant en évidence le phénomène de la dispersion de la lumière.

-Laetitia SAUER, Antoine DE KERAUTEM, Martin GABORIT et Yousra BOUMHINI se sont intéressés à la dispersion du son.

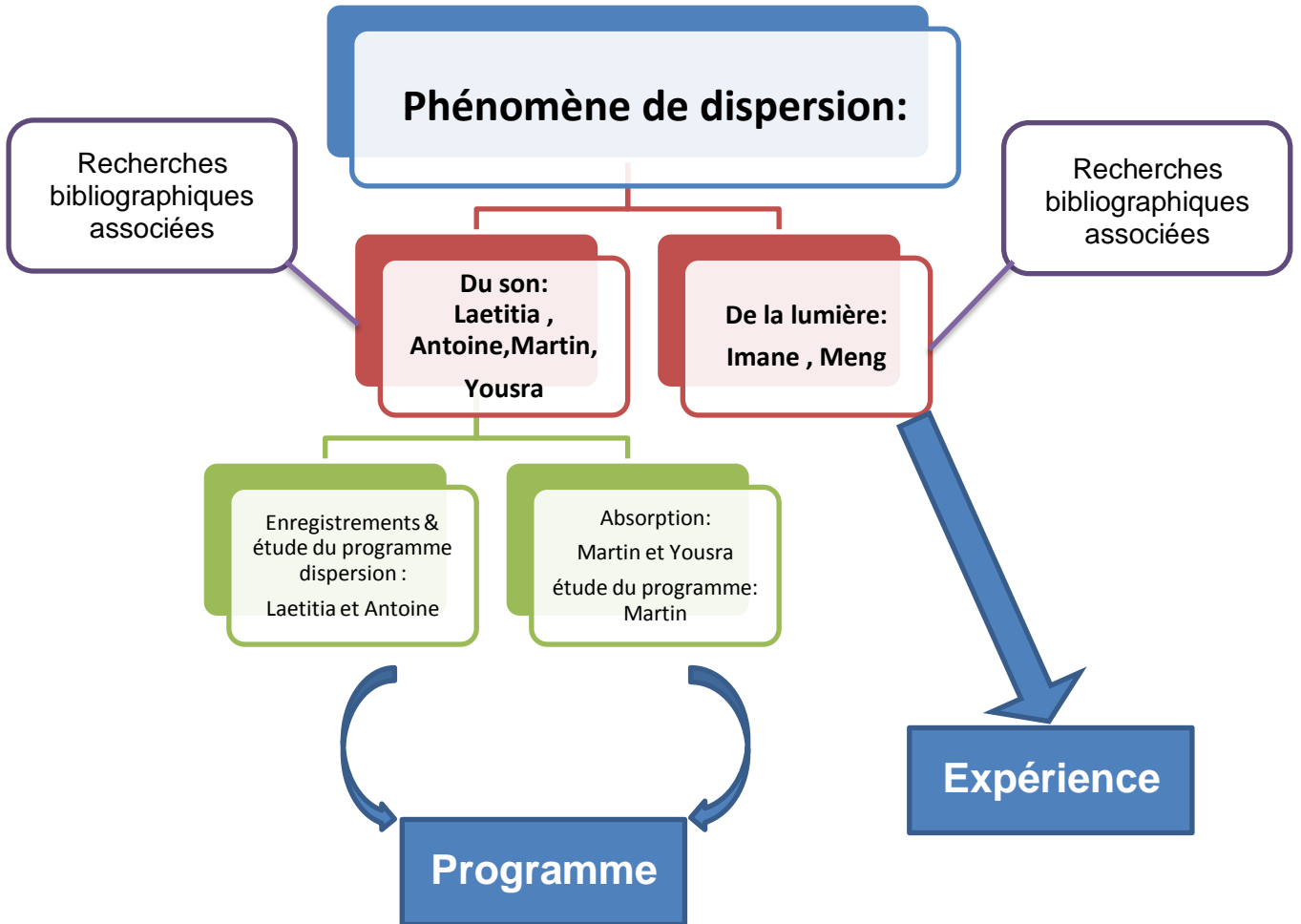
Ainsi, nous avons tout d'abord cherché à comprendre la partie théorique du problème, pour ensuite aborder le programme à réaliser. Antoine et Laetitia se sont occupés des sons à enregistrer et le phénomène de dispersion, alors que Martin et Yousra ont traité la partie sur l'absorption. Enfin, les deux binômes, avec l'aide de l'enseignant, ont développé le programme modélisant la dispersion du son. Nous avons également effectué de nombreuses recherches bibliographiques pour nous apporter une meilleure compréhension du phénomène.

En fin de séance, nous faisons le bilan pour savoir l'avancement de nos recherches ainsi que le travail à produire pour le cours suivant.

Pour finir, nous avons réservé les deux dernières séances à la finalisation du dossier et aux tests du programme.



## Organigramme de travail durant le projet



### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Explication théorique du phénomène de dispersion des ondes

##### Qu'est-ce que la dispersion ?

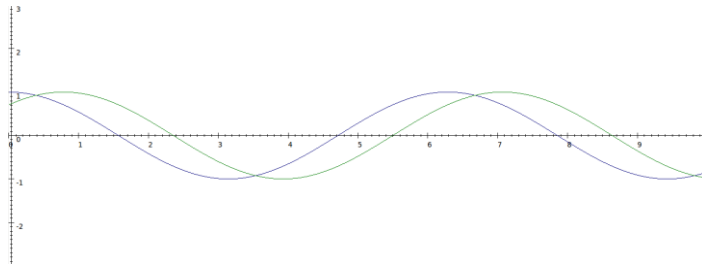
La dispersion est un phénomène qui dépend du milieu dans lequel se propagent les ondes. Ainsi, dans certains milieux transparents tels que le verre, le cristal, l'eau, et d'autres matériaux transparents, on peut observer ce phénomène.

En effet, le phénomène de dispersion est lié à la différence de vitesse de propagation des ondes suivant leur fréquence. Par exemple, lorsque deux sons sont émis simultanément, si on se place quelques centaines de mètres plus loin, dans un milieu dispersif, les deux sons arrivent en décalé.

L'air cependant n'est pas un milieu dispersif pour les ondes sonores, c'est pour cela que nous n'entendons pas ce phénomène, et qui serait d'ailleurs embêtant pour écouter une chanson lors d'un concert.

En revanche, on peut observer ce phénomène dans le domaine de l'optique, l'exemple cité au-dessus est celui de l'arc-en-ciel, l'eau étant un milieu dispersif, la dispersion de la lumière du soleil est faite à l'intérieur des gouttelettes présentes dans les nuages.

Une onde peut être représentée par la fonction suivante :



$$f(x, t) = Ae^{i(\omega t - kx)}$$

Figure 1: représentation d'une onde à t1 et t2 , Amplitude en fonction de x

Une onde se propage par rapport à  $x$  à une vitesse  $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$

Lorsque qu'on a plusieurs ondes, elles peuvent être représentées par la formule suivante :

$$g(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} f_j(x, t) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} A(\omega)e^{i(\omega t - k(\omega)x)}$$

$k$ , le vecteur d'onde, dépend de  $\omega$ , soit de la fréquence de l'onde donc c'est qui permet d'expliquer le phénomène de dispersion. Lorsqu'on multiplie la phase par  $e^{ik(\omega)x}$  la phase est décalée, ainsi le déphasage dépend de  $k$  et donc de la fréquence. On applique alors la transformé de Fourier (TF) qui nous permet, en partant d'une onde quelconque  $g(x, t)$  de connaître les fonctions  $f_j(x, t)$  qui la compose et d'obtenir une approximation de l'onde en somme de fonctions sinusoïdales.

Le schéma suivant illustre le principe de la transformée de Fourier, le signal à approximer est représenté par la courbe noire, les fonctions colorées représentent les courbes sinusoïdales qui s'additionnent pour obtenir le résultat le plus proche possible de celui escompté. Pour obtenir une courbe quasiment verticale, il faut sommer des sinusoïdes de très hautes fréquences.



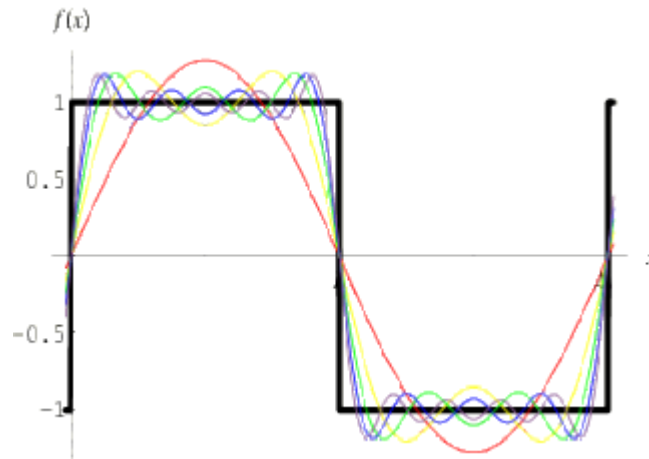


Figure 2: représentation de la transformée de Fourier

$A$ , l'amplitude, dépend également de  $\omega$ , ce qui permet d'expliquer le phénomène d'absorption. (Les calculs théoriques ne sont pas détaillés ici, car ils ne sont pas développés par la suite).

Ainsi, quand la fréquence augmente, le coefficient d'absorption est plus important et donc l'absorption va croître. Ce qui explique que sur une longue distance, le son aigu caractérisé par une fréquence élevée va s'affaiblir plus que le son grave qui lui correspond à une fréquence basse.

Dans le domaine de l'optique le phénomène de dispersion revient donc à ce que l'indice de réfraction du milieu ( $n$ ) dépende de la longueur d'onde ( $\lambda$ )

### 3.2. Phénomène de dispersion des ondes lumineuses

#### 3.2.1. Expérience :

Nous avons réalisé une expérience modélisant la dispersion des ondes lumineuses dans un prisme. C'est ce qui explique l'apparition des arcs-en-ciel qui sont une manifestation de la dispersion induite par réfraction des rayons du soleil par les gouttes de pluie.

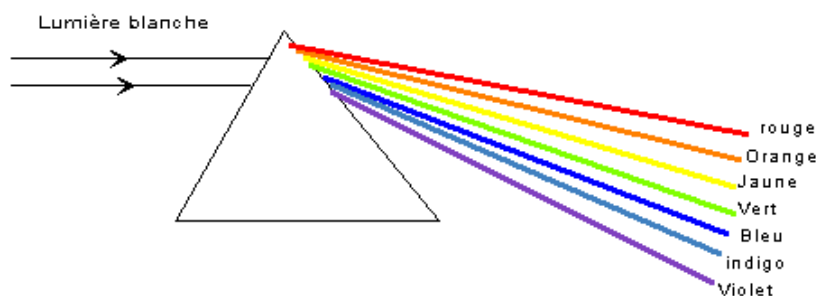


Figure 3: phénomène de dispersion des ondes lumineuses à travers un prisme

Nous avons éclairé une fente avec une lumière blanche et on envoie le faisceau obtenu sur la face d'un prisme.

Dans cette expérience, nous avons placé le prisme à une distance  $d=25,5$  cm de la source lumineuse. Nous avons utilisé un prisme sous forme de triangle équilatéral de côté égal à 3 cm.





À travers cette expérience, on cherche à montrer que la décomposition de la lumière blanche par un prisme est un phénomène de dispersion.

Pour cela, il faudra montrer que la vitesse de propagation des ondes lumineuses varie lorsque l'on fait varier la fréquence, autrement dit que les indices de réfractions varient en fonction des longueurs d'ondes des couleurs considérées.

### 3.2.2. Observations

Nous remarquons qu'à la sortie du prisme, la lumière est déviée. De plus, le faisceau qui émerge du prisme est étalé et présente les différentes couleurs de l'arc-en-ciel, c'est le phénomène de décomposition de la lumière.

On remarque également que la lumière rouge est moins déviée que la lumière violette.

### 3.2.3. Analyse

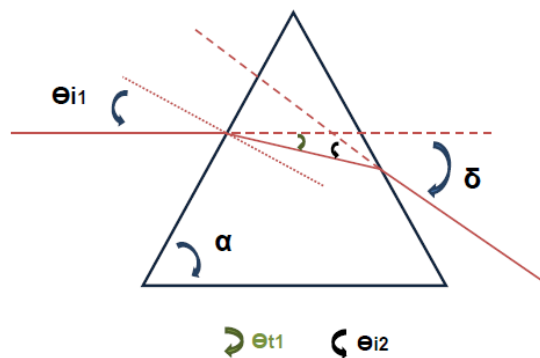


Figure 4: chemin optique suivi par les ondes lumineuses dans le prisme

Après avoir réalisé l'expérience, nous avons, dans un premier temps, mesuré l'angle d'incidence  $\theta$ , ensuite nous avons mesuré l'angle à la sortie du prisme de chacune des couleurs suivantes : rouge, jaune, vert, bleu et violet.

Pour expliquer la méthode utilisée, nous allons prendre l'exemple du faisceau lumineux rouge.

En effet, à la sortie du prisme, le faisceau rouge est plus ou moins épais, ce qui nous a permis de relever un angle maximum et un angle minimum. Ces angles sont notés  $\delta_i$ .

Dans un second temps, nous avons cherché sur Internet les longueurs d'onde correspondantes.

Nous avons  $i = \{1,2,3,4,5\}$  Pour  $i = 1$  (Rouge)  $\lambda_1 = 652.5 \pm \Delta \lambda_1$

Avec  $\Delta \lambda_1 = \lambda_1(max) - \lambda_1(min)$

De la même façon, nous avons considéré des longueurs d'onde moyennes pour les autres couleurs.

Pour  $i = 2$  (Jaune)  $\lambda_2 = 587.5 \pm \Delta \lambda_2$

Pour  $i = 3$  (Vert)  $\lambda_3 = 530 \pm \Delta \lambda_3$



Pour  $i = 4$  (Bleu)  $\lambda_4 = 465 \pm \Delta \lambda_4$

Pour  $i = 5$  (Violet)  $\lambda_5 = 417.5 \pm \Delta \lambda_5$

Ensuite, il a fallu calculer les indices de réfraction. Pour cela, nous avons utilisé les angles  $\delta i$ , l'angle d'incidence  $\theta$  et l'angle au sommet du prisme  $\alpha$ , selon la formule que l'on a prouvée avec la loi de Snell-Descartes :

$$\text{eq.1} \quad n = \{ [\sin(\delta - \theta i 1 + \alpha) + \cos \alpha \sin \theta i 1] (\sin \alpha) - 1 + \sin 2 \theta i 1 \}^{1/2}$$

Avec  $\alpha = 60^\circ$  (car le prisme est triangulaire, triangle équilatéral).

Et  $\theta i 1 = 46^\circ$  (d'après nos mesures).

Pour chaque couleur, on calcule l'indice de réfraction correspondant à l'angle maximum  $n(\delta i + \Delta \delta i)$  et à l'angle minimum  $n(\delta i - \Delta \delta i)$ . Ce qui nous permet d'avoir un indice de réfraction moyen  $n(\delta i)$ .

On a donc  $n(\delta i) \pm \Delta n$  avec  $\Delta n = n(\delta i + \Delta \delta i) - n(\delta i - \Delta \delta i)$

Ainsi, grâce à Excel, nous avons pu tracer un graphique qui représente l'indice de réfraction  $n$  en fonction des longueurs d'onde  $\lambda$ .

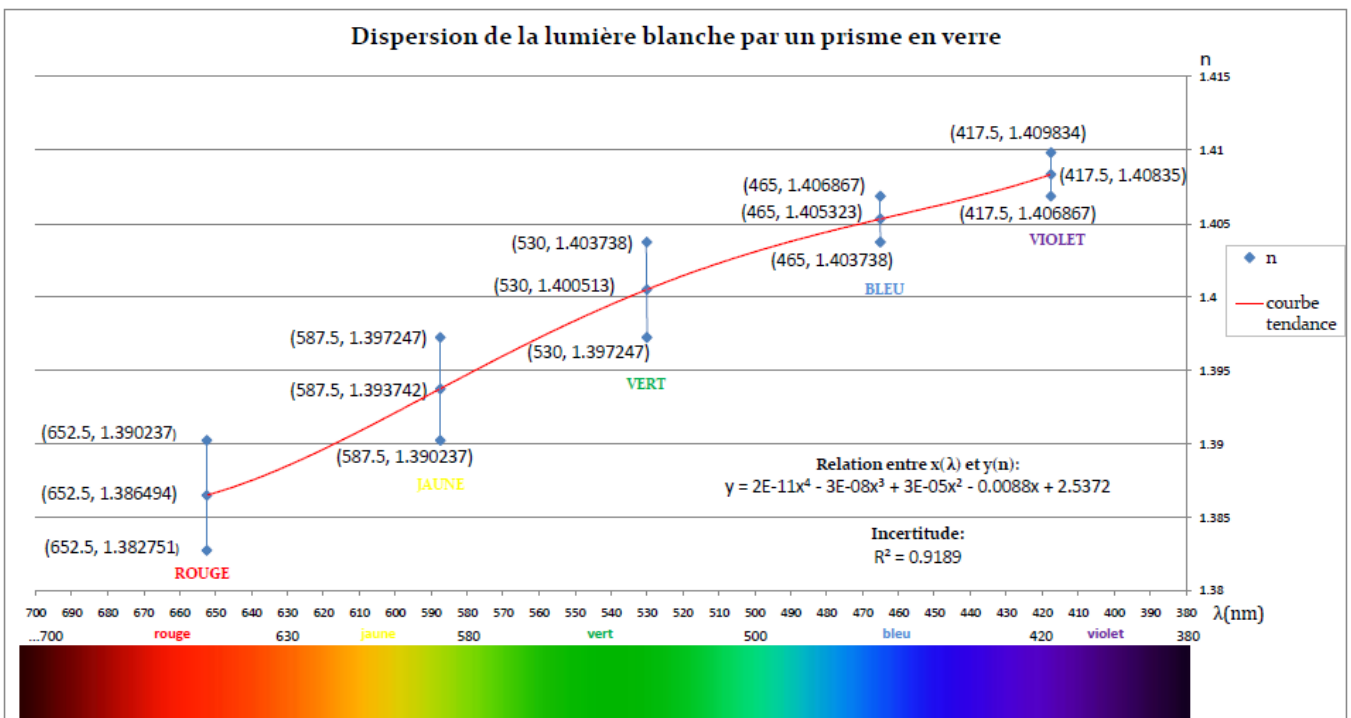


Figure 5 : graphique représentant l'indice en fonction de la longueur d'onde

Ce graphique nous permet de montrer la cohérence de nos valeurs expérimentales avec la théorie. En effet, nous remarquons que la courbe correspond bien aux couleurs du spectre en dessous. De plus on remarque que l'indice du milieu est plus faible pour les longueurs d'ondes qui correspondent au rouge et est plus important pour les longueurs d'onde qui correspondent au violet.



### 3.3. Phénomène de dispersion des ondes acoustiques

#### 3.3.1. Étude du phénomène de dispersion à travers la réalisation d'un programme

Le phénomène de dispersion n'étant pas audible dans la vie quotidienne, nous avons donc, avec l'aide de notre encadrant, réaliser un programme qui nous permet de comprendre ce phénomène. (cf annexe 6.2.a))

##### Problèmes rencontrés

Avant de démarrer l'explication du programme, il nous semble nécessaire de vous présenter les problèmes auxquels nous avons été confrontés avant d'aboutir à un résultat cohérent.

Nous avons eu à faire face à de nombreux problèmes numériques, notamment le problème d'écho. En effet, notre programme permet d'entendre un son tel qu'il serait audible à une distance donnée. Cependant, le phénomène de dispersion, décale le début du son, or si l'enregistrement est trop court, la fin du son qui dépasse donc de l'enregistrement est replacé au début.

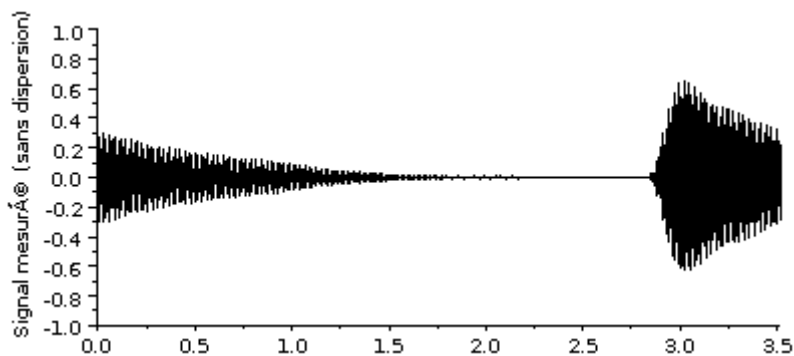


Figure 6: représentation du phénomène d'écho

Nous avons été confrontés à un autre problème. Lorsque nous écoutions un son après dispersion, nous n'entendions pas de sons bien clairs, mais plutôt un son continu qui démarrait aigu pour finir grave. Nous avons donc pensé qu'il y avait des harmoniques, c'est pour cela que nous avons inséré un filtre, pour ne garder que celles qui nous intéressaient. Cependant cela n'a rien changé. Pour ne plus être dérangé par des harmoniques, nous avons décidé d'utiliser un son artificiel généré par Audacity. Ce son ne devrait donc avoir qu'une seule harmonique. Le phénomène erroné restait inchangé.

Finalement, le problème se trouvait dans la Transformée de Fourier. Or, notre son généré par Audacity a un début et une fin bien nets. Pour pouvoir retrouver cette forme, il faut ajouter des fonctions sinusoïdales de hautes fréquences (des sons aigus). C'est pour cela que nous n'obtenions pas le résultat attendu

##### Explication de l'algorithme de base du programme

Le but de notre programme est, à partir d'un son de départ, de pouvoir écouter ce même son après dispersion. Nous voulions un programme qui ne soit pas compliqué à utiliser. L'utilisateur devait avoir le moins de choses à rentrer possible.

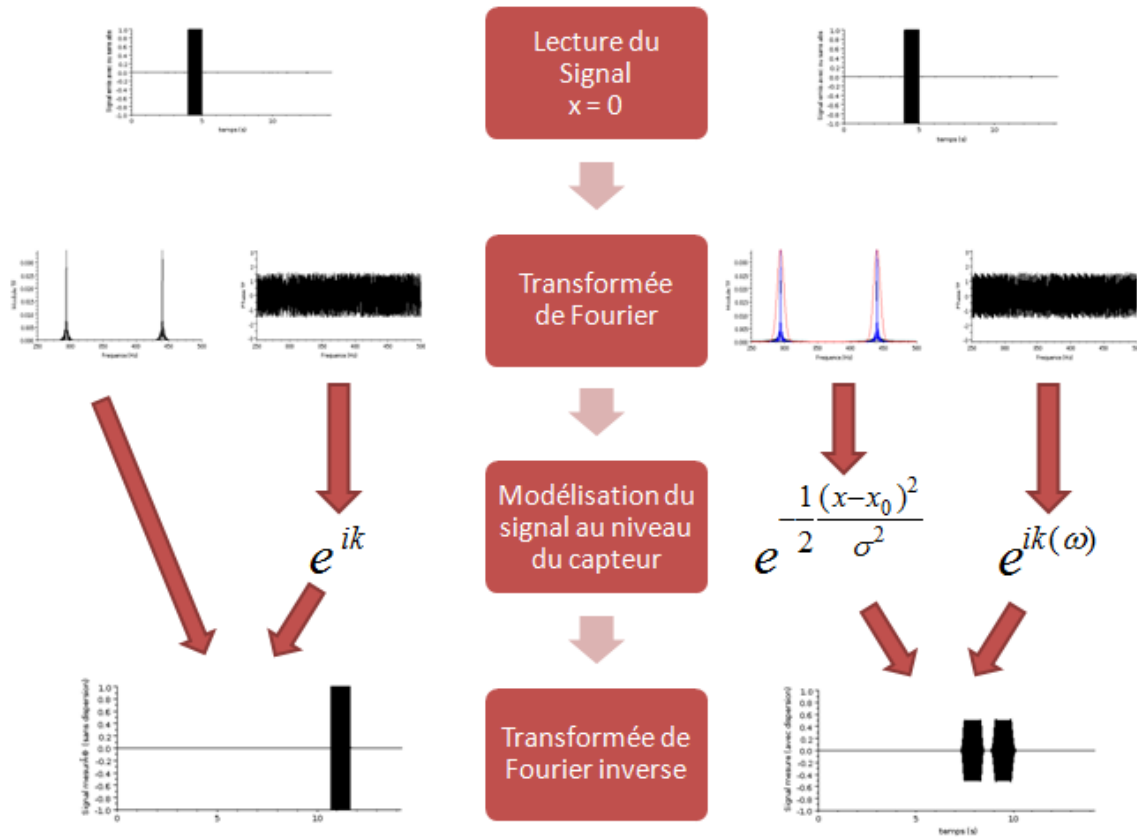
Pour utiliser notre programme, il faut :

- rentrer l'onde sonore de base (soit une formule, soit un enregistrement),



- rentrer la loi de dispersion choisie,
- rentrer la distance qui sépare le point d'émission du son de base ( $x=0$ ) du capteur virtuel ( $x=PositionCapteur$ ). On peut ainsi jouer avec la dispersion.

Ce programme est constitué de différentes grandes étapes.



Tout d'abord, nous avons un son, ou une équation. Il faut tout d'abord l'analyser. On utilise donc la Transformée de Fourier. On obtient ainsi le spectre de Fourier, qui nous montre les différentes harmoniques du son de base.

Ensuite, il faut introduire la notion de dispersion.

Puis, il ne reste plus qu'à réaliser la transformée inverse du signal, pour pouvoir écouter le signal obtenu. Ce programme nous montre aussi l'amplitude du signal en fonction du temps, le spectre de Fourier, et la phase du signal. Tout cela pour le signal initial, pour le signal après dispersion, et enfin, pour le signal tel qu'il serait s'il n'y avait pas de dispersion.

Pour la loi de dispersion, il faut des valeurs. Nous n'avons pas réussi à trouver de valeurs précises. En effet, dans l'air, la dispersion est quasi-nulle. Ce qui veut dire que, avec des valeurs réalistes, notre capteur devrait se déplacer d'une très grande distance pour réussir à avoir un changement dû à la dispersion.

Nous avons donc créé une loi de dispersion. Nous avons choisi une loi linéaire. Nous avons constaté que dans la réalité, les basses fréquences se déplacent moins rapidement que les hautes fréquences. Nous sommes donc partis de valeurs arbitraires et nous avons établis la loi.

Nous avons choisis de prendre une vitesse de 200m/s pour une fréquence de 200Hz, et une vitesse de 400m/s pour une fréquence de 1000Hz.



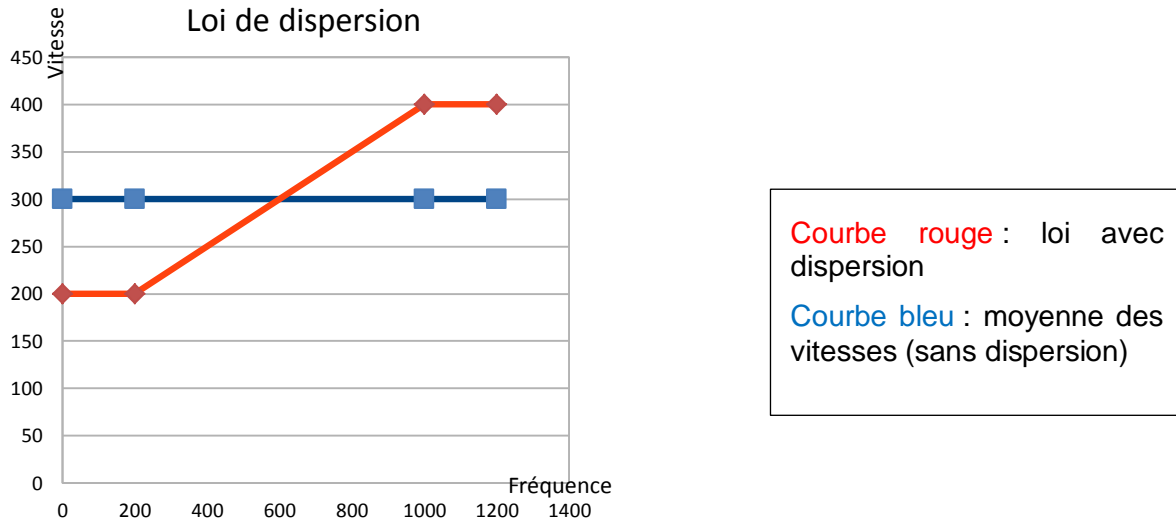
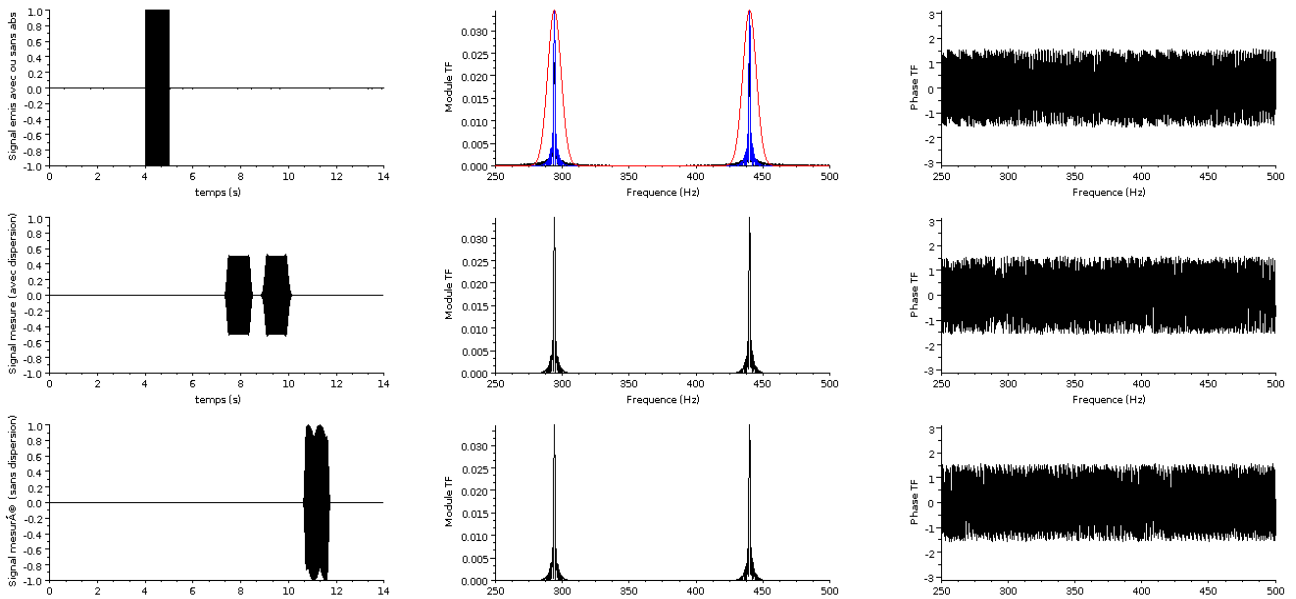


Figure 7: représentation de la loi de la dispersion, vitesse en fonction de la fréquence

### 3.3.2. Résultat et analyse du programme

À l'exécution du programme, on obtient les graphiques suivants :

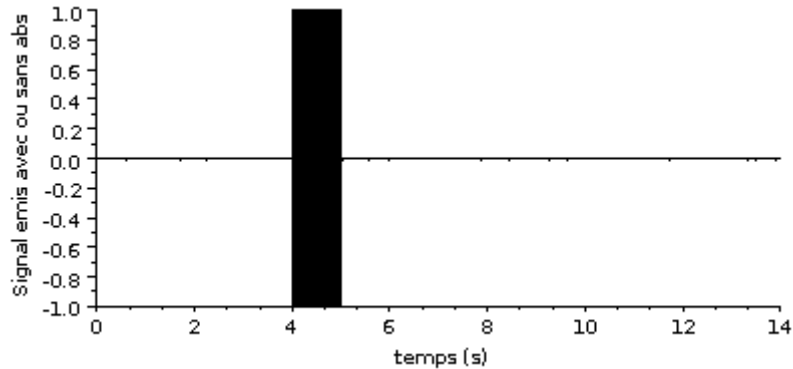


Chaque ligne représente les caractéristiques d'un signal différent. En effet, la première ligne représente le signal sonore contenu dans le fichier son à traiter. La deuxième ligne représente le signal traité par le programme et auquel a été ajouté l'effet de dispersion. La troisième ligne représente un signal témoin, qui n'est autre que le signal convecté sans dispersion.

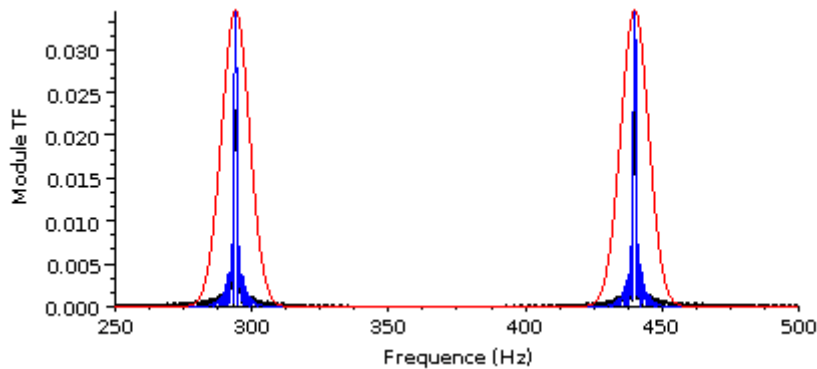
Sur la première colonne sont représentés les signaux en fonction du temps. Sur la seconde colonne, nous avons les spectres de Fourier de chacun des trois signaux. Enfin sur la dernière colonne sont représentées les phases des signaux en fonction de la fréquence.



**Analyse détaillée**

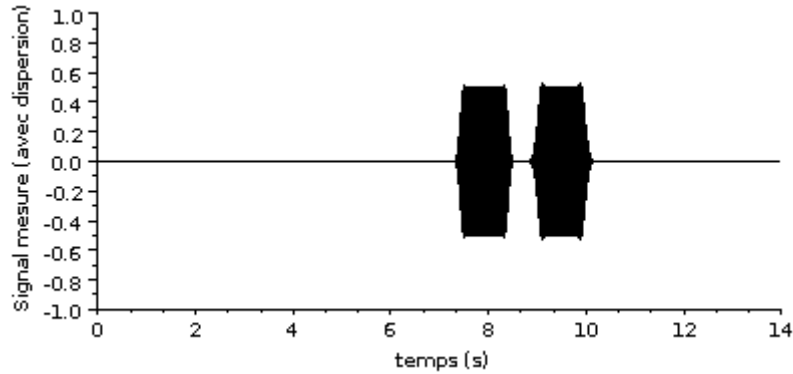


Sur la capture précédente est représenté le signal à traiter, ici il s'agit d'un son synthétique généré à l'aide du logiciel Audacity. Il est d'une durée de une seconde et commence à la date  $t = 4s$ . Il regroupe deux fréquences : celle du Ré médium (294Hz) et celle du La médium (440Hz).



Sur l'image ci-dessus, on peut comprendre le fonctionnement du filtre que nous avons utilisé pour éliminer les harmoniques qui ne nous intéressaient pas (cas de sons non synthétiques). En noir est représenté le spectre de Fourier du signal d'origine. La courbe rouge est le filtre appliqué au spectre de Fourier. Ce filtre est composé de la somme de deux fonctions gaussiennes (nous pourrions en mettre plus si nous voulions étudier plus de fréquences) centrées sur les fréquences que l'on souhaite conserver. Enfin, la courbe en bleu représente le nouveau spectre de fréquences filtré et amplifié pour compenser les effets de l'absorption sur la gamme de fréquence à étudier.





Sur l'image ci-dessus, on retrouve l'effet de dispersion du signal. En effet, on remarque la présence de deux signaux écartés d'environ une demi seconde. Il faut tout d'abord noter que le premier son commence environ à la date  $t = 7,5s$ . Ceci montre que le signal s'est bien déplacé temporellement entre le point d'émission et le capteur (ici situé à 2000m). Ensuite on peut observer que les deux signaux ont une amplitude environ égale à la moitié de l'amplitude du son initial. En effet, dans le cas de la dispersion, les différentes fréquences sont censées se propager à différentes vitesses. Donc comme les deux notes du signal ne sont plus superposées, l'amplitude diminue.

Enfin, à l'écoute du fichier son généré par le programme, on remarque que le premier son est aigu et le second plus grave. On peut donc en conclure qu'avec la loi de dispersion que nous avons appliquée, plus la fréquence est élevée, plus la vitesse du son est élevée.

### 3.3.3. L'Absorption

Le phénomène de dispersion est souvent associé à l'absorption, nous avons donc décidé de consacrer une partie de notre travail à ce phénomène et de l'insérer dans le programme. (cf annexe 6.2.b))

#### résultats et explications de l'absorption dans le programme

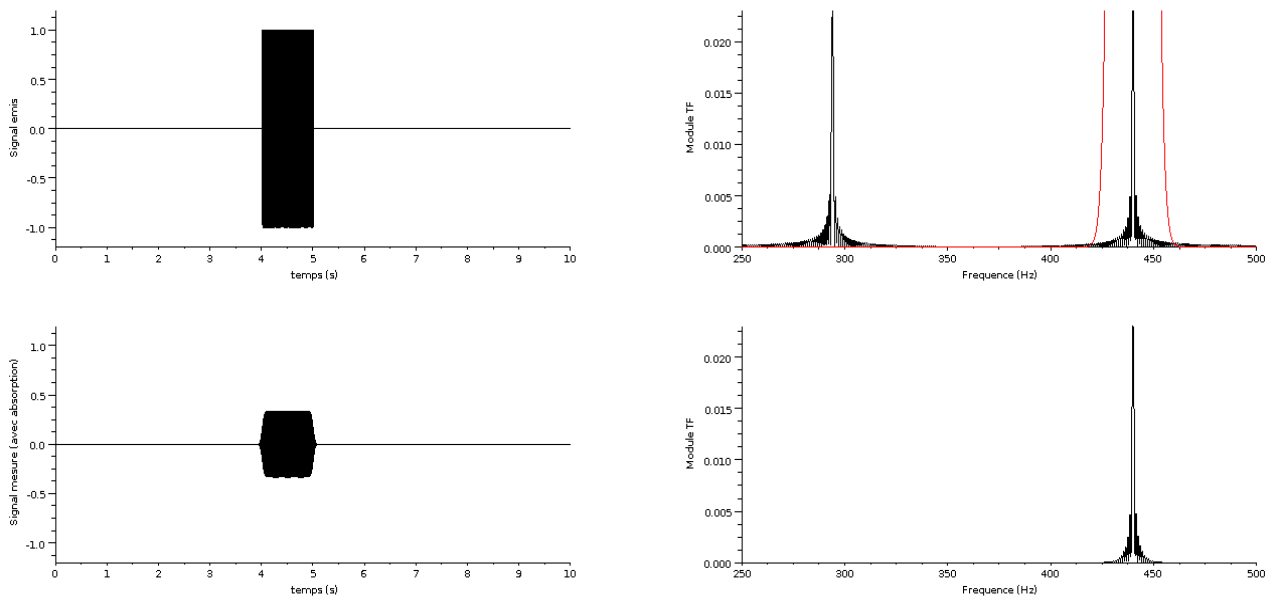


Figure 8: rendu du programme pour le phénomène d'absorption



La figure précédente met en évidence l'effet d'absorption.

Sur la première ligne on trouve les caractéristiques du signal à traiter et sur la seconde celles du signal absorbé. La première colonne donne l'allure des signaux dans le temps et la deuxième les spectres de fréquence.

On applique une loi d'absorption de forme gaussienne centrée sur la fréquence à conserver (c'est la courbe rouge sur le premier spectre de fréquences), c'est à dire 440Hz.

Ensuite on peut observer que l'amplitude du signal absorbé a diminué et sur le spectre correspondant on voit que le pic à 440Hz est resté et celui à 294Hz n'est plus visible.

On peut donc en conclure que la fréquence de 294Hz a été absorbée. Ce système nous permet notamment de mettre en place des filtres, pour limiter l'étendue des fréquences que l'on veut étudier. En effet, en centrant la gaussienne sur 440Hz, on a choisi de conserver cette fréquence et de diminuer les autres.

#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

##### Conclusion

Pour dresser le bilan de ce projet, nous pouvons dire que ce fut une expérience particulièrement enrichissante. En effet, nous avons pu nous familiariser avec le phénomène de dispersion des ondes par deux approches différentes, à savoir les ondes acoustiques et lumineuses.

Malgré des difficultés aussi bien au niveau de la compréhension du phénomène qu'au niveau technique, nous sommes parvenus à faire fonctionner un programme informatique permettant de modéliser la dispersion, et même de créer un son dispersé selon une loi que l'on choisit, à partir d'un son donné.

Cette approche illustrée par les sons nous a permis de bien comprendre comment se propagent les ondes dans un milieu dispersif, la vitesse de propagation étant dépendante de la fréquence.

En ce qui concerne les points que nous pourrions améliorer en poursuivant nos recherches, il serait idéal de trouver des valeurs et des lois de dispersion réelles afin de ne plus se contenter d'une loi linéaire. Ensuite, nous pourrions aussi améliorer l'interface du programme, en proposant à l'utilisateur un moyen plus ergonomique de rentrer ses valeurs, et ainsi lui épargner la lecture des lignes de code à chaque expérience.





## 5. BIBLIOGRAPHIE

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Dispersion>

*La dispersion de la lumière*

<http://claudio.jeuch.free.fr/gutenberg/dispersion/dispersion.PDF>

*Chapitre 4 : Propagation d'une onde dispersive générée par une perturbation initiales quelconque.* (document passé par l'encadrant)

### **Crédit d'illustration**

Photo page de garde :

<http://www.google.fr/imgres?q=arc-en-ciel&num=10&um=1&hl=fr&client=firefox-a&sa=X&rls=org.mozilla:fr:official&biw=1366&bih=576&tbs=itp:photo&tbm=isch&tbnid=f2OFEXgDrbkuyM:&imgrefurl=http://fr.wikipedia.org/wiki/Arc-en-ciel&docid=Z4hKKjgkN9wjWM&imgurl=http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/27/WhereRainbowRises.jpg/220px-WhereRainbowRises.jpg&w=220&h=331&ei=iPPOT5v1MYaV8gPp96W1DA&zoom=1&iact=hc&vpx=104&vpy=195&dur=53&hovh=264&hovw=176&tx=109&ty=157&sig=113881448932717393287&page=1&tbnh=155&tbnw=115&start=0&ndsp=12&ved=1t:429,r:0,s:0,i:137>



## 6. ANNEXES

### 6.1. Documentation technique

a) Formule que nous avons obtenue de la manière suivante :

$$\bar{\delta} = (\theta_{i1}-\theta_{t1})+(\theta_{i2}-\theta_{t2})$$

$$\text{On a } \alpha = \theta_{t1}+\theta_{i2}$$

$$\text{Alors } \bar{\delta} = \theta_{i1}+\theta_{i2}-\alpha$$

$$n\sin\theta_{t1} = 1 \times \sin\theta_{i1}$$

$$n\sin\theta_{i2} = 1 \times \sin\theta_{t2}$$

$$\theta_{t2} = \sin^{-1}(n\sin\theta_{i2})$$

$$\theta_{t2} = \sin^{-1}[n\sin(\alpha-\theta_{t1})]$$

$$\theta_{t2} = \sin^{-1}(n\sin\alpha\cos\theta_{t1}-n\cos\alpha\sin\theta_{t1})$$

$$\theta_{t2} = \sin^{-1}[\sin\alpha(n^2-n^2\sin^2\theta_{t1})^{1/2}-n\cos\alpha\sin\theta_{t1}]$$

$$\theta_{t2} = \sin^{-1}[\sin\alpha(n^2-\sin^2\theta_{i1})^{1/2}-\cos\alpha\sin\theta_{i1}]$$

$$\bar{\delta} = \theta_{i1}+\sin^{-1}[\sin\alpha(n^2-\sin^2\theta_{i1})^{1/2}-\cos\alpha\sin\theta_{i1}]$$

$$\text{D'ou : } n = \{[\sin(\bar{\delta}-\theta_{i1}+\alpha)+\cos\alpha\sin\theta_{i1}](\sin\alpha)^{-1}+\sin^2\theta_{i1}\}^{1/2}$$

### 6.2. Listings des programmes réalisés

a) Programme de modélisation de la dispersion et absorption acoustique (sous Scilab) commenté

```
clear
stacksize('max')
```

```
//Réglage de l'effet dispersion
```

```
PositionCapteur=250; //distance virtuelle du capteur en m
vmin=200; //Vitesse (m/s) associée à la fréquence minimale
vmax=400 ; //vitesse (m/s) associée à la fréquence maximale
fmin=200;
fmax=800;
```

```
//Réglage de l'effet d'absorption (filtre gaussien dans l'espace de Fourier)
```

```
centre1=200; //centre du filtre gaussien
centre2=100 ; //centre du filtre gaussien
largeur=15 ; //écart type du filtre gaussien
Ampli=3; //facteur d'amplification du signal après filtrage
spatial
```

```
OptionAbs=%t; //mettre à %t si l'on veut appliquer l'absorption au
                calcul de dispersion sinon mettre
à %f
```

```
//Limite d'affichage des fréquences sur les figures
FafficheMax=400; //Fréquence maximale pour l'affichage des figures
```

```
//Position des donnees
cd '/home/martin/Insa/S4/P6/programmeDefinitif';
```

```
//Nom du fichier à traiter
NomFichierSon="remédiumlamediummono.wav";
```

```
//Corps du programme
```

```
[y,Fs,bits]=wavread(NomFichierSon) ; //Lecture du Fichier Wave
Signal0=y(1,:); //On recupere le signal en mono
[tmp,Nbp]=size(y);
DureeSignal=Nbp/Fs ; //Calcul de la durée totale du signal
basetemporelle=linspace(0,DureeSignal,Nbp)';
FTab=linspace(0,Fs,Nbp)' //Base des frequence associée à
l'analyse // de Fourier
```

```
Fomega=fft(Signal0,1); //Transformée de Fourier du signal
```

```
VectAbs=exp(-1/2*((FTab-centre1)/largeur)^2)*Ampli+exp(-1/2*((FTab-
centre2)/largeur)^2)*Ampli; //Facteur mulitplicatif pour
l'absorption //spectrale : loi
gaussienne
```

```
G0=Fomega.*VectAbs ; //On applique la loi d'absorption
```

```
SignalAbs=fft(G0,-1);
SignalAbs=real(SignalAbs); //On applique la transformée de fourrier inverse et
on // ne récupère que la partie réelle
```

```
//Son entendu sur le capteur avec dispersion
```

```
a=(vmax-vmin)/(fmax-fmin)
b=vmin-a*fmin
Vitesse=a*FTab+b; //Calcul des vitesses de propagation des ondes de
temporelle //chaque fréquence
```

```
Selectinf=(FTab<fmin) ;
Selectsup=(FTab>fmax) ;
Selectint=(FTab<=fmax & FTab>=fmin);
```



Vitesse=Selectinf\*vmin+Vitesse.\*Selectint+Selectsup\*vmax; //La dispersion est bornée entre  
 Vmin et Vmax

VectK1=2\*%pi\*FTab./Vitesse; //formule generale pour k(w)

G1=Fomega.\*exp(%i\*VectK1\*PositionCapteur); //on applique la loi de dispersion  
 au signal transformé

if OptionAbs==%t then //Choix de l'usage ou non de  
 l'absorption  
 G1=G1.\*VectAbs;  
 end

SignalDisp=fft(G1,-1);  
 SignalDisp=real(SignalDisp); //On applique la transformée de  
 fourrier inverse et on ne  
 récupère que la partie  
 réelle //Son entendu sur le capteur sans dispersion

Vitesse=(vmin+vmax)/2\*ones(FTab); //Vitesse de propagation fixée à la  
 moyenne de Vmin  
 et Vmax

VectK2=2\*%pi\*FTab./Vitesse; //formule générale pour k(w)

G2=Fomega.\*exp(%i\*VectK2\*PositionCapteur); //on applique la loi de dispersion  
 au signal transformé  
 (pas de dispersion)

if OptionAbs==%f then //Choix de l'usage ou non de  
 l'absorption  
 G2=G2.\*VectAbs;  
 end

SignalSansDisp=fft(G2,-1);  
 SignalSansDisp=real(SignalSansDisp); //On applique la transformée de  
 fourrier inverse et on ne  
 récupère que la partie  
 réelle  
 clf //effacement de la fenêtre

//Ligne du haut signal à analyser  
 subplot(3,3,1) //Signal à analyser  
 plot2d(basetemporelle,[Signal0 SignalAbs],[1,2]);  
 xtitle(' ', 'temps (s)', 'Signal emis avec ou sans abs')

subplot(3,3,2) //Spectre de Fourier du signal à analyser  
 plot2d(FTab,[abs(Fomega) abs(G0)  
 VectAbs\*max(abs(Fomega))],[1,2,5],rect=[0,0,FafficheMax,max(abs(Fomega))]);  
 xtitle(' ', 'Frequence (Hz)', 'Module TF')



```

subplot(3,3,3)                                     //Phase du signal à analyser
Select=(real(Fomega)~=0);
Phase=atan(imag(Fomega(Select))./real(Fomega(Select)))
plot2d(FTab(Select),Phase,rect=[0,-%pi,FafficheMax,%pi]);
xlabel('','Frequence (Hz)','Phase TF')

//Signal convecté avec dispersion
subplot(3,3,4)                                     //Signal mesuré avec dispersion
plot2d(basetemporelle,[SignalDisp]);
xlabel('','temps (s)','Signal mesure (avec dispersion)')

subplot(3,3,5)                                     //Spectre de Fourier du signal dispersé
plot2d(FTab,abs(G1),rect=[0,0,FafficheMax,max(abs(Fomega))]);
xlabel('','Frequence (Hz)','Module TF')

subplot(3,3,6)                                     //Phase du signal dispersé
Select=(real(G1)~=0);
Phase=atan(imag(G1(Select))./real(G1(Select)))
plot2d(FTab(Select),Phase,rect=[0,-%pi,FafficheMax,%pi]);
xlabel('','Frequence (Hz)','Phase TF')

//Signal convecté sans dispersion
subplot(3,3,7)                                     //Signal mesuré sans dispersion
plot2d(basetemporelle,[SignalSansDisp]);
xlabel('','temps (s)','Signal mesure (sans dispersion)')

subplot(3,3,8)                                     //Spectre de Fourier du signal sans
dispersion                                         dispersion
plot2d(FTab,abs(G2),rect=[0,0,FafficheMax,max(abs(Fomega))]);
xlabel('','Frequence (Hz)','Module TF')

subplot(3,3,9)                                     //Phase du signal sans dispersion
Select=(real(G2)~=0);
Phase=atan(imag(G2(Select))./real(G2(Select)))
plot2d(FTab(Select),Phase,rect=[0,-%pi,FafficheMax,%pi]);
xlabel('','Frequence (Hz)','Phase TF')

//écriture des fichiers sont générés
wavwrite(SignalDisp, Fs, 'Apresdispersion.wav')
wavwrite(SignalSansDisp, Fs, 'Sansdispersion.wav')
wavwrite(SignalAbs, Fs, 'Absorption.wav')

```

### b) Programme de modélisation de l'absorption acoustique (sous Scilab)

```

clear
stacksize('max')
FafficheMax=1200;                                 //Frequence maximale pour l'affichage des
                                                    figures

```



```

cd '/home/martin/Insa/S4/P6'; //On se place dans le bon repertoire
[y,Fs,bits]=wavread("ADgene2.wav"); //Lecture du Fichier Wave
Signal0=y(1,:); //On recupere le signal en mono
[tmp,Nbp]=size(y);

DureeSignal=Nbp/Fs; //Calcul de la durée totale du signal
basetemporelle=linspace(0,DureeSignal,Nbp)'; //on normalise la base temporelle par
rapport au // nombre de points de
l'échantillon
FTab=linspace(0,Fs,Nbp)'; //matrice des fréquences du signal
Fomega=fft(Signal0,1); //Transformée de Fourier du signal

//Loi d'absorption
//propriétés de la loi gaussienne
centre=440; //Fréquence centrale
largeur=100; //largeur de la bande passante

VectAbs=exp(-1/2*((FTab-centre)/largeur)^2); //loi d'absorption de forme gaussienne
G1=Fomega.*VectAbs; //on applique la loi d'absorption au signal
transformé

Signal1=fft(G1,-1); //Transformée de Fourier inverse
Signal1=real(Signal1); //On prend la partie réelle du signal obtenu

clf //effacement de la fenêtre

//Ligne du haut, signal à analyser

subplot(2,2,1) //Signal émis
plot2d(basetemporelle,[Signal0 Signal0bis],[1,2]);
xlabel('temps (s)','Signal emis')

subplot(2,2,2) //Spectre de Fourier du signal émis
plot2d(FTab,abs(Fomega),rect=[0,0,FafficheMax,max(abs(Fomega))]);
xlabel('Frequence (Hz)','Module TF')

//Ligne du bas, signal absorbé

subplot(2,2,3) //Signal mesuré avec absorption
plot2d(basetemporelle,[Signal1]);
xlabel('temps (s)','Signal mesure (avec absorption)')

subplot(2,2,4) //Spectre de Fourier du signal absorbé
plot2d(FTab,abs(G1),rect=[0,0,FafficheMax,max(abs(Fomega))]);
xlabel('Frequence (Hz)','Module TF')

//écriture du fichier son généré
wavwrite(Signal1, Fs, 'Apresabsorption.wav') //création d'un fichier son avec absorption
  
```



### 6.3. Propositions de sujets de projets (en lien ou pas avec le projet réalisé)

Ce sujet fut très intéressant, il serait peut-être judicieux d'ajouter l'absorption dans l'intitulé.

Il pourrait également être intéressant de faire une étude précise du phénomène des arcs-en-ciel avec le phénomène de dispersion et de diffraction.

