L'EFFET DOPPLER

Lycée Saint-Exupéry de Mantes-la-Jolie

23 octobre 2012

Sommaire

I. Un peu d'histoire des sciences **2**

II. Différents cas **3**
2.1 Source et observateur immobiles . . . 3
2.2 Source se rapprochant et observateur immobile . . . 3
2.3 Source s'éloignant et observateur immobile . . . 4
2.4 Vitesse supérieure à la vitesse de propagation . . . 4
2.5 Complément . . . 5
2.6 Sources d'information . . . 5

III. La roue Doppler **6**
3.1 Récepteur en mouvement, émetteur fixe . . . 6
3.2 Montage . . . 6
3.3 Acquisitions . . . 8

IV. Etude d'un fichier Wav **12**

V. De l'effet Doppler-Fizeau aux exoplanètes **15**
5.1 Introduction . . . 15
5.2 Mise en évidence du décalage du spectre . . . 16
5.3 Détermination de la période T de révolution de l'étoile . . . 16
5.3.1 Etude du spectre1_ o54.dat . . . 16
5.3.2 Etude de tous les spectres restants . . . 17
5.3.3 Détermination des vitesses radiales V_R par effet Doppler-Fizeau . . . 17
5.3.4 Détermination de la période de révolution T de l'étoile . . . 18

I. Un peu d'histoire des sciences

Christian Doppler (1803-1853) est un mathématicien et physicien autrichien. Il s'est rendu célèbre par une découverte qui porte maintenant son nom : l'effet Doppler. Sa publication la plus célèbre s'appelle *« Sur la lumière colorée des étoiles doubles et d'autres étoiles du ciel »* . Un peu plus tard et indépendamment, Hippolyte Fizeau découvre lui aussi ce phénomène et il l'étend aux ondes lumineuses. Ce phénomène s'applique à tous les types d'onde (sonores, ultrasonores et mécaniques à la surface de l'eau par exemple). Pour les ondes lumineuses, on emploiera le terme d'effet Doppler-Fizeau.

Christian Doppler.

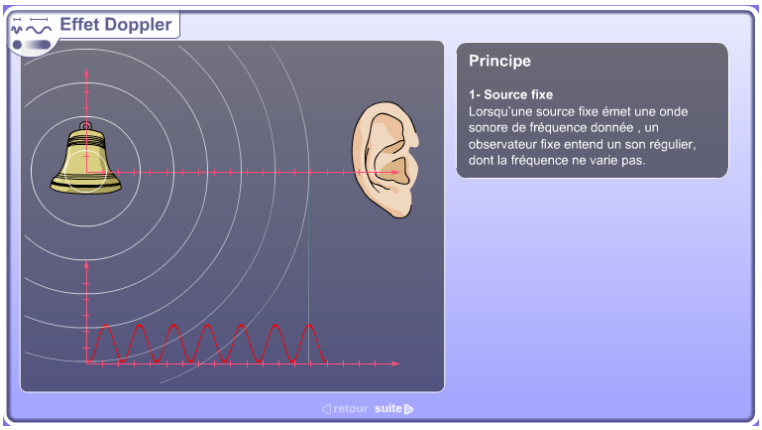
Hippolyte Fizeau.

L'effet Doppler est le décalage de fréquence d'une onde (généralement acoustique ou électromagnétique) entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. On l'observe tous les jours sans s'en rendre compte. Par exemple,le son d'une voiture est plus aigu quand celle-ci se rapproche de nous et plus grave quand elle s'éloigne de nous.

La description du phénomène sur le site de Wikipédia est parlante : Une personne est debout dans l'eau, au bord du rivage. Des vagues lui arrivent sur les pieds toutes les dix secondes. La personne marche, puis court en direction du large : elle va à la rencontre des vagues, celles-ci l'atteignent avec une fréquence plus élevée (par exemple toutes les huit secondes, puis toutes les cinq secondes). La personne fait alors demi-tour et marche puis court en direction de la plage ; les vagues l'atteignent avec une fréquence moins élevée, par exemple toutes les douze, puis quinze secondes.

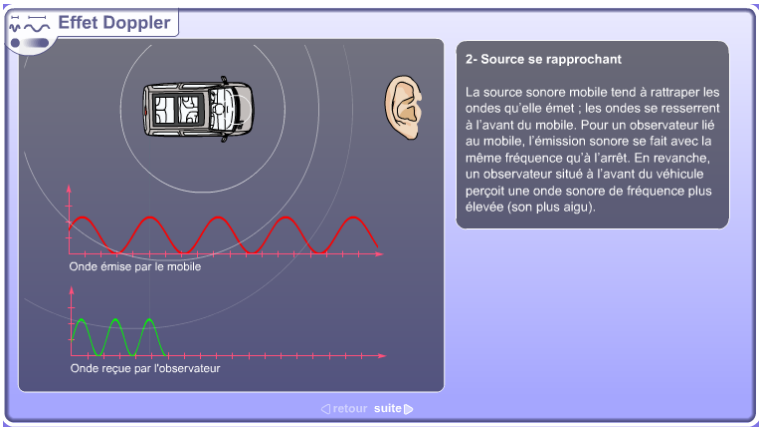
II. Différents cas

2.1 Source et observateur immobiles



Ici, on ne constate pas l'effet Doppler, puisque la source et le récepteur sont immobiles. L'onde sonore a une célérité c, une longueur d'onde λ, une période T et une fréquence f. L'observateur perçoit une onde sonore ayant les mêmes caratéristiques.

2.2 Source se rapprochant et observateur immobile

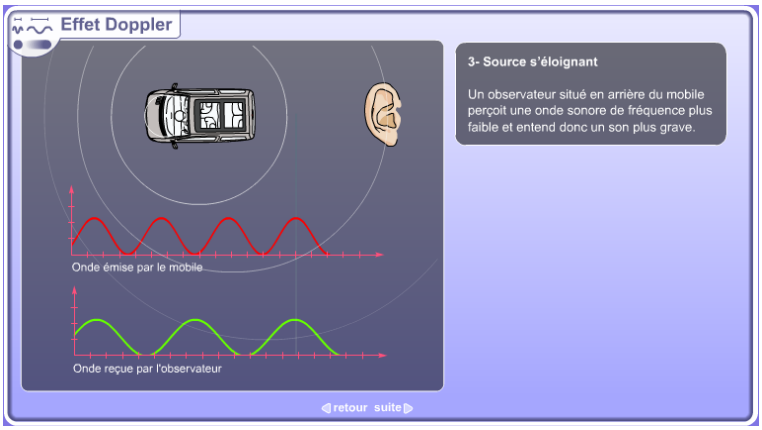


Un émetteur se dirige vers l'observateur situé à une distance d de l'émetteur à une vitesse constante v. A la date $t_1 = 0$, il y a émission d'un premier front d'onde. Celui-ci arrive à l'observateur à un temps $t_1' = \dfrac{d}{c}$.

A $t_2 = T$, un deuxième front d'onde est émis. Pendant ce laps de temps, l'émetteur a parcouru une distance $d' = v.T = \frac{v}{f}$. Le deuxième front d'onde arrive à l'observateur au bout d'un temps $t'_2 = t_2 + \frac{d-d'}{c}$). Soit T' la période de l'onde sonore perçue par l'observateur : $T' = t'_2 - t'_1 = t_2 + \frac{d-d'}{c} - \frac{d}{c}$. Ce qui donne :

- $\boxed{T' = T.(1 - \frac{v}{c})}$
- $\boxed{f' = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}}}$

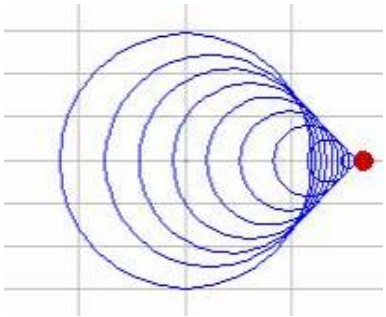
2.3 Source s'éloignant et observateur immobile



Si la source s'éloigne, on trouvera, en suivant le même raisonnement que précédemment (avec quelques ajustements au niveau des signes) :

- $\boxed{T' = T.\left(1 + \frac{v}{c}\right)}$
- $\boxed{f' = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}}}$

2.4 Vitesse supérieure à la vitesse de propagation



Voici ce que l'on observe quand la vitesse de déplacement de l'émetteur est supérieure à la vitesse de propagation de l'onde. C'est le cas des avions de chasse quand ceux-ci passent le mur du son ou plus visible sur l'image ci-contre des bateaux qui se meuvent plus vite que l'onde qu'ils provoquent à la surface de l'eau.

Lorsqu'un avion vole en vitesse subsonique (vitesse inférieure à la célérité du son dans l'air), il crée des ondes dites de pression qui se propagent à la célérité du son (**figure 1**). Lorsqu'il accroît sa vitesse et qu'il atteint la célérité du son, les ondes de pression s'accumulent devant le nez de l'avion (**figure 2**). Lorsqu'il dépasse la célérité du son (on dit qu'il passe le mur du son), il se produit alors des ondes de compression et de dilatation qui provoquent ce fameux « bang » perceptible à plusieurs dizaines de kilomètres à la ronde. Pour une vitesse supérieure à la célérité du son, les ondes se propagent derrière l'avion dans un cône appelé cône de Mach (**figure 3**).

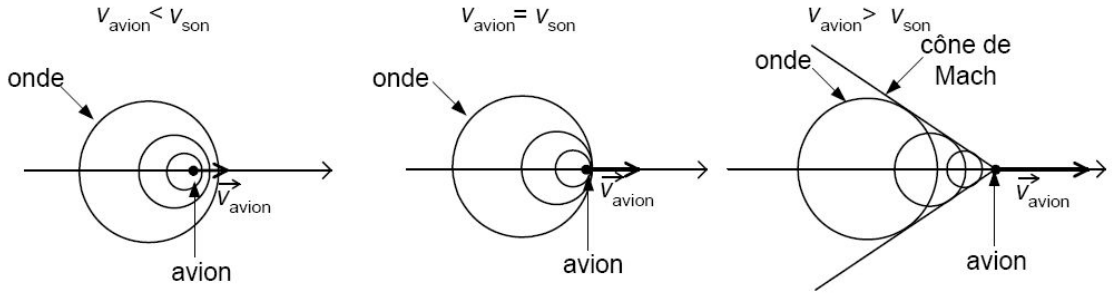


Figure 1 **Figure 2** **Figure 3**

Aussi incroyable que cela puisse paraître, c'est le même phénomène de passage du mur du son qui explique le claquement produit par un coup de fouet.

Extrait du baccalauréat session 2012

2.5 Complément

Il est à noter également que les élèves pourront trouver étrange que la fréquence perçue lorsque l'émetteur est en mouvement ne change pas. En effet, on a l'impression d'entendre un son de plus en plus aigu quand par exemple une sirène de pompier est en approche or la fréquence perçue est effectivement plus grande que la fréquence de l'émetteur mais cette fréquence est constante. Cette sensation vient du fait de l'augmentation de l'intensité du son. On peut montrer ce phénomène en branchant un haut-parleur à un GBF en signal sinusoïdal d'une fréquence d'environ 1 kHz et en faisant varier l'amplitude du signal émis.

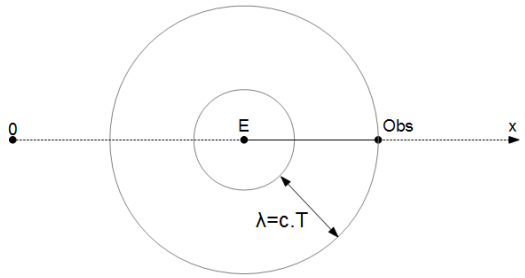
2.6 Sources d'information

Au gré de mon voyage sur le web, à la recherche d'informations, j'ai trouvé un petit dossier thématique très bien fait, il a été réalisé par Jean-François Récoché. Si vous voulez le voir il faut cliquer ici.

J'ai également utilisé des images tirées d'une animation flash de l'académie de Nantes que l'on peut retrouver ici. On trouve également ici et là les sons émis par le klaxon d'une voiture en mouvement et à l'arrêt que l'on peut utiliser pour étudier l'effet Doppler avec l'atelier scientifique. C'est une activité simple et fiable que je traiterai dans le chapitre 4. Pour les impatients, j'ai mis un lien qui vous emmènera directement au chapitre 4.

III. La roue Doppler

3.1 Récepteur en mouvement, émetteur fixe



L'observateur Obs est en mouvement, il a une vitesse v et se dirige vers l'émetteur.

On traitera uniquement le cas où le récepteur se rapproche de l'émetteur. On considère qu'à $t = 0$, l'observateur reçoit le premier front d'onde. A cet instant le deuxième front d'onde est à une distance $d = \lambda = c.T$. A l'instant $t = T'$(période de l'onde perçue par l'observateur), il reçoit ce deuxième front d'onde. Pendant ce laps de temps, il aura avancé vers l'émetteur d'une distance égale à $d' = v.T'$ et le deuxième front d'onde aura, lui, avancé vers l'observateur d'une distance $d'' = c.T'$. On obtient donc l'égalité suivante :

$v.T' + c.T' = c.T$

$T'.(v + c) = c.T$

$\boxed{T' = T.\frac{c}{c+v}}$ donc on a au final $\boxed{f' = f.(1 + \frac{v}{c})}$

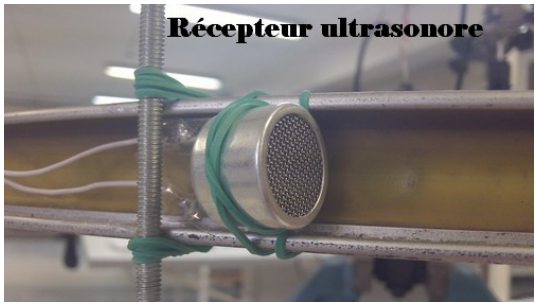
On peut aisément retrouver la vitesse du récepteur en isolant la variable v de l'expression précédente. et on obtient alors une formule du type $v = k.\Delta f$ où k est une constante.

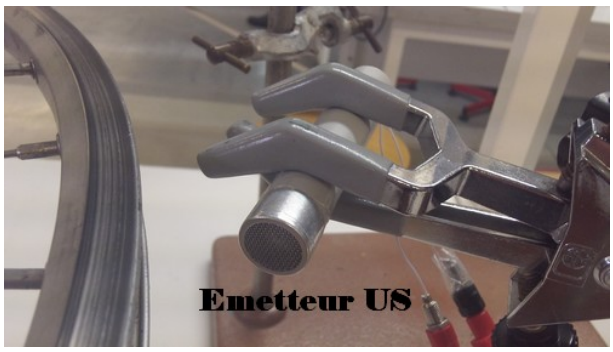
3.2 Montage

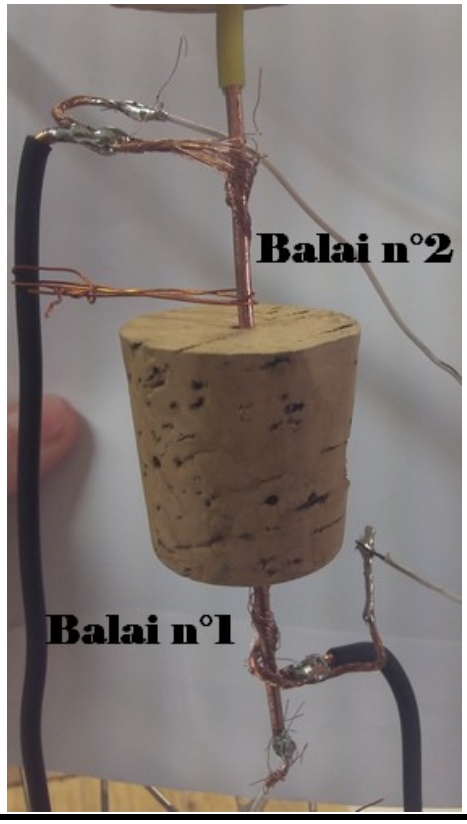
Voici une photo du montage, tel que je l'ai conçu.

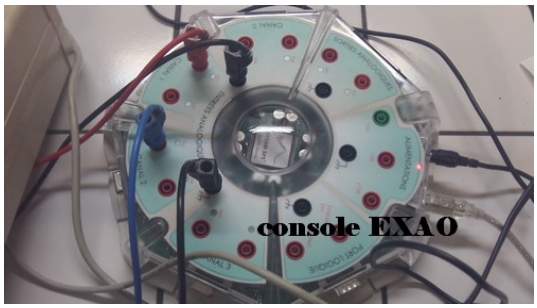
Ce montage comporte un transducteur ultrasonore qui sera notre récepteur d'ultrasons, j'ai pris le modèle de référence : **400SR** et je l'ai fixé à la roue. L'émetteur est le modèle de référence : **400ST**, il est alimenté par un GBF en signal sinusoïdal d'une fréquence d'environ 40 kHz (qu'il faut ajuster à la fréquence de résonance du récepteur) et d'amplitude 2,5 Volts. La principale difficulté de ce montage était d'éviter l'enroulement des fils de connexion du récepteur lorsque la roue tourne. Pour cela, j'ai réalisé un système de balai. Un des fils du récepteur arrive au premier balai (au-dessous du bouchon du liège), celui-ci tourne autour d'un fil de cuivre, ce dernier passant dans le moyeu pour rejoindre la console Sysam-SP5. Le deuxième fil du récepteur arrive au deuxième balai (au-dessus du bouchon), celui-ci tourne autour d'un autre fil de cuivre qui surplombe le montage pour rejoindre également la console Sysam.

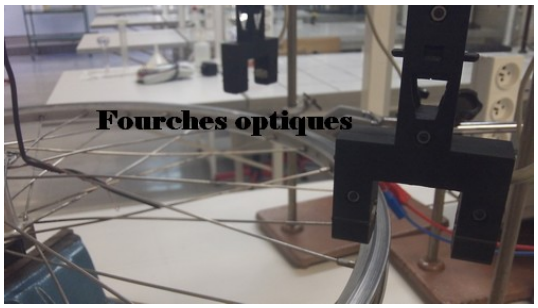
Il y a également deux fourches optiques reliées à un chronocompteur qui permet de mesurer le temps mis par le récepteur pour parcourir la distance qui sépare les deux fourches. Ces deux fourches sont positionnées de façon à peu près symétrique par rapport au point où commencera l'acquisition du signal reçu par le récepteur. On considérera la vitesse du récepteur comme étant constante entre les deux fourches.











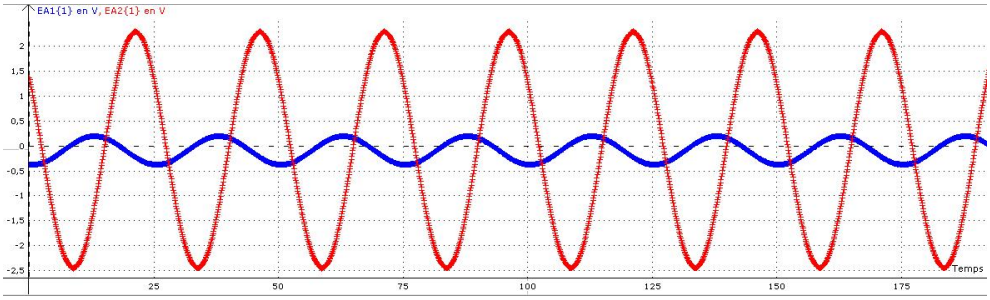
3.3 Acquisitions

Le récepteur US est branché sur la console sysam en voie EA1, l'émetteur est lui relié à la voie EA2. On place le récepteur à 7-8 cm de l'émetteur et on fait une acquisition continue du signal pour ajuster la fréquence du GBF à la fréquence de résonance du récepteur et ainsi capter le meilleur signal possible. On pourra aussi visualiser la tension de seuil qu'il faudra préciser dans l'onglet « déclenchement » pour que l'acquisition démarre quand le récepteur est suffisamment proche de l'émetteur.

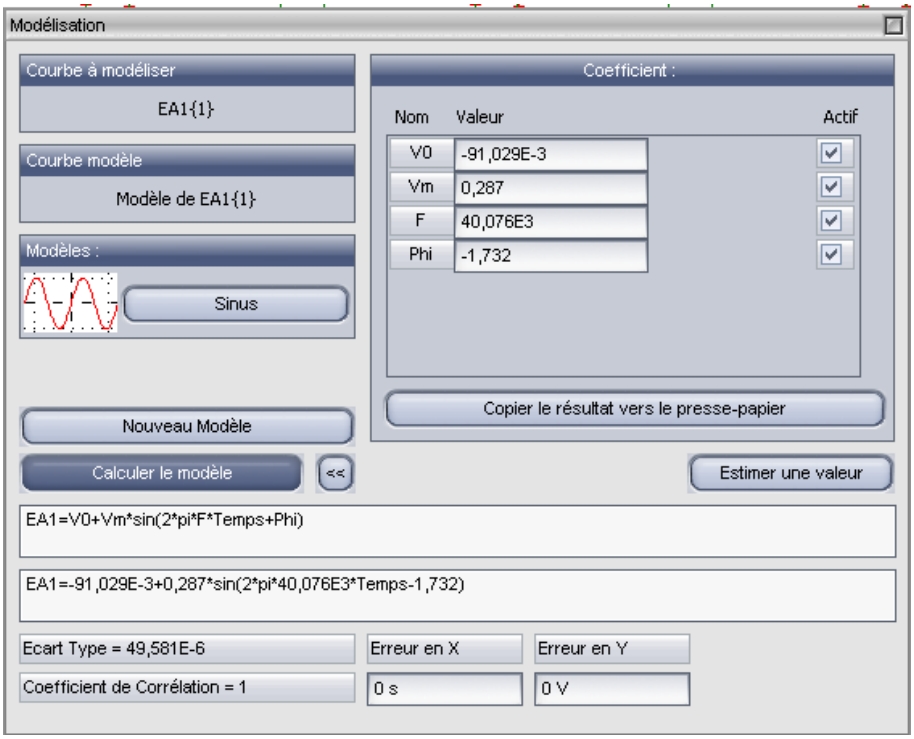
Les paramètres de l'acquisition seront les suivantes :

- un nombre de points de 2000
- un temps d'acquisition de 200 μs
- un déclenchement sur la voie EA1, celle du récepteur.
- une tension de déclenchement de 0,6 V, dans mon cas, afin que la distance entre l'émetteur et le récepteur au début de l'acquisition soit encore plus petite.

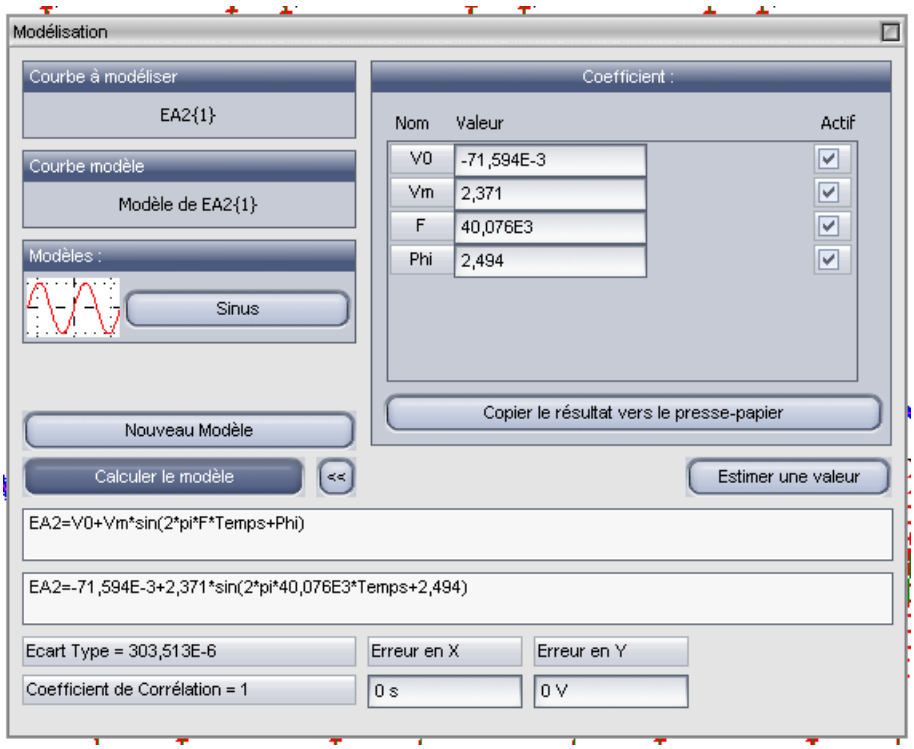
On fait une première acquisition, le récepteur étant à l'arrêt. On vérifie, en modélisant les deux sinusoïdes, que l'on a bien une fréquence d'émission identique à la fréquence de réception.



Pour plus de détails, je donne des impressions d'écrans avec les valeurs des fréquences trouvées lors des modélisations. La fréquence lue sur le GBF étant de 40,074 kHz, les valeurs trouvées sont très satisfaisantes puisqu'elles sont de 40,076 kHz dans les deux modélisations. Par contre, il est important de faire l'acquisition du signal du récepteur en même temps que celui du GBF car celui-ci n'est pas stable en fréquence. Lors de la deuxième acquisition avec le récepteur en mouvement, le GBF délivrait un signal d'une fréquence de 40,140 kHz. Cela fait une différence en fréquence non négligeable surtout que l'on travaille sur des Δf compris entre 100 et 200 Hz. C'est d'ailleurs pourquoi j'avais de grosses erreurs dans mes calculs de vitesse dans mon précédent montage dans lequel je faisais une acquisition en deux temps (récepteur à l'arrêt et récepteur en mouvement).



Valeurs de la modélisation du signal reçu.



Valeurs de la modélisation du signal émis.

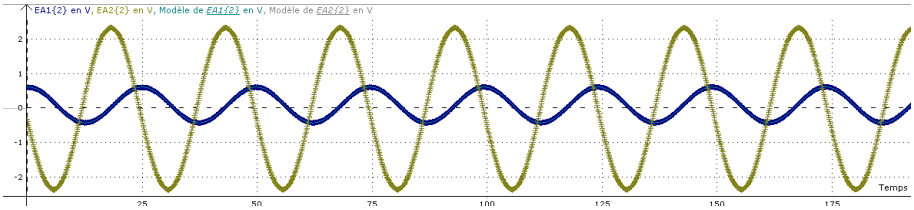
Pour mesurer la vitesse du récepteur par effet Doppler, je fais tourner la roue. Une fois que le petit bout de tige filetée qui sert de déclencheur au niveau des fourches optiques passe la deuxième fourche, je lance

l'acquisition et je remets à zéro le chronocompteur. J'obtiens alors au chronocompteur un temps de 0,173 s, soit 173 ms. Pour mesurer la distance parcourue pendant cette durée, il faut mesurer la distance qui sépare le récepteur US du centre de la roue donc le rayon R, ainsi que l'angle α entre les deux fourches optiques et le centre de la roue. Pour cela, on peut faire la méthode de la visée. Il est à noter qu'une erreur de 3 mm sur la distance parcourue entraîne une erreur de 1% sur la valeur de la vitesse mesurée. Voici ce que j'obtiens :

- la distance (récepteur-axe de la roue) est de 29 cm.
- l'angle entre les deux fourches et l'axe de la roue est de 68,4° soit 1,19 rad.
- la distance parcourue est alors $d = R.\alpha$=34,5 cm=0,345 m.
- le temps de parcours de cette distance est de t=0.173 s.

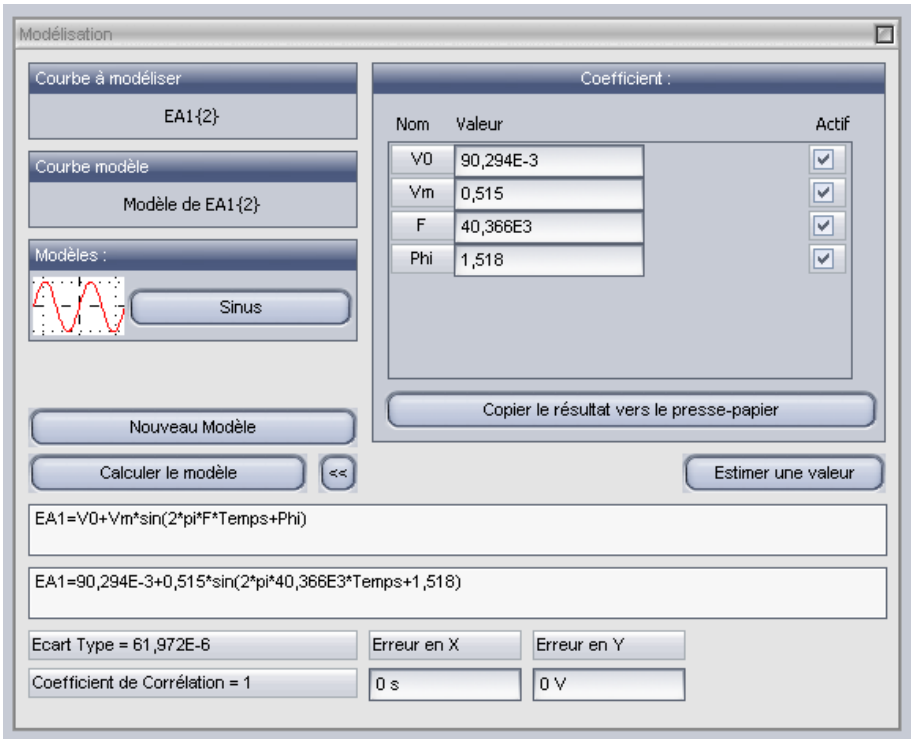
Par conséquent, la vitesse radiale de l'émetteur est de $\boxed{v = \frac{d}{t}}$ soit $v = \frac{0,345}{0,173} = 1,99 m.s^{-1}$.

Les signaux obtenus sont les suivants :

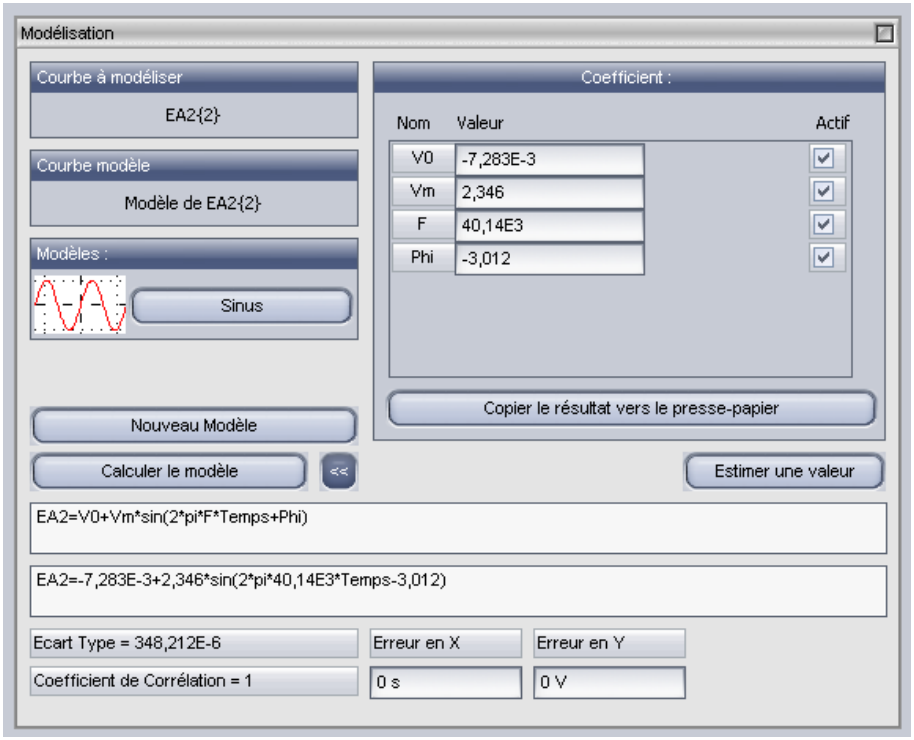


Signaux obtenus quand le récepteur est en mouvement.

Les modélisations nous donnent les valeurs de fréquence suivantes :



fréquence f_r de 40,366 kHz perçue par le récepteur.



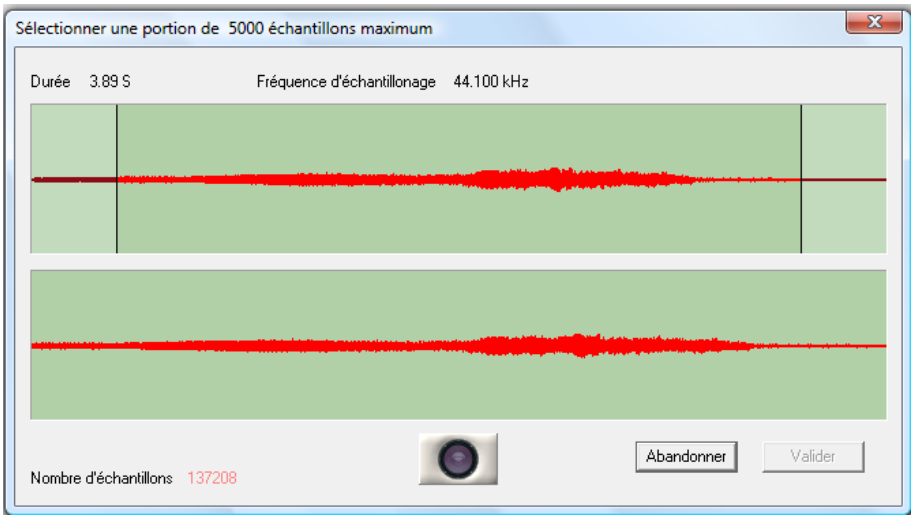
fréquence f_e de 40,140 kHz délivrée par le GBF.

Nous avons donc $\Delta f = 226$ Hz. Pour un récepteur en mouvement et un émetteur fixe, la vitesse du récepteur est donnée par la formule : $\boxed{v = \frac{\Delta f}{f_e}.c}$ soit $v = \frac{226}{40140}.340 = 1,91 m.s^{-1}$.

On obtient une différence de 4 % entre la valeur trouvée avec le chronocompteur et celle trouvée par effet Doppler. J'ai fait une cinquantaine de mesures. Et l'écart maximal trouvé a été de 5% entre les deux valeurs. Pour plus de précision on peut mesurer la distance entre les deux fourches optiques grâce à la vitesse mesurée par effet Doppler et au temps lu au chronocompteur lors d'une expérience préliminaire.

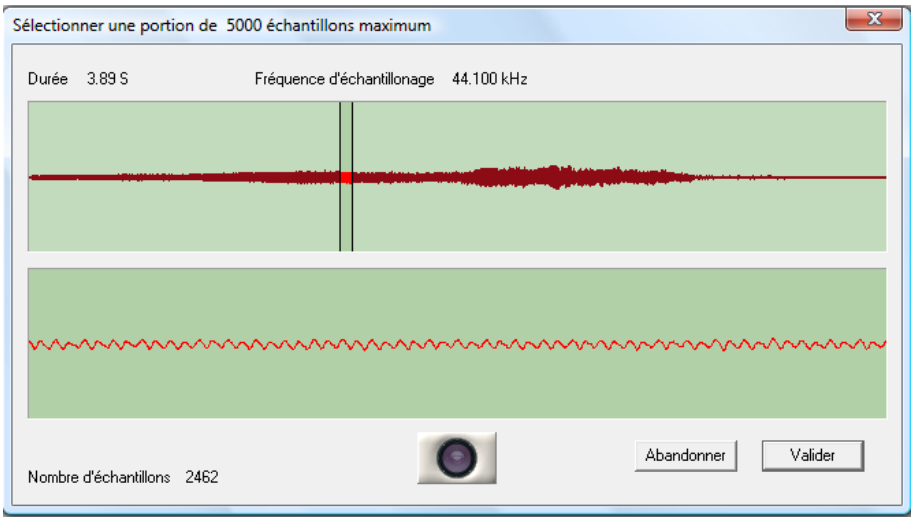
IV. Etude d'un fichier Wav

On commence par ouvrir un fichier .WAV. J'utiliserai le fichier dont le lien est donné plus haut, à savoir **Son Doppler Voiture Kangoo MG.WAV** sur le site de l'Académie de Nantes. En utilisant les formules données au début du document, les élèves doivent retrouver la formule qui permettra de connaître la vitesse de la voiture et surtout de savoir si elle est en excès de vitesse puisqu'elle roule en agglomération. En effet dans cette problématique nous ne connaissons pas la fréquence du klaxon de la voiture à l'arrêt. Il faudra donc mesurer la fréquence perçue par le micro (récepteur) quand la voiture (émetteur) s'approche et celle quand la voiture s'éloigne pour en déduire la vitesse. En ouvrant ce fichier son dans l'atelier scientifique de Jeulin, nous pouvons faire des mesures de fréquence assez simplement. Il sera préférable de mesurer une dizaine de périodes pour en déduire la fréquence. L'utilisation de la transformée de Fourier pour chercher la fréquence du pic de plus grande amplitude donne de bons résultats.

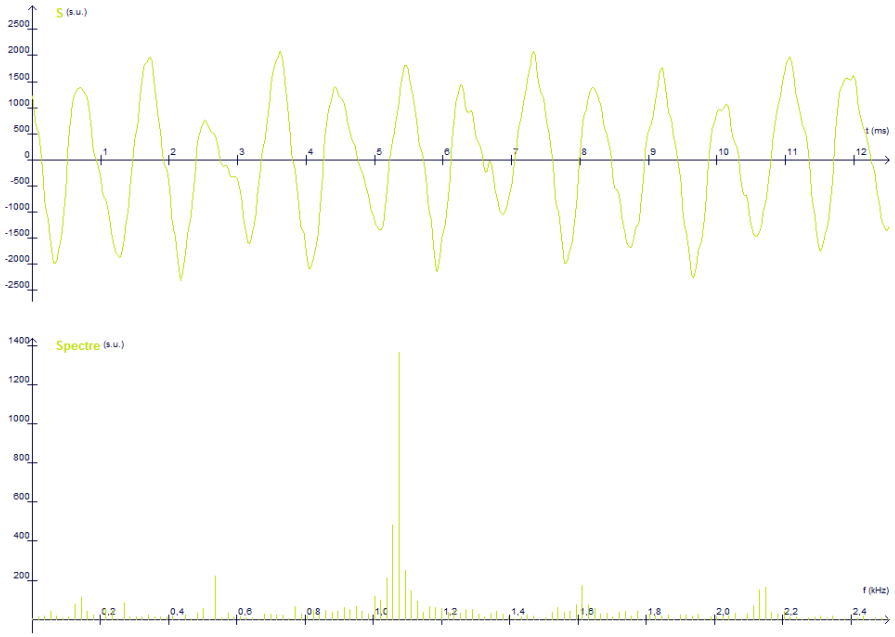


On ouvre le fichier WAV.

La première étape consistera à choisir un échantillon de moins de 5000 points.

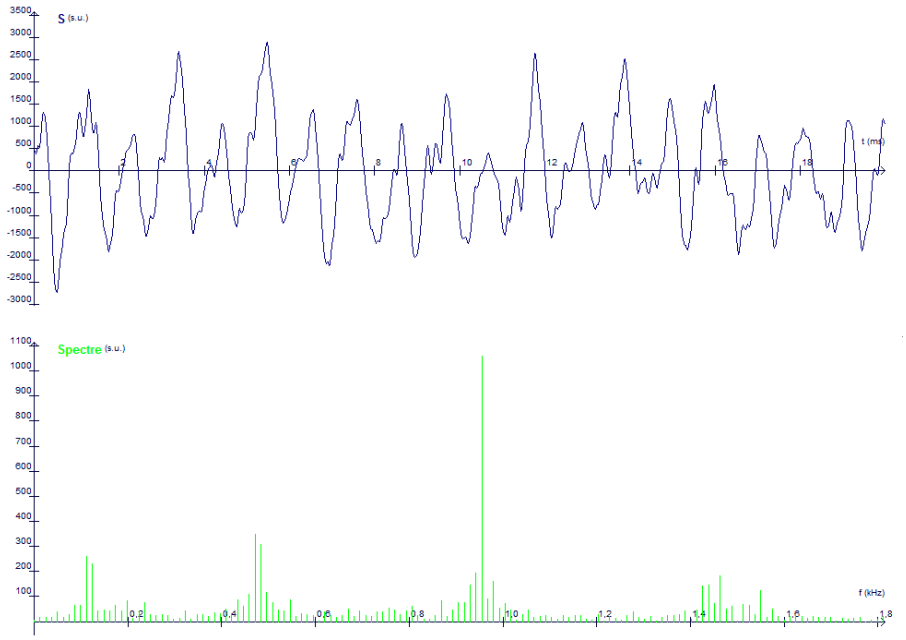


Le premier échantillon de points sera avant le pic d'intensité.



La transformée de Fourier donne un pic à $f_1 = 1075Hz$.

On fait la même chose avec un échantillon qui se situe après le passage de la voiture devant le micro.



La transformée de Fourier donne un pic à $f_2 = 955,6Hz$.

Avec ces valeurs, nous trouvons une vitesse de 20 m.s^{-1}, soit 72 km.h^{-1}. La voiture est en excès de vitesse.

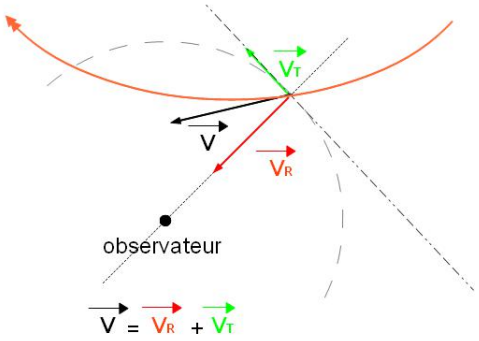
En effet on applique la formule suivante $\boxed{v = c.\dfrac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}}$, formule que l'on retrouve à partir des expressions données dans le chapitre 2.

V. De l'effet Doppler-Fizeau aux exoplanètes

5.1 Introduction

Il est extrêmement difficile d'observer une planète extra-solaire directement. En effet le rayonnement indirect d'une telle planète est très faible comparé au rayonnement direct de son étoile. De plus, ces exoplanètes sont souvent trop petites et trop proches de leur étoile pour pouvoir être observées directement avec un téléscope. Les astronomes utilisent donc l'effet Doppler-Fizeau pour détecter ces planètes.

La vitesse radiale d'une étoile (composante de sa vitesse mesurée dans la direction de la ligne de visée) ou d'un autre objet lumineux éloigné peut être mesurée précisément en prenant un spectre à haute-résolution et en comparant les longueurs d'onde mesurées de raies spectrales connues aux longueurs d'onde de ces mêmes raies mesurées en laboratoire. Par convention, une vitesse radiale positive indique que l'objet s'éloigne (on parle de décalage vers le rouge des longueurs d'onde ou « redshift ») et une vitesse négative que l'objet se rapproche (décalage vers le bleu ou « blueshift »).



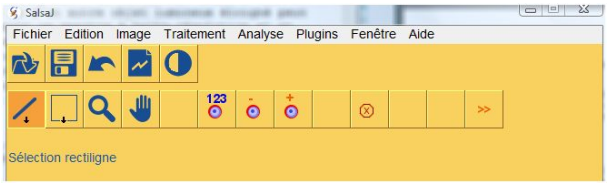
$\vec{V}_R$ représente la vitesse radiale d'un mobile suivant la trajectoire « orange ».

Même si la masse d'une exoplanète est petite comparée à la masse de l'étoile autour de laquelle elle gravite, elle reste suffisante pour provoquer un mouvement faible mais mesurable de l'étoile, cela se traduit par une variation de sa vitesse radiale.

Dans la manipulation qui va suivre, nous allons étudier le spectre d'émission d'une étoile sur une dizaine de jours grâce au logiciel SalsaJ pour prouver la présence d'une exoplanète autour de cette étoile en adaptant un exercice proposé par Roger Ferlet, Michel Faye et Suzanne Faye que l'on trouve ici.

5.2 Mise en évidence du décalage du spectre

On ouvre tout d'abord le logiciel SalsaJ que l'on peut télécharger ici.



Voici ce que l'on voit à l'ouverture du logiciel.

On étudie 11 spectres d'une étoile pris à des instants différents pendant une dizaine de jours. On télécharge ces images en .fit (une fois décompressées) à l'adresse donnée dans la partie « 4.1 ». On aura également besoin plus tard des données de ces spectres, on les trouve à la même adresse. Ils auront l'extension .dat. Les temps auxquels ont été pris ces spectres sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Spectre	fitc01	fitc02	fitc03	fitc04	fitc05	fitc06	fitc07
date t (en jours)	0	0,944505	1,969681	2,944838	3,970746	4,886585	5,924292

Spectre	fitc08	fitc09	fitc10	fitc11
date t (en jours)	6,963536	7,978645	8,973648	9,997550

Dans « SalsaJ », on clique sur « fichier » puis sur « ouvrir ». On se rend alors dans le répertoire où sont stockées les images « .fit ». On sélectionne la première image par un clic de souris puis on fait de même avec la dernière image mais en maintenant la touche « schift » enfoncée. Cela permet de sélectionner toutes les images en une seule fois. On clique alors sur le bouton « ouvrir ».

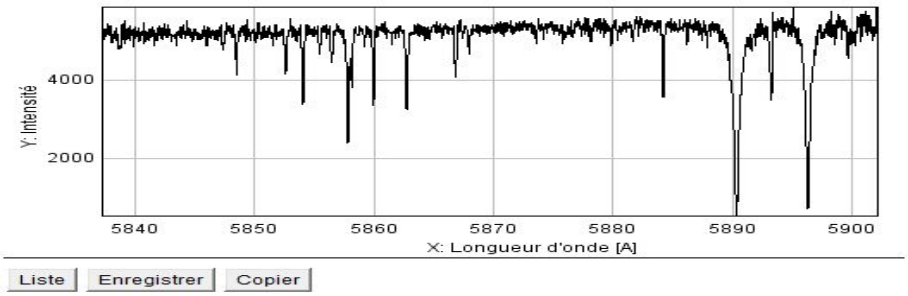
On clique ensuite sur « image » puis « piles » et « transférer images dans pile ». Ces images vont formées alors un petit film. Pour lire ce film, on clique sur « image », « piles » et « options des animations ». Dans la case « speed » on rentre la valeur « 1 », pour ralentir le temps de passage entre deux images, on coche également « Start Animation » si ce n'est pas déjà fait et enfin pour lancer l'animation, on clique sur « oui ». On observe alors le déplacement des raies dû à l'effet Doppler-Fizeau. On remarque que les raies se décalent dans le rouge puis dans le bleu.

5.3 Détermination de la période T de révolution de l'étoile

Pour se faire on utilise les mêmes spectres mais l'extension ne sera plus en « .fit » mais en « .dat ».

5.3.1 Etude du spectre1_ o54.dat

On clique sur « fichier » puis « ouvrir », on sélectionne le fichier adéquat. On obtient :



Graphique Intensité=f(λ).

On remarque, dans ce spectre de raies d'absorption, deux raies très marquées et distantes de moins de 1 nm (1 nm = 10 Å) qui correspondent aux raies du doublet du sodium. En passant la souris sur ces deux pics, on obtient une valeur approximative de leurs longueurs d'onde en lisant la valeur de X, sous le graphe ($X_1 \simeq 5890$ Å et $X_2 \simeq 5896$ Å). En cliquant sur le bouton « Liste », on cherche la valeur précise de ce pic. Ce sera les longueurs d'onde pour lesquelles l'intensité lumineuse sera minimale.

Finalement :

$$\boxed{\lambda_1 = 5890,411 \text{ Å et } \lambda_2 = 5896,366 \text{ Å}}$$

En comparant ces deux valeurs à celles du doublet du sodium, on constate qu'il y a une différence due à l'effet Doppler-Fizeau :

$$\boxed{\lambda_{Na_1} = 5889,950 \text{ Å et } \lambda_{Na_2} = 5895,924 \text{ Å}}$$

5.3.2 Etude de tous les spectres restants

On mesure λ_1 et λ_2 pour tous les spectres en suivant le même protocole et on rassemble ces résultats dans un tableau.

Spectre	**Date en jour**	$\boldsymbol{\lambda_1}$	$\boldsymbol{\lambda_2}$
Spectre1_ o54	**0**	5890,411	5896,366
Spectre2_ o54	**0,974505**	…	…
Spectre3_ o54	**1,969681**	…	…
Spectre4_ o54	**2,944838**	…	…
Spectre5_ o54	**3,970746**	…	…
Spectre6_ o54	**4,886585**	…	…
Spectre7_ o54	**5,924292**	…	…
Spectre8_ o54	**6,963536**	…	…
Spectre9_ o54	**7,978645**	…	…
Spectre10_ o54	**8,973648**	…	…
Spectre11_ o54	**9,997550**	…	…

5.3.3 Détermination des vitesses radiales V_R par effet Doppler-Fizeau

Pour obtenir cette vitesse, on applique la relation :

$$\boxed{V_R = c.\left(\frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{Na_i}}\right)}$$

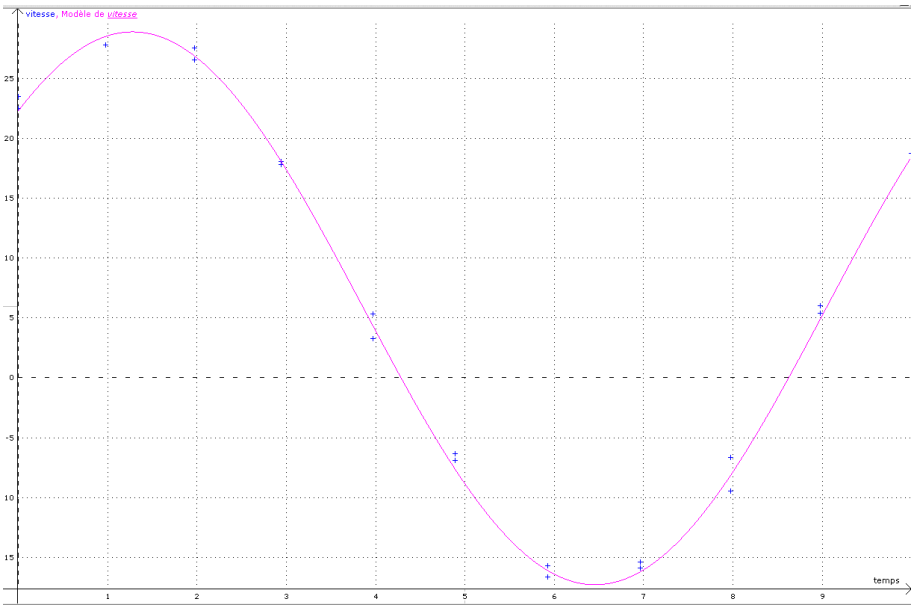
avec $\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_{Na_i}$, i valant tout d'abord 1 puis 2.

Spectre	**Date en jour**	$\boldsymbol{\Delta\lambda_1}$ **en Å**	$\boldsymbol{V_R}$ **en km.s^{-1}**
Spectre1_ o54	**0**	0,461	23,48
Spectre2_ o54	**0,974505**	…	…
Spectre3_ o54	**1,969681**	…	…
Spectre4_ o54	**2,944838**	…	…
Spectre5_ o54	**3,970746**	…	…
Spectre6_ o54	**4,886585**	…	…
Spectre7_ o54	**5,924292**	…	…
Spectre8_ o54	**6,963536**	…	…
Spectre9_ o54	**7,978645**	…	…
Spectre10_ o54	**8,973648**	…	…
Spectre11_ o54	**9,997550**	…	…

Spectre	Date en jour	$\Delta\lambda_2$ en Å	V_R en km.s^{-1}
Spectre1_ o54	**0**	0,442	22,49
Spectre2_ o54	**0,974505**	...	...
Spectre3_ o54	**1,969681**	...	...
Spectre4_ o54	**2,944838**	...	...
Spectre5_ o54	**3,970746**	...	...
Spectre6_ o54	**4,886585**	...	...
Spectre7_ o54	**5,924292**	...	...
Spectre8_ o54	**6,963536**	...	...
Spectre9_ o54	**7,978645**	...	...
Spectre10_ o54	**8,973648**	...	...
Spectre11_ o54	**9,997550**	...	...

5.3.4 Détermination de la période de révolution T de l'étoile

A l'aide d'un tableur, comme LATIS, on rentre les dates des spectres dans la première colonne et dans la deuxième, on rentre les valeurs calculées de V_R. On fera ensuite une modélisation en choisissant une allure en cosinus du type $\boxed{V_R = V_0 + V_m.\cos\left(\frac{2.\pi.t}{T} + \varphi\right)}$.



Modélisation $V_R = f(t)$.

On trouve pour cette étoile une période de révolution de 10,35 jours. On montre ainsi que l'étoile possède bien une exoplanète en orbite autour d'elle. De plus cette exoplanète a également une période de révolution de 10,35 jours autour de l'étoile (plus précisément, autour du barycentre du système double étoile-planète). On pourrait avec les autres valeurs trouvées lors de la modélisation et en utilisant des lois de mécanique newtonienne déterminer la masse de cette exoplanète et ainsi conclure sur le type de planète détectée. La première exoplanète orbitant autour d'une étoile fut découverte en 1995. Il s'agit de « 51 Pegasi ». Depuis plusieurs centaines d'exoplanètes ont été identifiées en utilisant cette méthode.