



La Musique du Soleil.



Elèves participants :



CARTIER
Romain



FADLI
David



LABAT
Guillaume



MARTRE
Philippe



RAMON
Alicia



VEYRET
Simon



Avec LACLAVERIE Jean-Michel
Professeur encadrant
Lycée Bernard Palissy- AGEN

Académie de Bordeaux

Table des matières

RESUME

ABSTRACT

RESUME POLONAIS

KEY-WORDS

PARTENAIRES

INTRODUCTION

1- Acoustique solaire

1.1 Des ondes acoustiques dans le Soleil

1.2 Des outils pour l'observation des phénomènes acoustiques du Soleil.

2- Approche expérimentale des modes propres de vibration d'une sphère

2.1 Influence du diamètre de la sphère sur les fréquences de résonance.

2.2 Influence de la température

2.3 Réflexion sur les couches internes

3- Mesures par effet Doppler

3.1 Mode opératoire

3.2 Etude d'un déplacement simple

3.3 Les oscillations

4- Le Soleil : un instrument de musique

4.1 Comparaison avec le spectre d'un instrument de musique

4.1.1 Spectre d'une timbale

4.1.2 Spectre d'une cloche

4.1.3 Spectre d'une cymbale

4.1.4 Spectre d'une grosse caisse

4.1.5 Spectre d'un piano

4.1.6 L'eau qui boue

4.2 Une reconstitution de la musique solaire

Conclusion

Sources documentaires

Annexes

- Annexe 1 : Evolution des connaissances sur le Soleil

- Annexe 2 : Vers une interprétation ondulatoire

- Annexe 3 : L'effet Doppler pour l'étude du Soleil

- Annexe 4 : Mise au point de l'expérience Doppler

- Annexe 5 : Quelques fréquences des modes de pression : spectres acoustiques du Soleil

- Annexe 6 : Notre programme en Visual basic.(Programmation David Fadli)

RESUME :

Le Soleil est un instrument de musique dont nous ne pouvons percevoir le son car il est trop grave et il n'y a pas de milieu matériel pour permettre sa propagation jusqu'à nous. L'étude sonore est cependant possible en regardant vibrer le Soleil, comme le fait la sonde SOHO. Le plaisir du musicien n'est pas le seul intérêt de la musique de notre étoile. Son écoute permet en effet de mieux connaître la structure solaire. Le Soleil est un résonateur sphérique. L'air contenu dans une sphère de Helmholtz en est un aussi. Nous étudions dans ce mémoire les fréquences de résonance d'une sphère, et les renseignements qu'elles peuvent donner sur sa structure. Pour accéder aux fréquences acoustiques solaires, le spectromètre à résonance magnétique Zeeman GOLF de la sonde SOHO, mesure le décalage Doppler de certaines raies du sodium du spectre solaire. Nous étudions un modèle simplifié du système sonde-Soleil avec une maquette de laboratoire utilisant l'effet Doppler sur des signaux ultrasonores. Enfin, nous comparons le spectre du Soleil à celui de divers instruments de musique avant de tenter une reconstitution originale de sa musique.

ABSTRACT

The sun is a musical instrument whose sound can't be heard because it is too hoarse. Moreover, there is no material environment likely to transmit it. Yet, we could study that sound by watching the sun vibrate, just as done by the Soho. A musician's pleasure isn't the only reason why the music of our star is so fascinating. Indeed, when we listen to the music of the sun we more easily understand its structure. The sun is a sphere that produces a sound. The air confined in a Helmholtz' s sphere produces a sound too. In these documents, we are going to analyse how often a sphere produces a sound wave and all the information it can provide us with this structure. In order to have access to the sound waves of the sun, the magnetic resonance spectrometer Zeeman GOLF of the Soho measures the Doppler gap between some sodium beam of the solar spectrum. We are going to study a simplified pattern of the system probe/sun with a lab model using the deffect on ultrasound signals. Finally, we are going to compare the spectrum of the sun to various musical instruments before going to reconstitute its original music.

RESUME (en polonais en hommage au grand astronome polonais Nicolas Copernic, qui plaça le Soleil au centre du système solaire):

Słońce jest instrumentem muzycznym którego nie możemy dostrzec gdyż jest zbyt niski i nie ma materiału który umożliwiłby nam jego propagację do nas. Nauka dźwięku jest jednakże możliwa oglądając drgania słońca, tak jak robi to sonda soho odtworzenie muzyki słonecznej jest tematem tej pracy. Przyjemność muzyki nie jest samym interesem muzyki naszej gziędzy. Jego skuchanie pozwoli w efekcie lepiej poznać strukturę skoneczną. Studjujemy w tej kronice częstotliwości rezonansu stery etekt doplera wykorzystany przez aparaty skujące do obserwacji, następnie porównujemy sekońce pośród różnyc instrumentów muzycznych zanim zaczniemy rekonstrukcję oryginalną swej muzyki.

KEY-WORDS : Soleil – Acoustique – Effet Doppler – Analyse de Fourier.

PARTENAIRES :

- Monsieur Jean-Maurice Robillot a participé à la réalisation d'un des 3 instruments de la sonde **SOHO** (*), dédiés à la sismologie solaire : un spectromètre à résonance magnétique Zeeman sur les raies solaire du sodium, instrument désigné par « **GOLF** »

(Global Oscillations at Low Frequencies). Ce partenaire a été trouvé grâce à Monsieur Yves Leroyer, de la Société Française de Physique, et à Madame Nathalie Brouillet, astronome au Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux « LAB-OASU » (Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers). Monsieur Robillot avait antérieurement développé à Bordeaux un instrument prototype à résonance à 5 canaux « MR5 » et avait fait réaliser 6 aimants pour le réseau de 6 stations d'héliosismologie autour du globe « IRIS » (International Research on the Interior of the Sun), mis en œuvre par Eric Fossat, astronome du « LUAN » (Laboratoire Universitaire d'Astronomie de Nice). C'est cette expérience des spectromètres à résonance et leur application à l'héliosismologie qui a entraîné la participation de Mr Robillot à l'instrument « GOLF » et au début de l'analyse des données... Puis, avant de partir à la retraite en 2005, il a participé à la conception d'un instrument de nouvelle génération à 15 canaux « GOLF New Generation ». Ce spectromètre a été développé sous la direction de Madame Sylvaine Turck-Chièze au Département d'Astrophysique « DAPNIA » du CEA, et un prototype vient d'être testé en été 2008 à l'observatoire d'Izaña de Tenerife, observatoire à vocation internationale de l'« IAC » (Instituto de Astrofísica de Canarias).

- Eric Fossat, Astronome à l'Observatoire de Nice, détaché à l'Université depuis 1967. Avant tout observateur et instrumentaliste, il a été pionnier de l'héliosismologie dès les années 1970, avant d'être de nouveau pionnier de l'Astronomie en Antarctique depuis 2000. Coordinateur du projet 'Stella Antarctica' pour la promotion de l'astronomie du futur à la station franco-italienne Concordia, il a reçu en 2002 le prix du rayonnement français pour l'ensemble de ses activités scientifiques, particulièrement dans le domaine de la coopération internationale. Il a accepté de répondre à nos questions par mail.
- L'orchestre d'harmonie la Lyre Agenaise, pour le prêt d'instrument de musique et l'enregistrement de la musique d'orchestre.
- Ludmila Wojtalczyk pour la traduction en polonais.

INTRODUCTION

Le Soleil est un système qui oscille autour d'un état d'équilibre principalement grâce aux forces de pression qui sont ici des forces de rappel, comme un pendule pesant oscille à cause des forces de gravité. Ces oscillations engendrent des ondes acoustiques stationnaires qui s'établissent dans le Soleil, comme dans un instrument de musique.

Ecoutez un morceau de musique symphonique. Si votre oreille est attentive et si vous savez analyser les signaux qu'elle reçoit, vous pouvez en tirer des renseignements sur les musiciens, le compositeur, le nombre d'instrument et leur type... comme font les astrophysiciens avec le Soleil, grâce à une écoute optique. En effet les ondes acoustiques solaires sont des ondes mécaniques, qui ont besoin d'un support matériel pour se propager. Le vide entre le Soleil et la terre ne permet pas cette propagation. Par contre, la lumière n'est pas une onde mécanique, mais électromagnétique et sa propagation est possible dans le vide. Alors les physiciens regardent vibrer le Soleil puisqu'ils ne peuvent l'écouter directement. L'analyse des vibrations du Soleil a permis d'améliorer les connaissances sur notre étoile, en particulier sur son cœur, car les ondes acoustiques se propagent beaucoup plus rapidement que la lumière dans le cœur et dans la zone radiative du Soleil ! Résultat étonnant pour nous et très utile pour les astrophysiciens.

Nous ne sommes que de simples élèves de lycée, avec à notre disposition le matériel habituel d'un laboratoire du secondaire. Nous nous sommes demandés quelles expériences simples nous pouvions faire pour illustrer l'acoustique solaire. Nous avons donc commencé

par un travail de lecture et d'analyse de nombreux articles sur le Soleil et sur l'héliosismologie pour connaître un peu mieux le sujet de notre travail, qui n'est pas étudié au lycée. Cette étude indispensable pour structurer notre progression, constitue la première partie de mémoire. Nous avons compris qu'il n'est pas possible de faire des mesures acoustiques directes sur le Soleil avec le matériel à notre disposition. Alors nous avons cherché des expériences de laboratoire pour illustrer :

- Les fréquences de résonance d'un résonateur sphérique : nous étudierons les fréquences de résonance d'un résonateur sphérique de Helmholtz et leur lien avec la taille et la température de la sphère. Les résultats obtenus sur ces sphères de laboratoire permettent une comparaison avec les fréquences de résonance solaire qui renseignent sur la taille et la température des différentes zones solaires.
- Les mesures par effet Doppler : l'effet Doppler est utilisé par la sonde Soho pour déterminer les fréquences de résonance du Soleil
- L'analyse de Fourier : Cette analyse permet de déterminer la part des différents modes propres dans la vibration du soleil ou d'un instrument de musique.
- Une reconstitution de la musique solaire : les reconstitutions de la musique solaire que l'on peut écouter sur le site de l'université de Stanford (http://soi.stanford.edu/results/one_mode_1_1.aiff) par exemple nous ont semblé décevantes. Cette « musique » n'est pas belle et s'apparente plus à un bruit qu'à un morceau symphonique. Nous avons cherché une voie d'obtention d'une musique solaire, qui n'utilise pas les mêmes critères que celles des héliosismologues, mais qui donne un résultat plus esthétique.

Les buts de notre étude sont nombreux, c'est pour cela que nous avons travaillé à 6 élèves dans ce groupe, entre le mois de mars 2009 et aujourd'hui. Peut-être que certains développements de notre travail sembleront superflus au jury, mais ils ont été indispensables pour nous pour comprendre les phénomènes que nous avons rencontrés.

Nous avons lu plusieurs mémoires d'astronomie présentés aux Olympiades les années précédentes, et nous y avons trouvé beaucoup de calculs qui nous ont semblé difficiles pour des élèves de Terminale S. Nous avons donc choisi, avec notre professeur, de privilégier dans ce travail la présentation du sens physique des expériences que nous avons faites, sans utiliser un outil mathématique trop difficile pour nous. Nous n'avons pas voulu utiliser ou recopier des formules sans vraiment les comprendre. Nous nous sommes limités à de la physique et des calculs simples, mais qui permettent cependant d'aborder les résultats les plus importants de l'acoustique solaire.

Donc après avoir présenté un petit aperçu de l'état actuel des connaissances sur le Soleil, nous ferons l'étude de résonateurs sphériques de Helmholtz, puis une expérience pour illustrer l'effet Doppler qu'utilise la sonde Soho pour déterminer les fréquences de résonance du Soleil. Nous comparerons ensuite le spectre acoustique du Soleil à celui de plusieurs instruments, et nous tenterons une reconstitution originale de la musique solaire.

1- Acoustique solaire

1.1 Des ondes acoustiques dans le Soleil

Un modèle physique du Soleil, avec ses caractéristiques accessibles, fut établi durant la première moitié du XX^e siècle. Pour cela il a fallu connaître trois caractéristiques essentielles de l'astre :

- sa masse, de $1,99 \cdot 10^{30}$ kg, déterminée par l'étude de l'attraction de l'astre sur d'autres corps connus comme la Terre.

- son âge de 4,6 milliards d'années déterminé grâce à l'étude des éléments radioactifs de longue période comme l'uranium 235 des couches superficielles.
- sa composition d'origine trouvée à l'aide d'une étude spectrographique de la surface du Soleil.

Ce Soleil théorique correspond, à quelques % près d'erreur, au vrai Soleil pour les données observables directement comme le rayon, la luminosité, ou encore la température externe. Cependant, il reste encore à vérifier le modèle obtenu pour l'intérieur de l'étoile, ce qui pose un problème puisque les couches profondes des étoiles sont opaques à tout rayonnement électromagnétique donc inaccessibles à toute vision directe.

En 1960, l'astrophysicien californien Robert Leighton découvre que la surface du Soleil est animée de mouvements ondulatoires d'une période moyenne de cinq minutes. Ces mouvements sont comparables à ceux animant la Terre lors d'un séisme : une nouvelle science, l'héliosismologie venait de naître.

Cette discipline étudie certains mouvements du Soleil. Cette sismologie particulière étudie des vibrations du Soleil qui se propagent depuis sa surface et vont se réfléchir sur les différentes couches intérieures. L'étude de ces vibrations permet de "voir" l'intérieur du Soleil et de mesurer plusieurs types de caractéristiques de notre étoile. Elles ont été décelées grâce à des télescopes au sol puis à l'aide de missions spatiales.

Le principe de l'héliosismologie est le même que celui de la sismologie terrestre. On détermine la composition et l'arrangement d'un milieu enfoui par l'étude de la propagation d'ondes acoustiques dans ce milieu, sachant que la vitesse du son dépend de la masse volumique et de la température du milieu traversé.

Ces ondes acoustiques, que le vide de l'espace ne permet pas d'arriver jusqu'à nous, s'enfoncent plus ou moins profondément dans le Soleil. Des successions de réfraction et de réflexion permettent l'établissement d'ondes stationnaires. Un grand nombre de modes d'oscillations sont possibles. On peut comparer cela à l'air pouvant entrer en résonance dans un tube ouvert aux deux extrémités et excité par un haut-parleur, comme vu en cours de spécialité.

Il faut tout d'abord un excitateur, c'est à dire un système produisant des vibrations. Pour le tube, dans nos expériences de cours de Terminale S, il n'y a qu'un excitateur, le haut-parleur. Par contre le Soleil est excité en permanence par de nombreux excitateurs que sont les granules de la taille de la France entrant en convection. Les mouvements convectifs créent des vibrations qui sont des ondes sonores. Selon un article de M. Fossat, « le bouillonnement convectif a, au voisinage de la surface un temps caractéristique de quelques minutes et une dimension de l'ordre de 1500 km dans toutes les directions, qui correspond à la demi-longueur d'onde pour des périodes de l'ordre de 5 minutes sachant que la vitesse du son à la surface solaire est de l'ordre de 7 à 8 km/s. » Le cours de Terminale de physique présente la notion de longueur d'onde, c'est à dire la période spatiale du phénomène : $\lambda = cT = c/f$.

Donc ici $\lambda/2 \approx 8000 \cdot 5.60/2 = 1200000$ m soit 1200 km. On retrouve bien l'ordre de grandeur de la dimension des granules.

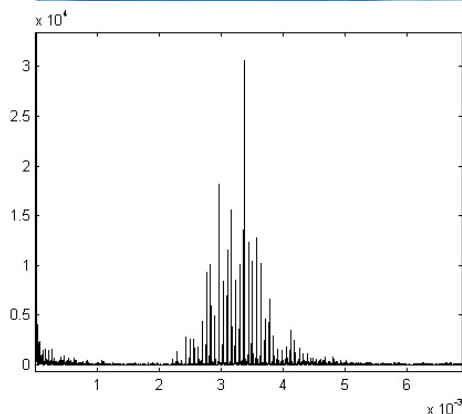
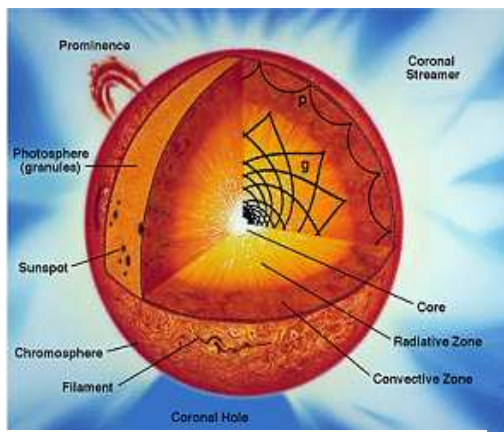
Le tube peut entrer en résonance pour des fréquences multiples d'une fréquence fondamentale. Si le haut-parleur produit un son correspondant à une de ces fréquences, l'air dans le tube vibre fortement en certains points (Ventre) et faiblement en d'autres (Nœud). Des ondes stationnaires s'établissent. Par une suite de réflexions partielles, une partie des ondes restent dans le tube pour alimenter l'onde stationnaire, et le reste se propage vers l'extérieur. Il en est de même dans la sphère solaire. Des ondes stationnaires s'établissent dans la sphère solaire, pour permettre l'établissement de modes d'oscillations en trois dimensions dans l'ensemble du Soleil. On observe des nœuds et des ventres bien localisés. Néanmoins, ces oscillations restent modestes puisque les variations d'amplitude atteignent au maximum dix mètres. Le Soleil est soumis à des mouvements de convection similaires à ceux présents dans

une casserole d'eau bouillante. Ainsi, comme les bulles éclatant à la surface de l'eau, mais à bien plus basse fréquence, les grains de gaz du Soleil sont chauffés et produisent un son. Les sons provenant du Soleil découlent de propagation de perturbation de pression créant des ondes acoustiques c'est à dire de même nature que les ondes sonores que nous connaissons.

L'héliosismologie vise donc à étudier la partie visible de ces oscillations, c'est à dire les " tremblements " de la surface du Soleil en quantifiant leur fréquence et leur vitesse. Le Soleil est un « tambour stellaire » et sa surface vibre comme la peau d'un tambour. Mais il faut tout d'abord s'intéresser aux causes du phénomène. Pourquoi la surface du Soleil oscille-t-elle ? Qu'est-ce qui provoque ces mouvements de convection à l'origine de l'excitation ?

Toute oscillation nécessite la présence d'une force de rappel. Dans le cas de notre étoile, il existe deux possibilités. Les ondes de gravité sont dues à l'association de la force de rappel (la poussée d'Archimède) à la force de gravitation du Soleil. Elles sont de basses fréquences et restent confinées dans la zone interne de l'étoiles car elles sont amorties lorsqu'elles traversent la zone convective externe. Elles nous permettent de mieux connaître la structure interne du Soleil mais sont difficiles à détecter.

La deuxième catégorie regroupe les forces de pression Dans ce mode d'oscillation, la compressibilité du gaz solaire joue le rôle d'un ressort et provoque la propagation d'ondes acoustiques.



Comme schématisé ci-contre, notre Soleil est donc le siège de modes vibratoires de deux types : ceux d'ondes sonores ou « modes de pression » excités par le bruit dans la photosphère (couche convective externe), et ceux de houles profondes ou « modes de gravité » excités dans la zone limite convective-radiative. C'est la détection et l'analyse des multiples modes oscillatoires du Soleil qui permet d'étudier la structure et la dynamique interne de notre étoile. Mais malgré les progrès récents la détection des « modes-p » doit être encore améliorée, et la détection des « modes-g » n'en est encore qu'à ses débuts.

Ces oscillations se décomposent en une multitude de modes propres qui se comptent théoriquement par millions et dont plusieurs milliers ont déjà été recensés. Chacun de ces modes est porteur d'informations sur les couches traversées. L'héliosismologie permet ainsi la collecte de renseignements inédits sur l'intérieur encore plein de mystère de l'astre.

Le cours de spécialité de Terminale n'aborde l'étude des fréquences de résonance que pour un système à une dimension, soit une colonne d'air ou une corde. Mais la résonance est possible en une dimension dans l'air d'une clarinette, en deux dimensions sur une peau tendue d'une percussion ou en trois dimensions dans le Soleil.

En cours de spécialité, nous utilisons l'analyse de Fourier pour caractériser le timbre d'un instrument, c'est à dire décomposer le signal sonore en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences et d'amplitude différentes. Ce qui est possible pour le son d'une trompette l'est aussi pour le Soleil. C'est grâce à l'analyse de Fourier que les acousticiens du Soleil ont pu déterminer les fréquences de ses modes propres. En effet, un très grand nombre de modes sont superposés à un instant donné, et l'analyse de Fourier permet de déterminer la

part de chaque mode dans les vibrations globales. Le spectre ci-dessus montre que les modes de plus grande amplitude ont une fréquence de l'ordre de 3 mHz.

Notre Soleil n'est pas l'unique astre parcouru par des ondes acoustiques. C'est le cas pour la plupart des étoiles. En 1984, on découvrit qu'Alpha du centaure subissait aussi des oscillations de période proche de 5 minutes. Mais ce qui reste étonnant, c'est la faible amplitude de ces oscillations solaires.

1.2 Des outils pour l'observation des phénomènes acoustiques du Soleil.

Les vibrations acoustiques solaires sont lentes. Il faut des durées d'observation très longue pour en faire une étude correcte. Trois moyens différents ont été conçus pour étudier pendant 6 mois la musique produite par le Soleil :

- Spatial avec SOHO (*Observatoire Solaire et Hélosphérique / Solar and Heliospheric Observatory*) qui est une sonde spatiale de 12 instruments pour l'étude du Soleil, et qui a été placée en 1995 au point de Lagrange L1 situé à 1,5 million de km dans la direction du soleil, où les forces d'attractions de la Terre et du Soleil entraînent en ce point une compensation entre vitesse orbitale solaire et vitesse orbitale terrestre, qui induit une "orbite résultante" en co-révolution avec l'orbite terrestre. (Cette phrase a été corrigée par notre partenaire M Robillot. Nous avons simplement écrit que les forces d'attraction de la Terre et du Soleil se compensent en ce point.)
- Un réseau de stations sur toute la planète (lorsque le Soleil se couche sur une station, une autre prend le relais)
- Une station dans l'antarctique car le Soleil est levé pendant 6 mois.



SOHO est un satellite qui a pour but d'étudier le Soleil sous toutes ses formes. Il est aujourd'hui en orbite autour de l'étoile. L'Institut français d'astrophysique spatiale a conçu plusieurs des appareils de la sonde, notamment GOLF (Global Oscillations at Low Frequencies), qui enregistre par effet Doppler les vibrations du Soleil. M Robillot et M Fossat, nos partenaires, ont participé à ce projet.



Les instruments GOLF et [MDI \(Michelson Doppler Imager\)](#) ont permis pour la première fois la mesure de la rotation du Soleil dans ses régions les plus internes. Les observations, analysées par les scientifiques du Service d'Astrophysique (SAp) du CEA-DAPNIA, révèlent que l'intérieur du Soleil tourne à une vitesse constante comme le ferait un corps solide. La précision remarquable (de l'ordre de 2 nanoHertz) sur la mesure de la fréquence de ces ondes acoustiques a permis de mettre

fin à un débat sur la variation de la rotation entre 0.2 et 0.7 Rayon solaire R_{\odot} . La région du cœur ($r < 0,15R_{\odot}$) reste encore inexplorée.

Notons l'existence d'un autre satellite, COROT, lancé le 27 décembre 2006 et qui a pour but principal d'étudier les planètes extra solaires. Il analyse aussi les mouvements sismiques des étoiles pour étudier leur structure interne.

2- Approche expérimentale des modes propres de vibration d'une sphère

Le Soleil a une forme très proche d'une sphère. Et il entre en résonance soumis à une excitation acoustique. Notre laboratoire possède dix anciens résonateurs de Helmholtz en cuivre qui ont une forme presque sphérique. L'air contenu dans la sphère peut être excité par un haut-parleur et entrer en résonance dans certaines conditions. Ces résonateurs sont nos premiers modèles du Soleil. Ils sont bien évidemment très modestes, mais ils vont nous donner des renseignements sur les modes de résonance d'une sphère. Précisons bien que nous nous intéressons à la résonance du volume d'air contenu dans l'enveloppe métallique et pas à la résonance de l'enveloppe métallique elle-même. La matière solaire, contenue dans le vide, est un résonateur sphérique. L'air, contenu dans l'enveloppe métallique en est un autre. Etudions ces résonateurs.

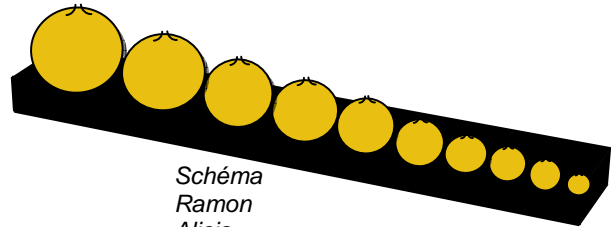


Schéma
Ramon
Alicia

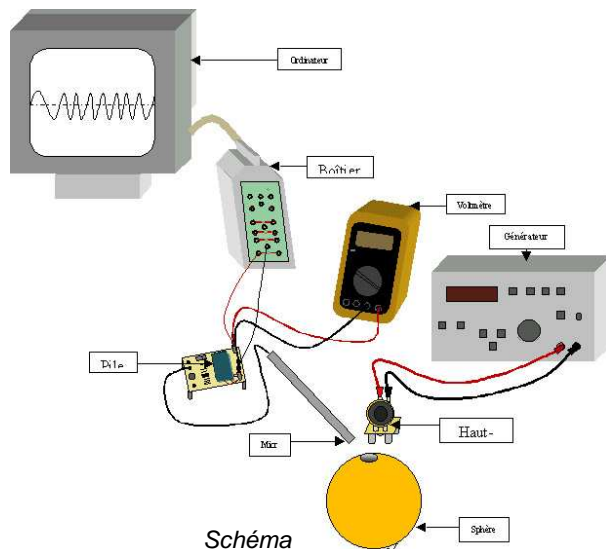


Schéma
Ramon
Alicia

durée d'acquisition de 25 ms. Nous branchons un voltmètre sur le micro, pour déterminer la tension efficace. Le micro est également connecté au boîtier d'acquisition du logiciel.

Le qualité de nos micros à électret est contestable, en particulier leur consommation électrique. Attention. En 2h la pile d'un micro est vide ! Il faut donc mettre le micro sur arrêt, en déconnectant la pile entre deux expériences. Malgré cela, ils permettent de repérer les fréquences de résonance correctement.

Etudions d'abord les différentes fréquences de résonance obtenues pour la plus grosses de nos sphères de Helmholtz . L'écart entre ces fréquences de résonance ne semble pas constant. Alors que pour les fréquences de résonance d'une colonne d'air, les fréquences des partiels sont des multiples d'une fréquence fondamentale, il n'y a pas ici de relation simple entre ces fréquences. Ces résultats ont été confirmés par ceux que nous avons obtenus pour les autres résonateurs.

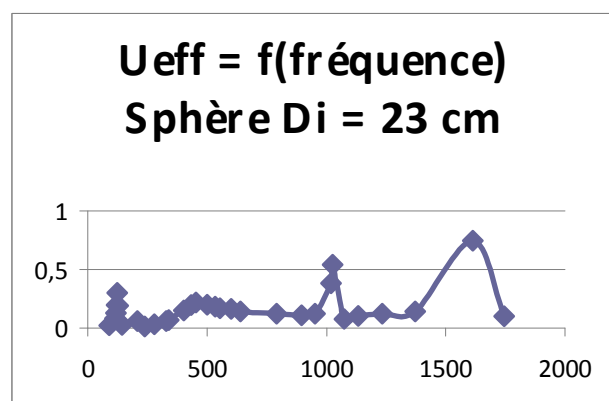
fréquences	Hz	delta f en Hz
1	123	

Ils sont bien évidemment très modestes, mais ils vont nous donner des renseignements sur les modes de résonance d'une sphère. Précisons bien que nous nous intéressons à la résonance du volume d'air contenu dans l'enveloppe métallique et pas à la résonance de l'enveloppe métallique elle-même. La matière solaire, contenue dans le vide, est un résonateur sphérique. L'air, contenu dans l'enveloppe métallique en est un autre. Etudions ces résonateurs.

2.1 Influence du diamètre de la sphère sur les fréquences de résonance.

Nous disposons de 10 résonateurs de Helmholtz, soit 10 systèmes à peu près sphériques numérotés de 1 à 10 du plus gros au plus petit. Nous mesurons leur diamètre intérieur en tenant compte de l'épaisseur du cuivre, soit 1 mm.

Nous relierons le GBF à un haut parleur. Nous obtenons un son. Nous ouvrons le logiciel Latis Pro. L'Entrée Analogique O est activée, en mode permanent, pour une



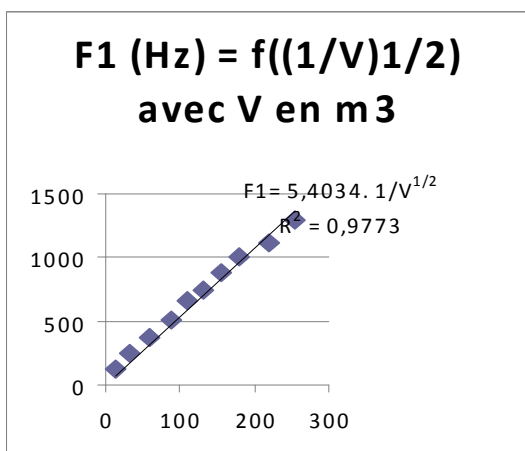
2	565	442
3	1015	450
4	1610	595
5	2188	578
6	2654	466
7	2846	192

La première résonance est très marquée et le pic est fin. La seconde est très large et la tension efficace du micro ne dépasse pas 0,22 V. Le 3^{ème} pic est moins large que le 4^{ème}. Nous ne pouvons pas comparer leurs amplitudes respectives car l'amplitude du signal fourni par le haut-parleur dépend de la fréquence. Chaque pic représente un mode propre avec sa fréquence et sa vitesse d'oscillation.

Le spectre permet de déterminer la vitesse d'oscillation de la surface solaire et la fréquence de ces oscillations pour chacun des modes.

Etudions maintenant la fréquence fondamentale pour les différentes sphères. Dans le montage précédent la première sphère est remplacée successivement par toutes les autres sphères. On ne reporte dans le tableau que les valeurs des fréquences fondamentales que nous avons mesurées pour chaque résonateur. On constate que plus la valeur du diamètre est faible, c'est à dire plus son volume intérieur est réduit, plus la valeur de la fréquence fondamentale correspondant à cette sphère est élevée.

Diamètre en cm	Volume intérieur en m ³	1/V en m ⁻³	(1/V) ^{1/2}	F1 en Hz
23	0,006370626	156,9704378	12,529	120
12,3	0,000974348	1026,327683	32,036	242
8,3	0,000299387	3340,15869	57,794	373
6,3	0,000130924	7638,001324	87,396	510
5,4	8,2448E-05	12128,86321	110,13	660
4,8	5,79058E-05	17269,41657	131,41	745
4,3	4,16298E-05	24021,27256	154,99	877
3,9	3,10594E-05	32196,41796	179,43	1002
3,4	2,05795E-05	48591,98344	220,44	1118
3,1	1,55985E-05	64108,60049	253,2	1300



On obtient une fonction linéaire : $F_1 = 5,4034.1/V^{0.5} = C.0.0159. 1/V^{0.5}$ avec C la célérité du son dans l'air de la sphère (340 m/s). Donc, la valeur de la fréquence fondamentale est inversement proportionnelle à la racine carrée du volume de la sphère.

Plus le volume du résonateur est important, plus la valeur de la fréquence fondamentale est faible.

Le Soleil est approximativement une sphère et le modèle solaire permet de décrire son comportement. Ce modèle est très complexe. La fréquence fondamentale du Soleil est proche

de 140 microHz soit $1,4 \cdot 10^{-4}$ Hz. Sa température est bien supérieure à celle des sphères de Helmholtz. Le Soleil n'est pas un système homogène, alors que l'air dans les sphères est homogène. Il est beaucoup plus dense au centre que sur sa périphérie. Il n'est pas contenu dans une « sphère de métal », mais dans le vide. Sa température varie d'un point à l'autre et il est animé de mouvement de matière dans la zone convective. L'intérêt de notre modèle est de montrer que les fréquences de résonance d'un système sphérique dépendent de sa taille. L'étude des fréquences de résonance solaire permet de déterminer la taille de diverses zones solaires, la pression, la densité, la vitesse de rotation.... L'atout principal de la méthode est de pouvoir accéder ainsi aux caractéristiques du cœur du Soleil grâce aux ondes acoustiques qui le traversent beaucoup plus rapidement que la lumière.

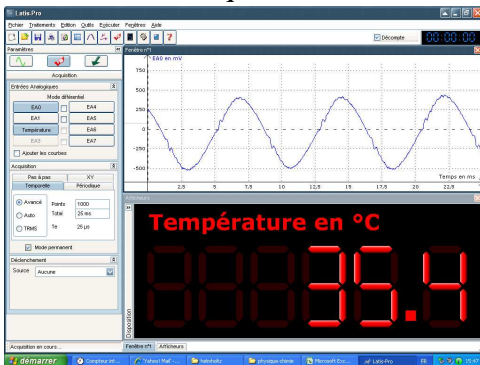
2.2 Influence de la température

Nous mesurons maintenant la première fréquence de résonance de la plus grosse sphère de Helmholtz pour diverses températures. Sur la copie d'écran ci-dessous, la mesure à 35,4°C donne $f_1 = 130$ Hz

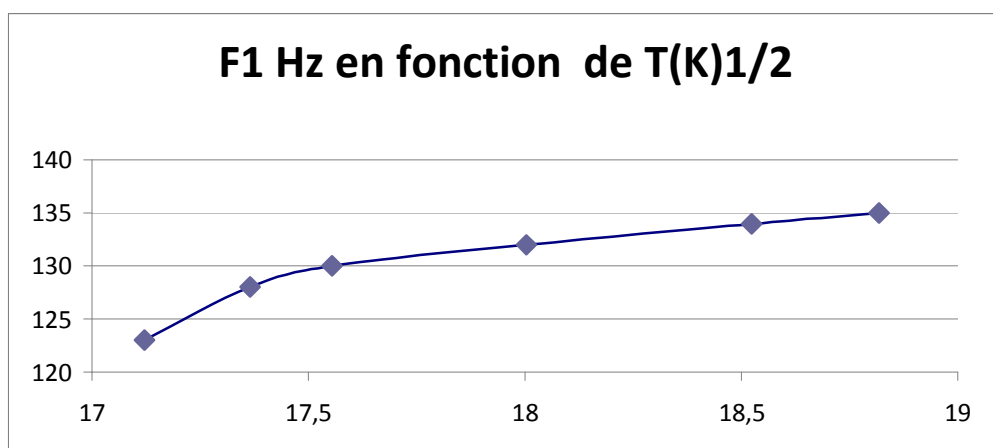
La fréquence de résonance la plus petite d'une sphère de Helmholtz est proportionnelle à la célérité du son dans l'air, qui dépend de la racine carrée de la température. (BUP 845, juin 2002 p 1061).

La vitesse du son peut être calculée à l'aide de l'équation d'état, du coefficient [adiabatique](#) γ (gamma), de la constante spécifique du gaz R_s et de la [température](#) T (K en [kelvin](#)).

$$c_{\text{gaz}} = \sqrt{\gamma \cdot R_s \cdot T}$$
 Avec pour l'air : $\gamma = 1,4$
et $R_s = 287$ J/kg/K



Température (°C)	Température (°K)	(Température (°K)) ^{1/2}	F ₁ Hz
20	293,13	17,12103969	123
28,4	301,53	17,3646192	128
35	308,13	17,5536321	130
51	324,13	18,00361075	132
70	343,13	18,52376852	134
81	354,13	18,81834212	135



Courbe d'étalonnage

La courbe d'étalonnage, modélisable par une droite dans sa seconde partie permet de déterminer la fréquence de résonance de l'air dans la sphère, connaissant sa température, donc sa vitesse. Cette vitesse dépend de plusieurs facteurs : elle dépend de la nature, de la pression et de la température du milieu.

Le son se propage aussi dans les autres milieux fluides, et même solides. Ainsi, dans les conditions normales de température et de pression, la célérité des ondes acoustiques dans l'eau est de 1482 m.s^{-1} , et de 5050 m.s^{-1} dans l'acier. A l'intérieur de notre cher soleil, sa vitesse est de l'ordre de $410\,000 \text{ m.s}^{-1}$, valeur qui varie à mesure que l'on pénètre vers le centre.

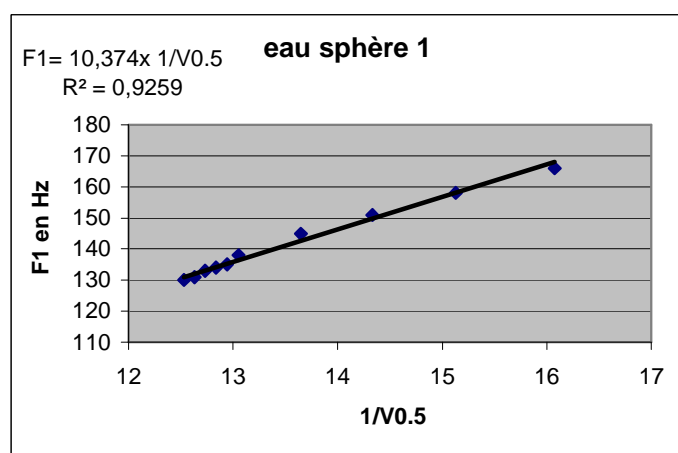
Pour le Soleil, Eric Fossat écrit que « la fréquence vibratoire dépend de la vitesse du son qui est elle-même proportionnelle à la température » (Hors-série Sciences et avenir, août 1996, p40). La relation fréquence – température a permis par exemple de confirmer les estimations théoriques sur la température du cœur solaire, qui était d'environ 15 millions de degrés.

Plus la température est élevée, plus la célérité du son et les fréquences des modes propres augmentent.

2.3 Réflexion sur les couches internes

La structure interne du Soleil n'est pas homogène, ce qui permet à certaines ondes de se réfléchir sur des couches internes. Pour essayer traduire dans nos expériences l'inhomogénéité du Soleil, nous avons rempli progressivement d'eau la plus grosse sphère de Helmholtz et déterminé sa fréquence de résonance la plus basse. Voici nos résultats

Veau en mL	Vair mL	F1 en Hz	$(1/V)^{1/2}$	F1 en Hz
0	6370,626303	120	12,529	130
100	6270	129	12,629	131
200	6170	133	12,731	133
300	6070	134	12,835	134
400	5970	135	12,942	135
500	5870	138	13,052	138
1000	5370	145	13,646	145
1500	4870	151	14,33	151
2000	4370	158	15,127	158
2500	3870	166	16,075	166



On obtient la modélisation suivante :

$F_1 = 10,374.1/V^{0.5}$, soit un résultat très différent de celui obtenu avec les 10 sphères uniquement remplies d'air. Donc modifier le volume en rajoutant de l'eau n'est pas équivalent à une diminution du volume global de la sphère ne contenant que de l'air. La courbe d'étalonnage permet donc de déterminer à partir de la mesure de la

fréquence de résonance la quantité d'eau contenue dans le résonateur. De même :

L'étude des fréquences de résonance solaire permet de connaître sa structure.

3- Mesures par effet Doppler :

3.1 Mode opératoire :

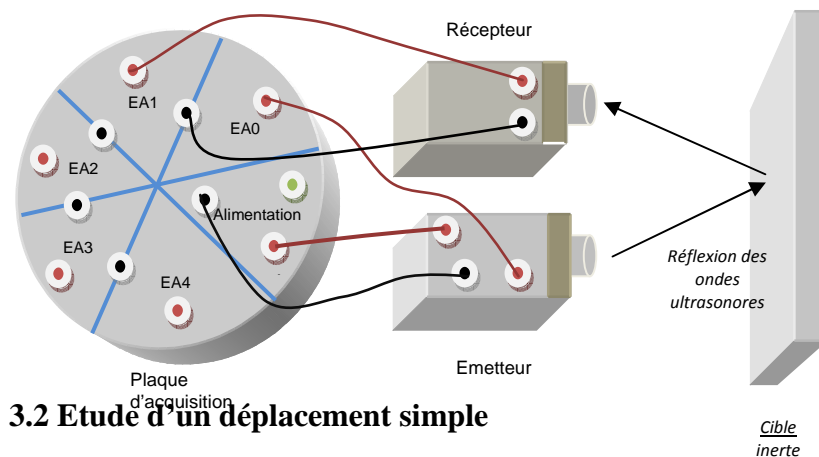
Les mesures grâce à l'effet doppler se font par l'analyse du spectre de la lumière. Mais il nous est impossible de travailler avec la lumière, car sa célérité est trop importante, de l'ordre de 300 000 km/s. La vitesse de déplacement d'un objet dans le laboratoire de notre lycée peut être de l'ordre de 1 m/s. Le rapport v/c vaut donc $1/300000000 = 3,33 \cdot 10^{-9}$. Le décalage Doppler serait donc de l'ordre du milliardième de la valeur de la fréquence de la lumière, ce qui est impossible à déceler avec un spectromètre de lycée.

Nous effectuons donc nos mesures avec des ultrasons car dans ce cas :

$v/c = 1/340 = 2,9 \cdot 10^{-3}$. La fréquence des ultrasons est : $F = 40\ 000$ Hz et un décalage de l'ordre du millième de F , soit de quelques dizaines de hertz est décelable avec un récepteur relié au logiciel d'acquisition Latispro.

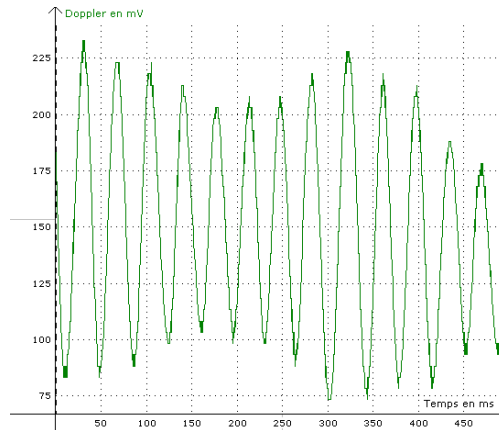
La cible mouvante sera un écran en métal (destiné aux montages d'optique) posé contre une brique de bois et déplacé à vitesse constante grâce à un moteur ou une plaque reliée à un haut parleur pour les oscillations. L'ensemble sera filmé pour pouvoir déterminer la vitesse grâce à l'effet Doppler et vérifier nos résultats en analysant le fichier vidéo.

Mode opératoire de l'expérience doppler

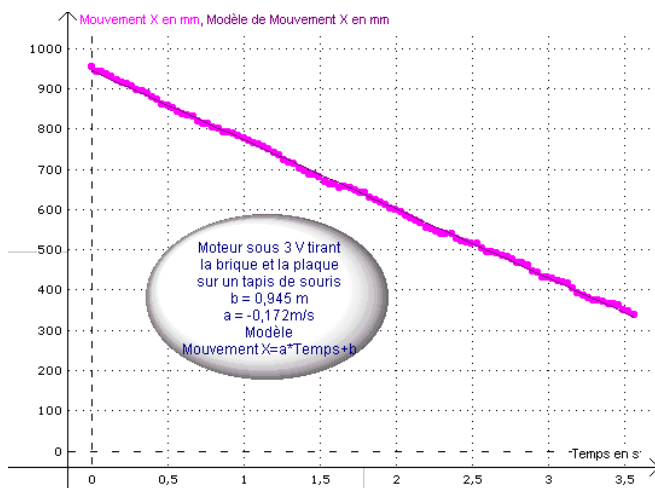


3.2 Etude d'un déplacement simple

Une fois que le système est opérationnel, on remplace la cible déplacée à la main, par une cible tirée par un moteur. Nous filmons le système en mouvement, et l'étude du fichier vidéo permet de déterminer la vitesse de la plaque. Ce résultat est comparé à celui obtenu par mesure de la fréquence de décalage Doppler.



Afin de vérifier le résultat de notre mesure Doppler, on utilise un moteur qui va tracter la plaque de métal sur un chariot. Le mouvement sera ainsi reproductible. On filme le mouvement, et en analysant le fichier vidéo, on détermine la vitesse de déplacement du mobile. Pour cela, on trace l'évolution de la position en fonction du temps. C'est une droite



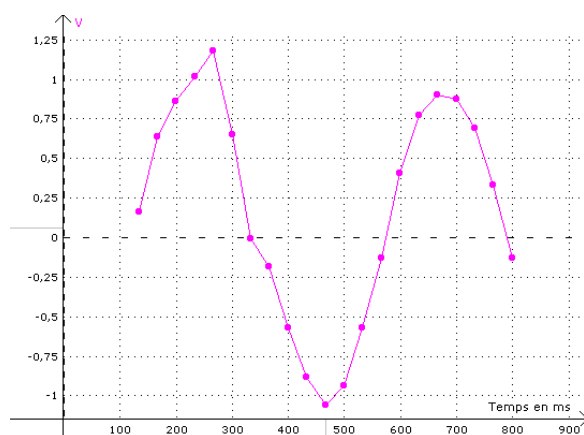
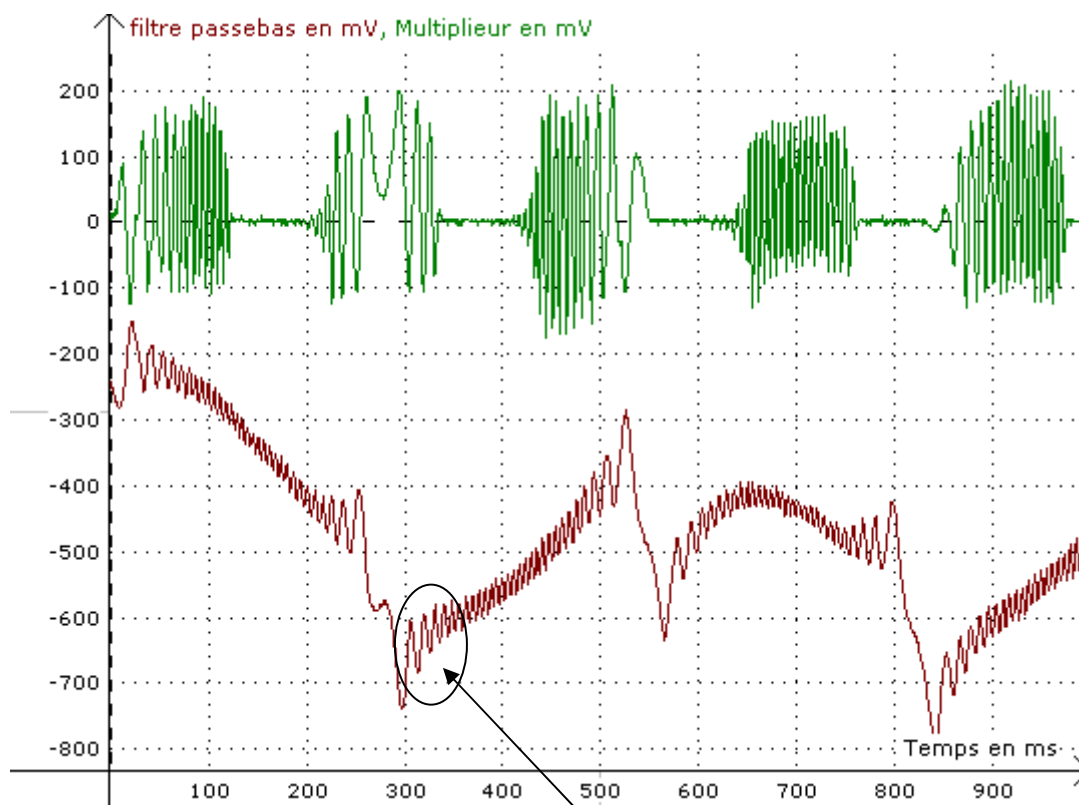
dont la pente a pour valeur la vitesse. On vérifie si cette vitesse est conforme à celle calculée avec les mesures Doppler.

Vitesse mesurée par étude de fichier vidéo : 0,10 m/s

On suppose donc que la vitesse calculée avec les mesures Doppler sera proche de 0,10 m/s. Avec Latis pro, on mesure la fréquence Doppler Δf (26,54 Hz) et on déduit ensuite la vitesse à partir de l'équation : $V_0/c = \Delta f/2 f$. On trouve une vitesse de $V_0 = 0,11$ m/s, soit un écart de 8,3 %.

3.3 Les oscillations

Pour étudier des oscillations, nous avons d'abord choisi un haut-parleur, utilisé au lycée pour faire vibrer les cordes en cours de spécialité. Nous y avons adapté une plaque réfléchissante en aluminium, mais le résultat a été décevant. On observe en sortie du filtre un signal ayant exactement la même fréquence que celui fourni par le générateur de signaux. Et aucune oscillation due à l'effet Doppler, même pour l'amplitude maximale du signal. Alors nous avons modifié notre montage et fait osciller la plaque à la main en la filmant. Les oscillations sont ainsi de plus grande amplitude et sont décelées par le montage. La tension du filtre passe-bas semble être la superposition d'une tension de fréquence égale à la fréquence des oscillations et d'une fréquence doppler variable. Voici les signaux obtenus :



On voit 5 mouvements (aller ou retour de la plaque) sur l'enregistrement. A chaque fois, la fréquence doppler augmente, se stabilise et diminue. Donc à chaque partie du mouvement la vitesse augmente, se stabilise et diminue. Pour la partie entourée on trouve :
 $T = 5,9 \text{ ms}$ soit $\Delta f = 169,5 \text{ Hz}$ donc $v = 169,5 * 340 / (2 * 40000) = 0,72 \text{ m/s} = 72 \text{ cm/s}$. Ce qui est cohérent avec l'analyse du fichier vidéo.

4. Le Soleil : un instrument de musique

Plusieurs milliers de fréquences différentes sont relevées lorsqu'on étudie un son du Soleil. Cela peut être comparé à un accord de nombreuses notes sur le clavier d'un piano. Le Soleil, grâce aux mouvements de convection, joue de la musique comme si le vent soufflait sur les tuyaux d'un orgue par rafale, c'est à dire de manière aléatoire.

4.1 Comparaison avec le spectre d'un instrument de musique

Les acousticiens du Soleil comparent notre étoile à divers instruments de musique dans les articles que nous avons lu. Notre partenaire Eric Fossat, dans un article qu'il a écrit pour la revue *Sciences Avenir* en 1996, compare notre étoile à des tuyaux d'orgue, un piano ou encore à un tambour stellaire. Pour d'autres scientifiques, le soleil est comparable à une énorme cloche, et en analysant ses vibrations, nous pouvons étudier sa structure interne (comme lorsqu'une cloche sonne faux, nous savons que sa masse métallique a un défaut). Les

« acousticiens » du soleil sont donc à la fois opticien (observation de la structure du soleil) et sismologue (étudier les vibrations comme cela est fait pour les tremblements de Terre).

Comparons donc nous aussi le soleil et un instrument de musique. Lorsqu'on souffle dans une flûte, la note dure quelques secondes. Pour le Soleil le temps n'est pas à prendre en compte, car l'émission sonore ne s'arrête jamais. C'est comme si on soufflait constamment dans la flûte. Les vibrations solaires ont des fréquences de l'ordre du millième de Hertz. Elles correspondent donc à des sons très graves. C'est pourquoi nous ne pouvons pas entendre à l'oreille les sons produits par l'étoile. De plus le son ne se déplace pas dans le vide entre la Terre et le Soleil.

La gamme solaire de vibration couvre seulement un octave et demi et comporte des millions de fréquences. Sa période d'oscillation principale est proche de 5mn soit trois millièmes de Hertz. Ses fréquences sont donc à peu près 100 000 fois plus graves que celles des sons terrestres audibles. Dans certaines zones, la vitesse de propagation des ondes dans le Soleil est proche de 410 km/s.

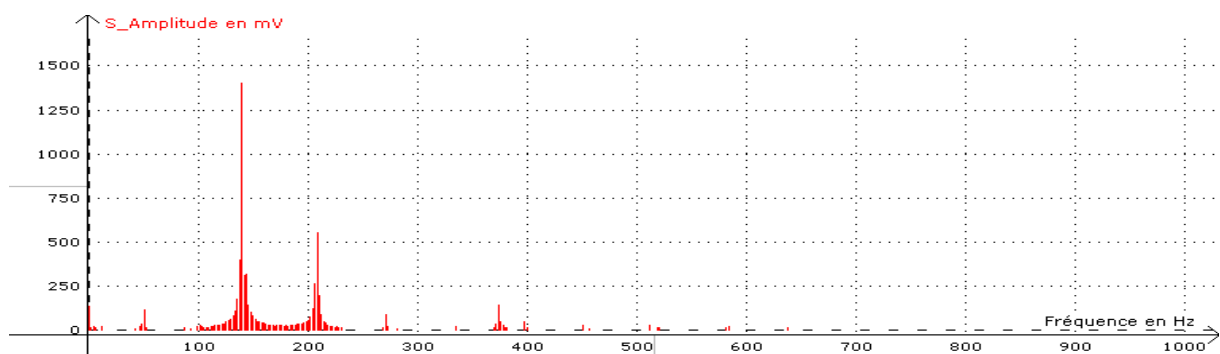
En pratique, un instrument émettant une note, émet la fréquence de cette note et ses "harmoniques" (mais à des fréquences pas exactement double, triple, etc..) et avec une distribution de leurs intensités qui lui est spécifique: c'est ce qui caractérise le "timbre" d'un instrument.

Nous avons fait la décomposition en série de Fourier du son de divers instruments : une grosse caisse, un tambour, une timbale, une cloche, un piano, un orchestre... Nous avons comparé ces spectres de fréquences avec ceux du Soleil. Le Soleil est 10 milliard de fois plus gros qu'un instrument de musique. Un piano a 87 notes sur 7 octaves. Le Soleil joue des millions sur une octave et demie. C'est donc un instrument microtonal. L'intervalle entre deux notes est très inférieur au demi-ton.



Considérons la distribution des modes p , et tout d'abord pour $l=0$ du soleil. On note une distribution régulière, avec des séparations de l'ordre de 140 μHz . Pour rendre compte des modes $l=1, 2, 3$, etc., cela donne d'autres distributions complémentaires, avec toujours une séparation proche de 140 μHz , mais des fréquences décalées d'un mode l à l'autre. (voir tableau paragraphe 4.3)

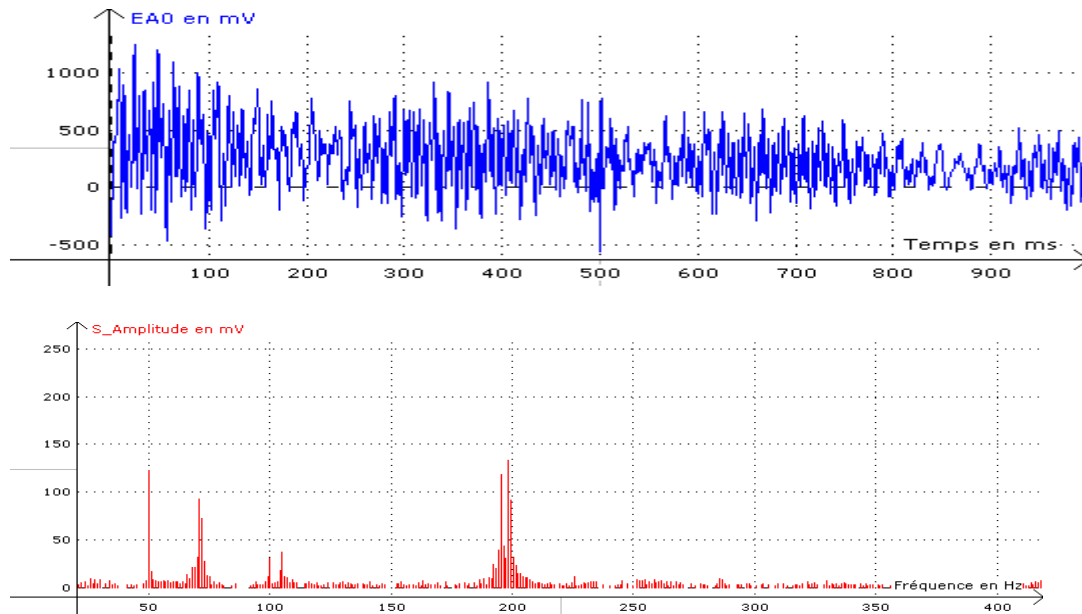
4.1.1 Spectre d'une timbale



C'est un son musical de hauteur bien déterminée avec deux fréquences principales à 139 Hz et 208 Hz, qui correspondent à des modes propres de vibration de la surface de la timbale. La surface du Soleil vibre excité par la convection des granules. La peau de la

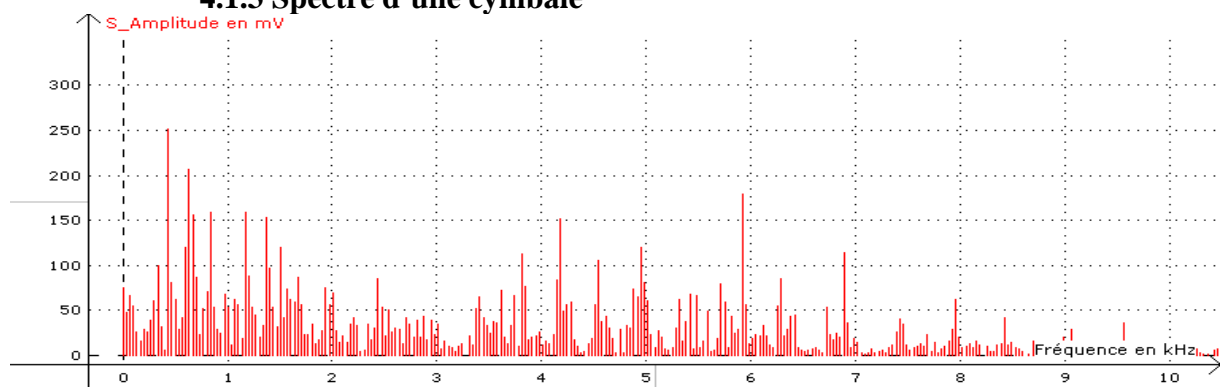
timbale vibre excité par un choc avec une baguette. Ce sont les oscillations de la surface du Soleil qui sont étudiées par les appareils de mesure. Les oscillations de la surface de la timbale engendre un son riche d'un fondamental et d'un harmonique principal. Pour le Soleil, il y en a des milliers.

4.1.2 Spectre d'une cloche



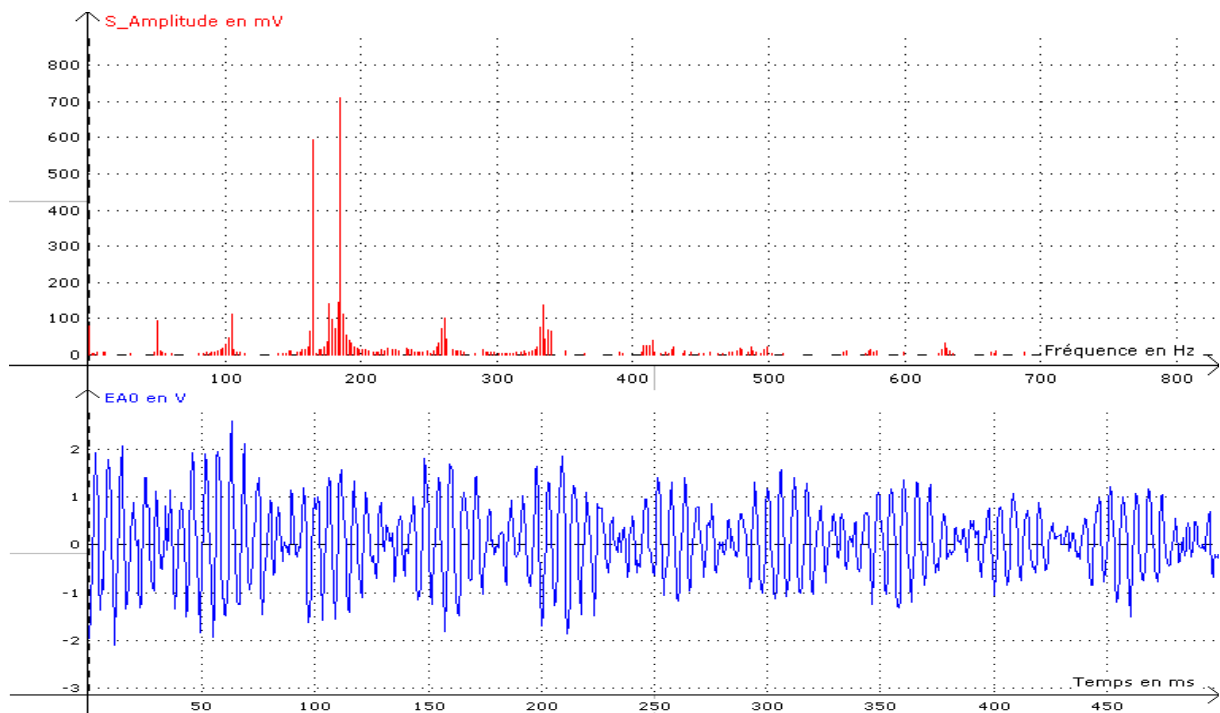
Ce son est aussi musical avec les fréquences principales suivantes : 50 Hz, 75 Hz, 100 Hz, 198 Hz. L'enveloppe de la cloche n'est pas une simple surface plane comme pour la peau de la timbale. Elle englobe plus largement l'air résonant à l'intérieur. On remarque un dédoublement de certains pics, comme dans le spectre solaire. Des battements sont visibles sur l'enregistrement de la tension du micro, avec une pseudopériode de l'ordre de 300 ms. Le signal s'amorti rapidement. Le dédoublement des pics est due à ces battements de deux fréquences proches. Pour le Soleil, le dédoublement est du à sa rotation.

4.1.3 Spectre d'une cymbale



Le signal n'est pas musical. Ce n'est qu'un bruit, pour lequel la décomposition de Fourier fait apparaître de très nombreuses fréquences, comme dans le spectre du Soleil. Donc, lorsque le spectre solaire, riche de millions de fréquences sur une octave et demi, s'apparente davantage à celui d'un bruit que d'un son musical. Est-il alors cohérent que les astronomes parlent de musique solaire et pas de bruit ? La superposition de tous les modes solaires décalés les uns par rapport aux autres nous semble plus proche d'un bruit que d'un signal musical.

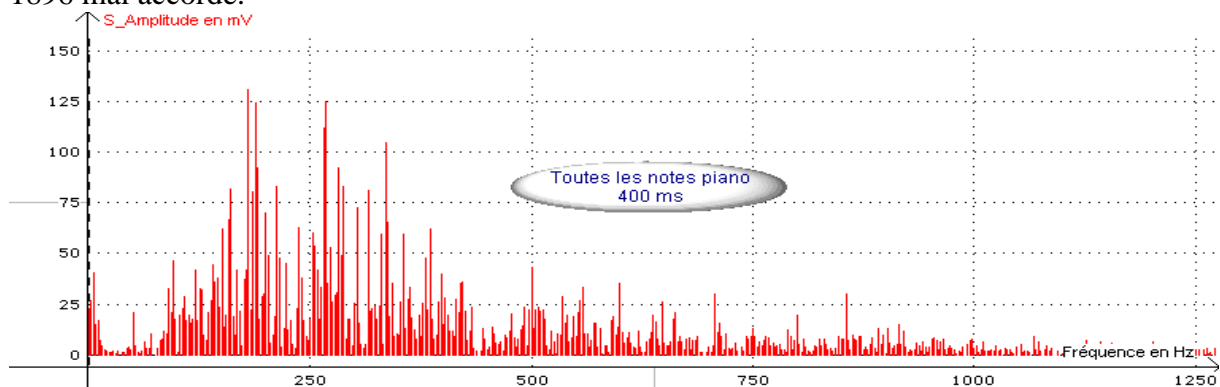
4.1.4 Spectre d'une grosse caisse



Comme pour la cloche, l'enregistrement de cette grosse caisse fait apparaître des battements, c'est à dire une évolution périodique lente de l'amplitude du signal. L'analyse de Fourier fait apparaître deux pics dominants qui rappellent les doublets des spectres du Soleil.

4.1.5 Spectre d'un piano

Nous avons réalisé une expérience à l'aide du logiciel latis pro, d'un piano et d'un micro. Nous avons joué toutes les touches du piano en même temps et avons enregistré grâce au micro et au logiciel le signal du micro. Puis grâce à l'analyse de Fourier, nous avons obtenus un spectre avec de nombreux pics. Voici le spectre d'un vieux piano Bord (Paris) de 1896 mal accordé.



Nous avons une large ressemblance avec le soleil. La taille du Soleil étant largement supérieure à celle d'un piano, les fréquences seront beaucoup plus basses. Toutefois, nous observons une similitude dans l'allure générale de la répartition des pics.

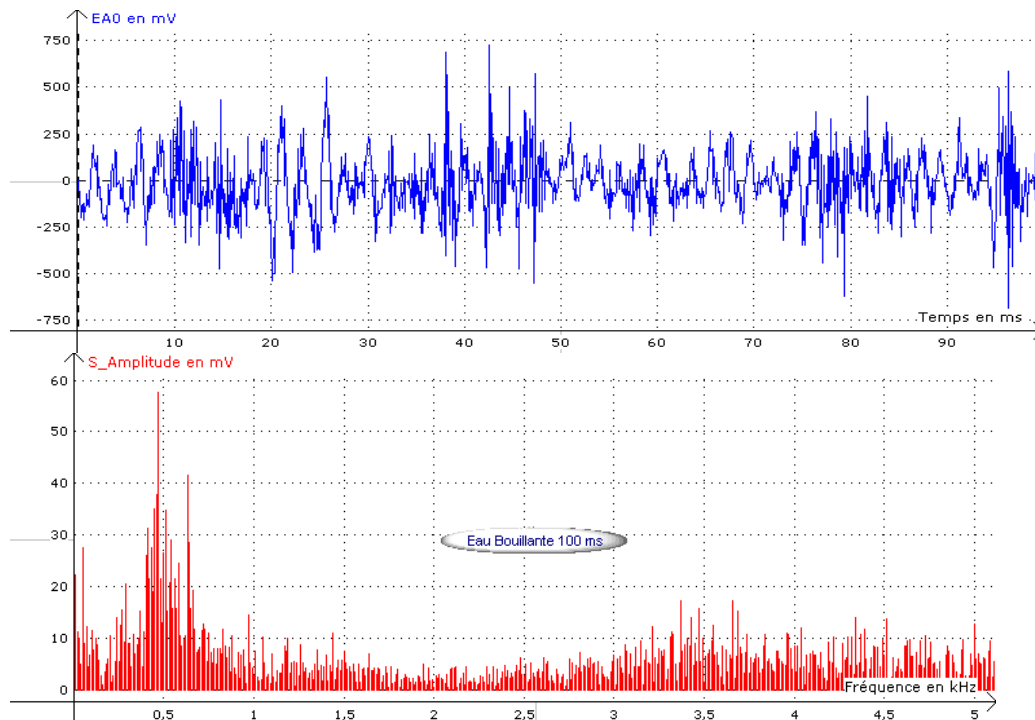
L'écart entre deux fréquences consécutives est beaucoup plus faible pour le Soleil que pour le piano. Sur le piano, les cordes sont accordées de façon à obtenir les fréquences des notes précises de la gamme tempérée. Pour passer d'une note à la suivante il faut multiplier la

fréquence du son par $\sqrt[12]{2}$. Il faut donc une corde différente (en fait souvent 2 ou 3) pour chaque note. Pour le Soleil, il n'y a qu'un seul résonateur principal, une seule sphère résonante, c'est à dire l'ensemble de l'astre. Mais comme nous l'avons déjà dit, les granules sont les excitateurs de la musique solaire. Entre les granules montants, ce sont surtout les flux de plasma redescendant à grande vitesse entre les granules (désignés intergranules) qui font un bruit, un peu comme des sifflets, qui génèrent les ondes sonores solaires...

Nous pouvons donc établir la comparaison suivante :

Granules ↔ Excitateurs correspondant à des impacts sur les cordes
 Sphère solaire ↔ Cordes et caisse de résonance du piano

4.1.6 L'eau qui boue



Encore un bruit, comme pour les cymbales, mais ici le son est provoqué par la convection comme dans le cas du Soleil. L'enregistrement sur 100 ms montre un grand nombre de pics et une fréquence dominante vers 480 Hz. Il nous fallait étudier un son produit par un mouvement de convection, car le son des granules solaires est produit par leur convection.

4.2 Une reconstitution de la musique solaire

La musique du Soleil reconstituée par les scientifiques (notamment à Stanford) n'est pas belle à écouter. Elle est analogue à la musique de tuyaux d'orgues sans clavier excités au gré du vent. Il manque un compositeur.

Nous avons cherché un nouveau moyen pour créer une musique à partir des fréquences émises par le Soleil, en utilisant les résultats de la sonde Soho. Il faut d'abord transposer les notes solaires au niveau de fréquences audibles, puis trouver un moyen de les produire.

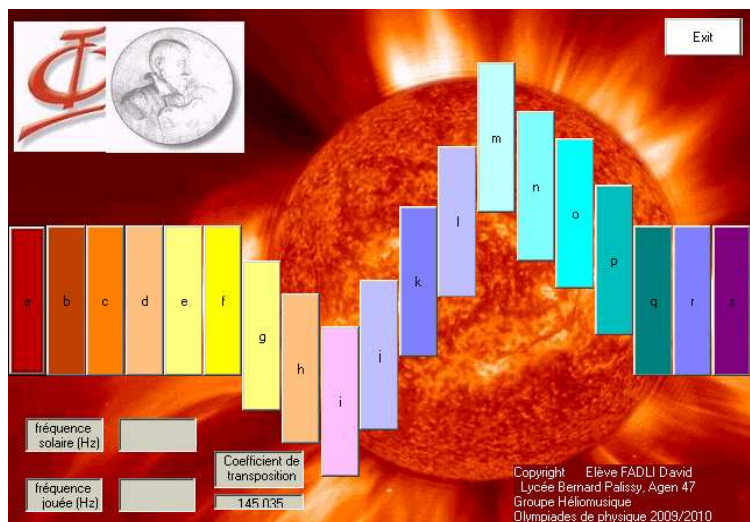
Nous avons utilisé pour cela un programme en Visual Basic, où un clavier produit certaines notes solaires, transposées en sons audibles en multipliant leur fréquence par 145035. (Voir en annexe, le tableau de certaines fréquences solaires et de leur transposition)

Ce coefficient permet de transformer en la3 à 440 Hz, la fréquence 3303,12 microHz qui est la fréquence dominante du spectre du Soleil. Le la3 joue le même rôle dans notre musique. C'est la note de référence, ni trop grave, ni trop aiguë, la note autour de laquelle les mélodies sont bâties. L'écart moyen entre deux notes successives est proche de 19,8 Hz. C'est donc une valeur plausible de la fréquence fondamentale. Cela correspond à un écart de 136,8 microHz pour les véritables fréquences solaires, et cela quelque soit la série.

Alors que les transpositions habituelle de la musique solaire se font sans musicien, utilisons les notes solaires transposées pour jouer une musique originale, où le passage d'une note à la suivante se fait en rajoutant 19,8 Hz à la fréquence du son. Pour les notes de la gamme tempérée, ce passage correspond à la multiplication par un coefficient : $2^{1/12}$.

Cette gamme donne une ambiance musicale particulière. Le musicien n'est pas le Soleil. Il n'est ici que l'instrument.

Ci-dessous des copies d'écran de deux versions de notre programme. David Fadli s'est particulièrement investi dans la mise au point de ces logiciels.



Conclusion

L'héliosismologie a permis des avancées déterminantes dans la connaissance de l'étoile la plus proche de la Terre. On tente maintenant de l'appliquer à des étoiles plus lointaines, ce qui fait de cette approche une technique d'avenir prometteuse.

Ce projet nous a demandé beaucoup de temps et de travail pendant la fin de notre année de Première S et le début de notre année de Terminale. Nos modèles sont bien sûr très modestes, mais ils nous ont permis d'aborder l'acoustique solaire :

- Le Soleil résonne comme un instrument de musique
- L'utilisation de l'effet Doppler permet de déterminer les fréquences de résonance de notre étoile.
- L'analyse de Fourier met en évidence les points communs entre Soleil et instrument de musique (battements, harmoniques, timbre)
- Le Soleil est à la fois compositeur, interprète et instrument de musique. Sa musique peut-être reconstituée et transposée. Elle a une couleur unique en raison de l'écart constant de 19,8 Hz entre les notes, alors que dans la gamme tempérée, l'écart entre deux notes successives augmente quand les sons deviennent plus aigus.
- La musique solaire est plus comparable à un bruit qu'à une musique instrumentale, du fait de la coexistence de multiples fréquences propres très resserrées, avec une distribution restreinte sur moins de deux octaves.

Un grand merci à M. Robillot, qui a accepté de corriger une première version de ce mémoire.

Nous avons beaucoup apprécié ce travail. Nous espérons que vous aussi.

Sources documentaires:

- www.esa.fr
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil>
- <http://system.solaire.free.fr/Soleil.htm>
- Articles spécialisés qui nous ont été communiqués par M Robillot et M Fossat en particulier : Hors-série Sciences et avenir, août 1996, p36-41.
- Livres de Spécialité physique de Terminale S.

Annexes :

Annexe 1 : Evolution des connaissances sur le Soleil

1.1 Nicolas Copernic : du géocentrisme à l'héliocentrisme :

Le Soleil est né il y a 4,6 milliards d'années. Il permit les premières apparitions de vie sur Terre tout juste un milliard d'années plus tard. Et il y a 200000 ans, l'humanité fait son apparition.

L'homme a toujours voulu en savoir plus sur son étoile. Dès l'Antiquité, astronomes et mathématiciens ont cherché à percer les mystères du Soleil. En 127 de notre ère, le géographe et astronome Claude Ptolémée fait ses premières observations à Alexandrie. En s'appuyant sur les mathématiques et sur les travaux de ses prédécesseurs, il expose un système géocentrique du monde qui considère la Terre comme étant fixe et au centre de l'univers. Il explique, toujours par les mathématiques, les mouvements des planètes, de la Lune, du Soleil et des étoiles. Cette théorie fut adoptée par tous à l'époque et enseignée au-delà du XVI^e siècle.

Il faudra attendre Copernic pour révolutionner cette conception de l'univers. Il avance, suite à un travail de plus de trente ans, que la Terre tourne sur elle-même, que la Lune est un satellite de la Terre et que les planètes tournent autour du Soleil. C'est les débuts de l'héliocentrisme.



Il faut savoir que ces théories sont en totale opposition avec la vision de l'univers de son époque. Elles furent rejetées par l'Eglise pour qui un système géocentrique était justifié par les écritures saintes. Notre résumé en polonais est un petit hommage à ce grand scientifique polonais qui donna une place centrale au Soleil.

Il faudra attendre le XVII^e siècle et les idées d'Isaac Newton sur la mécanique céleste pour que la conception de Copernic soit vraiment reconnue en Europe. Ptolémée et Copernic ont surtout fait des descriptions mathématiques, tandis que Newton a fait de la physique : il a cherché les causes du mouvement des astres pour mieux le décrire.

Comme tous les hommes qui nous ont précédé, nous regardons vers le Soleil et nous cherchons à en savoir plus.

1.2 Le Soleil aujourd'hui

Le Soleil est une étoile qui se compose de 74 % d'hydrogène, de 24 % d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds. Le Soleil est plus chaud (5 770 kelvins en surface environ) et plus brillant que la moyenne des autres étoiles, avec une couleur jaune tirant sur le blanc. Il tire son énergie de réactions de fusion nucléaire qui transforment, dans son noyau, l'hydrogène en hélium.

Il existe dans notre galaxie plus de 100 millions d'étoiles de type spectral identique, ce qui fait du Soleil une étoile assez banale. Le Soleil gravite autour du centre de notre galaxie, la Voie lactée, dont il est distant d'environ 25 000 années-lumière. Sa période de révolution galactique est d'environ 220 millions d'années, et sa vitesse de $217 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui correspond à une année-lumière tous les 1400 ans (environ), ou une unité astronomique tous les 8 jours.

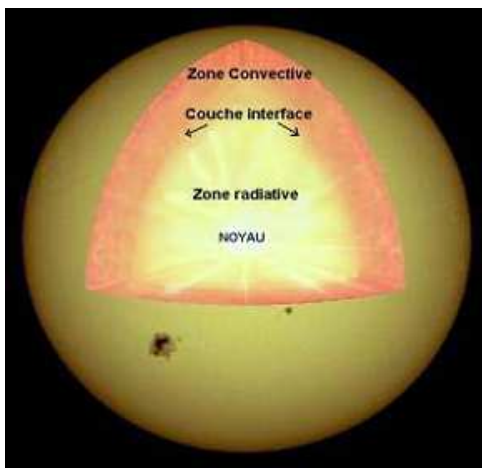
Le Soleil tourne également sur lui-même, avec une période de 27 jours terrestres environ. En réalité, n'étant pas un objet solide, il subit une rotation différentielle : il tourne plus rapidement à l'équateur (25 jours) qu'aux pôles (35 jours). C'est l'étude des tâches solaires qui a permis cette découverte. Le Soleil est aussi en rotation autour du barycentre du système solaire, ce dernier se situant à un peu plus d'un rayon solaire du centre de l'étoile, en raison de la masse importante de Jupiter qui atteint un millième de la masse solaire.

Bien que le Soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul plus de 99 % de la masse du système solaire. Sa forme est presque parfaitement sphérique, avec un petit aplatissement aux pôles.

Contrairement aux planètes telluriques, le Soleil n'a pas de limite extérieure bien définie : la densité de ses gaz chute de manière à peu près exponentielle à mesure qu'on s'éloigne de son centre. Par contre sa structure interne est bien définie. Le rayon du Soleil est mesuré de son centre jusqu'à la photosphère, c'est à dire la couche en-dessous de laquelle les gaz sont assez condensés pour être opaques. La structure interne du Soleil n'est pas observable directement, aucun instrument visuel ne peut percer sa composition interne. Mais de la même façon que la sismologie a permis, par l'étude des ondes produites par les tremblements de terre, de déterminer la structure interne de la Terre, l'héliosismologie utilise les pulsations solaires pour mesurer et visualiser indirectement la structure interne du Soleil. La simulation informatique est également utilisée comme outil théorique pour sonder les couches les plus profondes.

A l'intérieur du Soleil, se trouve un noyau qui occupe 25 % du Soleil, à une température de 14 millions de degrés. Puis, plus haut se trouve une zone radiative d'une épaisseur de 315 000 km, très dense qui représente 98 % de la masse du Soleil. Un photon mettra jusqu'à un million d'années à traverser. La température est de $500\,000^\circ\text{C}$ à $10\,000\,000^\circ\text{C}$.

A 490 000 km du centre du Soleil il y a une zone de convection de 210 000 km qui évacue la chaleur vers l'extérieur par des mouvements tourbillonnaires, que l'on peut comparer à ceux de l'eau bouillant dans une casserole. Ces mouvements



de convection créent, en surface une " supergranulation " qui divise la photosphère en cellules d'environ 30 000 km de diamètre.

La surface visible du Soleil qui a environ 500 km d'épaisseur et une température de 6 000 °C, est la photosphère. Des nuages de gaz chauds provenant du noyau s'élèvent à la surface pour y constituer une structure granuleuse dont chaque grain mesure entre 1 000 et 2 000 km de diamètre.

Au-dessus de la photosphère, se trouve la chromosphère pouvant atteindre 10 000 km de hauteur.

L'énergie solaire se crée profondément dans le noyau du Soleil. C'est là où la température (15.000.000°C) et la pression (340 milliards de fois la pression terrestre au niveau de la mer) est si intense que des réactions nucléaires ont lieu. Comme nous l'avons vu en cours, il faut beaucoup d'énergie pour vaincre la répulsion coulombienne et pour permettre à des noyaux positifs de se rapprocher suffisamment pour fusionner.

Nous pouvons donc retenir que le Soleil n'est pas un système homogène, comme ceux que nous avons l'habitude d'étudier au lycée. Sa température n'est pas uniforme, sa densité non plus. Certaines zones sont en mouvement de convection, comme l'eau qui boue et d'autres non. Rien ne semble simple. Pourtant l'étude des ondes acoustiques dans le Soleil permet d'accéder à certains renseignements que les élèves de lycée que nous sommes peuvent comprendre.

Annexe2 : Vers une interprétation ondulatoire

Le programme de Terminale aborde les ondes stationnaires en une dimension. Utilisons notre programme pour tenter de mieux comprendre les ondes en trois dimensions dans le Soleil.

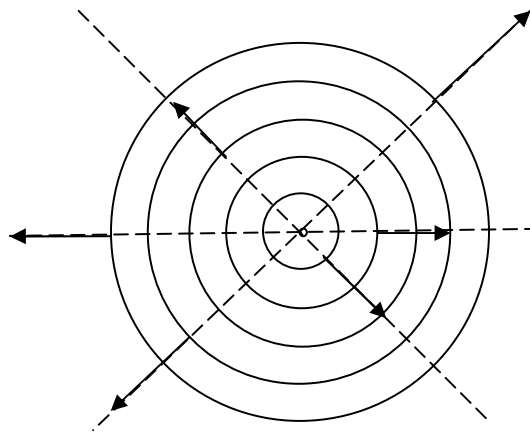
Comme nous l'avons vu en cours, une onde acoustique sonore est créée par une suite de surpression-dépression. L'exemple du tuyau sonore permet de faire l'interprétation ondulatoire en une dimension. Dans un tuyau, l'air ne vibre pas partout avec la même intensité. Si le tuyau est ouvert aux deux extrémités, on a à l'intérieur du tuyau une succession de zones de fortes vibrations : les ventres, et de zones de faible vibrations : les nœuds. On trouve toujours un ventre à chaque extrémité du tuyau. Si le tube est fermé à une extrémité, on y trouve toujours un nœud à l'extrémité fermée. Une demi-longueur d'onde sépare deux ventres consécutifs et un quart de longueur d'onde sépare un nœud du ventre le plus proche.

Quant à l'onde sonore en elle-même, elle se propage dans le tube de façon plane et s'échappe du tube à la sortie en se propageant dans toutes les directions de l'espace. Cependant, une partie ne sort pas et est réfléchi : elle repart dans le tube vers la source d'émission. On a alors une succession de réflexions : l'onde fait des allers- retours dans le tube. La superposition des ondes dans le tube peut créer des ondes stationnaires dans le tube.

Une onde est définie comme étant une perturbation qui se propage dans un milieu. Elle transporte de l'énergie sans créer de transport de matière. En effet, une onde crée un mouvement local et éphémère des particules constituant le milieu, mais pas de mouvement de convection général de celles-ci. La propagation repose sur la transmission de l'énergie cinétique de certaines particules à d'autres. Il faut donc distinguer pour le Soleil le mouvement de convection qui transporte de la matière, et le déplacement des ondes sonores qui n'en transporte pas.

Les ondes acoustiques sont dites longitudinales, c'est à dire que la direction de la perturbation est la même que celle du déplacement de l'onde. Les ondes acoustiques, contrairement aux ondes électromagnétiques qui ont la faculté de se propager dans le vide, nécessitent un support matériel pour se propager. Elles utilisent l'élasticité du milieu, celle de

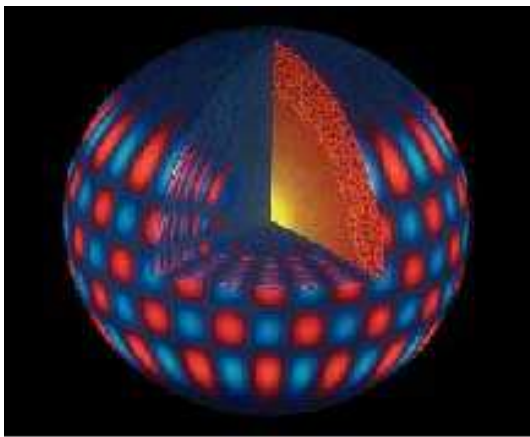
l'air ou celle de la matière du Soleil. C'est pour cela qu'elles ne peuvent parvenir jusqu'à nous à travers le vide de l'espace.



Dans un milieu à deux dimensions, l'onde se propage sous la forme de cercles concentriques dont le rayon croît en fonction du temps. Prenons seulement l'exemple d'une marre où l'on jette un caillou : les vaguelettes créées à la surface s'éloignent de la surface en formant de plus en plus de cercles, qui sont de plus en plus gros.

Dans un milieu en trois dimensions, il faut imaginer une infinité de sphères concentriques de rayon croissant.

Le milieu sphérique du Soleil, est borné par le vide de l'espace, c'est-à-dire que sa surface limite la propagation des ondes et les réfléchissent sous la forme d'ondes stationnaires. Comme pour les colonnes d'air étudiées en Terminale, la propagation des ondes acoustiques dans le Soleil entraîne la formation de ventres et de nœuds, mais dans ce cas, ils sont répartis aussi bien sur toute la surface qu'en profondeur. Cela apparaît très clairement dans la modélisation ci-contre que nous a fournie notre partenaire Eric Fossat. (Hors-série Sciences et avenir, août 1996, p37) Les zones rouges et bleues claires correspondent aux ventres de vibration, c'est à dire aux zones où l'amplitude



des vibrations est grande.

Les différents modes sont repérés grâce à 3 lettres:

l : le nombre total de nœuds en surface,

n : est le nombre de nœuds dans la direction radiale, c'est-à-dire depuis la "surface" jusqu'au "cœur" du soleil.

m : est le nombre de nœuds ou lignes nodales coupant l'équateur.

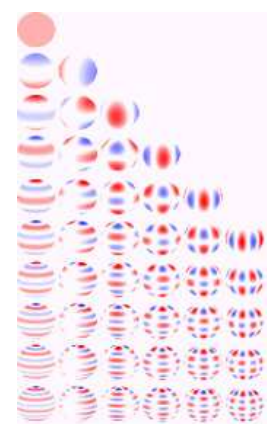
En symétrie sphérique, les fréquences de résonances ne dépendent que de l et n , mais tout écart à cette symétrie, la **rotation** notamment, lève la dégénérescence en m . La **rotation** entraîne des dédoublements des fréquences (l, n).

Sur l'image ci contre, $l = 0$ pour la première sphère et $0 < l < 9$ pour les autres lignes. l augmente du haut vers le bas et m augmente de la gauche vers la droite.

Les ondes créées par le mouvement pénètrent plus ou moins profondément dans le Soleil. Les modes de haute fréquence pénètre peu et les modes de basse fréquence pénètre beaucoup. Ce sont eux qui donneront davantage de renseignements sur les couches profondes du Soleil.

Il y a plus de 10 millions de modes d'oscillations du Soleil.

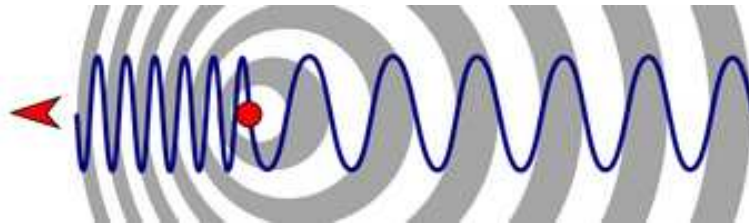
Explorons l'intérieur des sphères de Helmholtz avec le micro lors d'une résonance. Nous retrouvons des nœuds et des ventres de pression avec le micro. Un nœud de pression correspond à un ventre de vibration et un ventre de pression correspond à un nœud de vibration.



Annexe 3 : L'effet Doppler pour l'étude du Soleil

La connaissance des ondes acoustiques dans le Soleil est possible grâce à l'exploitation de mesures utilisant l'effet Doppler. L'appareil GOLF, sur lequel a travaillé monsieur J-M Robillot fonctionne ainsi. Mais l'effet Doppler n'est pas au programme au lycée. Nous avons donc cherché à le comprendre par nos propres moyens et avec l'aide de notre professeur.

L'effet Doppler est un phénomène impliqué dans toute situation où l'émetteur d'une onde (quelque soit sa nature : sonore, électromagnétique...) est en mouvement par rapport au récepteur. Il fut décrit pour la première fois par l'autrichien Christian Doppler en 1842. En effet, la vitesse de l'émetteur entraîne une modification de la fréquence de l'onde, bien que celle-ci garde une célérité constante.



Plus concrètement, lorsque l'émetteur et le récepteur de l'onde ont un mouvement de rapprochement l'un de l'autre, la fréquence f' de l'onde reçue est telle que : $f' = f + \Delta f$ où f est la fréquence de l'onde émise et Δf la fréquence dite « fréquence Doppler », décalage entre f et f' : $\Delta f = f' - f$. En revanche, lorsque l'émetteur et le récepteur s'éloignent, f' est telle que : $f' = f - \Delta f$

Dans les deux cas, la fréquence doppler respecte la relation :

$$V / c = \Delta f / f$$

Où V est la vitesse du mobile, et c la célérité de l'onde.

Il est donc possible de calculer la vitesse du mobile : $V = c \Delta f / f$

Si l'émetteur et le récepteur sont côte à côte et que l'onde est réfléchi sur un support mobile alors : $V = c \cdot \Delta f / 2f$

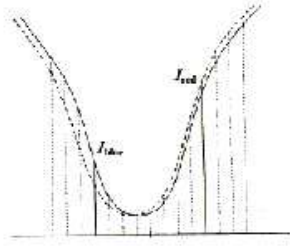
Pour des mouvements complexes, cette relation n'est valable qu'avec la vitesse radiale, c'est-à-dire la composante du vecteur vitesse projetée sur la ligne de visée, qui relie l'émetteur et le récepteur.

Nous avons essayé de comprendre le sens physique de ce résultat. Soit une source S émettant des ondes sonores. L'onde est une suite de surpressions et de dépressions. L'émission de deux maximum de pressions successifs est séparée de la durée T , la période du phénomène. Soit R un récepteur immobile. Un maximum de pression parcourt la distance SR en SR/c . La réception des deux maxima successifs est séparée de T .

La source se déplace maintenant vers R à la vitesse v . Le premier maximum parcourt toujours SR en SR/c . Mais le second est émis alors que la distance source récepteur est plus courte : $SR - vT$. Il parcourt cette distance en $(SR - vT)/c$. Ce second maximum est reçu à l'instant $T + (SR - vT)/c$. L'intervalle entre la réception du premier maximum et la réception du second est donc : $\Delta t = (T + (SR - vT)/c) - SR/c = T(1 - v/c)$. Donc $f_{\text{reception}} = 1/[T(1 - v/c)]$ et

$$\Delta f = f_{\text{reception}} - f_{\text{émission}} = 1/[T(1 - v/c)] - 1/T = (v/c)/[T(1 - v/c)] = f_{\text{émission}} (v/c)/[(1 - v/c)]$$

$\Delta f / f_{\text{émission}} = (v/c)/[(1 - v/c)] \approx v/c$ si $v \ll c$. Nous avons bien retrouvé la relation précédente.



En astronomie, l'effet Doppler est appliqué aux ondes lumineuses émises par les étoiles. On étudie leur spectre lumineux d'émission de raies, ce qui nous permet de conclure à l'éloignement de l'étoile par rapport à la Terre ou à son rapprochement.

Lorsque le soleil vibre sur un mode propre, certaines zones de sa surface subissent des mouvements importants (ventres). Ces mouvements peuvent entraîner le « gonflement » ou le « creusement » local de la surface. Ces parties qui s'enfoncent, et celles qui se soulèvent sont « reliées » par des zones stables, où la vibration est infime (nœuds). Ce qui permet de mesurer l'effet Doppler, c'est cette vitesse d'ondulation de la surface solaire, que le mouvement soit de rapprochement (par rapport à la surface terrestre) au niveau des zones de gonflement, ou qu'il soit un éloignement, au niveau d'une zone d'enfoncement.

Ces mouvements, aussi infimes soient-ils, sont de l'ordre du cm/s, et doivent donc être enregistrés par des spectromètres à effet Doppler d'une précision remarquable. L'analyse des mesures est très complexe car les mouvements acoustiques ne sont pas les seuls mouvements du Soleil. Le Soleil tourne sur lui-même et dans la galaxie. Il subit des éruptions et de nombreux autres mouvements. Le décalage par effet Einstein, ou rougissement gravitationnel depuis la photosphère solaire (de l'ordre de 630 m/s) complique encore la situation. Le moins perceptible des mouvements est pourtant celui que l'on cherche à mesurer.

Les mesures Doppler sont effectuées par GOLF sur une raie solaire par Spectrométrie à Résonance Magnétique par décomposition Zeeman. Les instruments actuels mesurent 2 intensités I_{bleu} et I_{rouge} sur les flancs d'une raie solaire. La différence $I_{\text{bleu}} - I_{\text{rouge}}$ est un indicateur de l'oscillation Doppler de la raie. Les vitesses d'oscillation de la surface du Soleil sont cependant très petites et occasionnent donc des décalages très faibles et très difficiles à détecter. Ils ne dépassent parfois pas un cent millième de la largeur des raies étudiées !

Annexe 4 : Mise au point de l'expérience Doppler

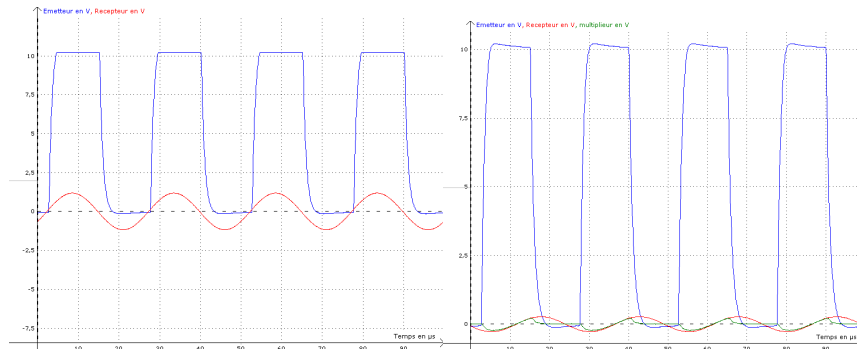
Nous ne sommes que des élèves de lycée pour lesquels la réalisation de ces montages s'est révélée délicate. Le matériel est souvent utilisé par de nombreux élèves du lycée, et il est fréquent qu'un composant soit hors service. C'est pour cela que nous avons mis au point un protocole permettant de réaliser le montage en identifiant les pannes éventuelles. (Et nous en avons rencontré souvent !).

- 1^{ère} étape : Test de l'émetteur et du récepteur d'ultrasons

On branche l'émetteur sur la borne 12V du boîtier SYSAM SP5 et la masse.

On branche ensuite la borne « test » de l'émetteur au boîtier d'acquisition entre EA0. Le récepteur d'ultrasons n'a pas besoin d'alimentation : on le branche entre EA1 et la masse. Dans Latis Pro, on choisit une durée d'acquisition très courte, par exemple 100µs.

On acquiert (F10) puis on prend soin à vérifier que le signal obtenu est comparable à celui la copie d'écran ci-dessous, c'est-à-dire en créneaux pour l'émetteur et sinusoïdal pour le récepteur. On change le nom EA1 en Emetteur et EA0 en Récepteur pour repérer facilement les signaux étudiés. Soit F la fréquence du signal émis par l'émetteur ultrasonore et f la fréquence du signal reçu par le récepteur. Ces fréquences seront différentes si la cible est en mouvement.



Signaux Emetteur – Récepteur

Signaux Emetteur – Récepteur - multiplieur

- 2nde étape : Ajout du multiplieur de tensions

En multipliant les deux tensions précédentes, on obtiendra un signal riche de plusieurs fréquences si la cible est mouvante.

On branche le multiplieur à +12 V, 0V, -12V sur l'alimentation du boîtier d'acquisition. La sortie S du multiplieur est reliée à l'entrée analogique EA2 de l'ordinateur. Comme on le voit sur la courbe ci-dessus, la tension de sortie du multiplieur est une simple courbe presque sinusoïdale de fréquence 40000 Hz car la cible n'est pas en mouvement.

- 3^{ème} étape : Ajout du filtre passe bas

Si la cible est en mouvement la fréquence du signal du récepteur peut s'écrire $f = F + \Delta f$. On obtient donc 3 fréquences en sortie du multiplieur : F , $F-f$, $F+f$ soit F , $2F + \Delta f$ et Δf . Le filtre passe bas, comme son nom l'indique ne laisse passer que les signaux de faible fréquence. Il permet de supprimer les tensions de fréquence F et $2F + \Delta f$, et donc de ne garder que la tension de fréquence Δf . C'est cette fréquence qui permettra de déterminer la vitesse de la cible.

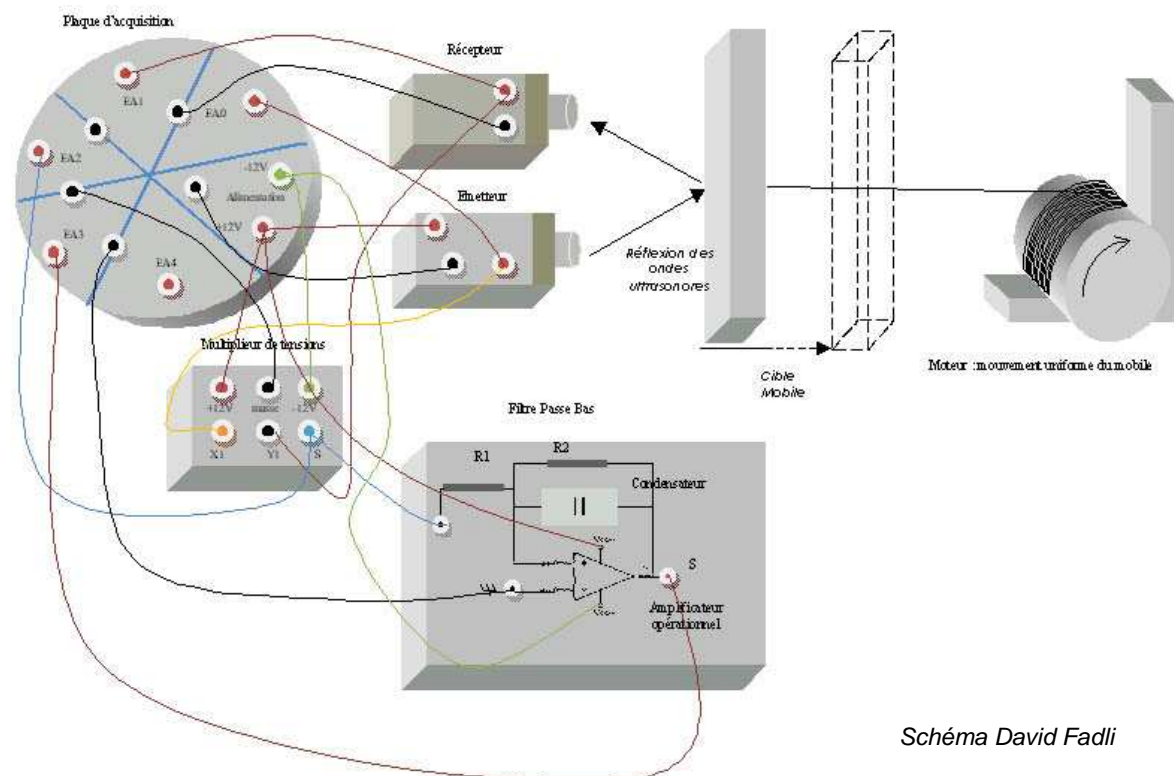


Schéma David Fadli

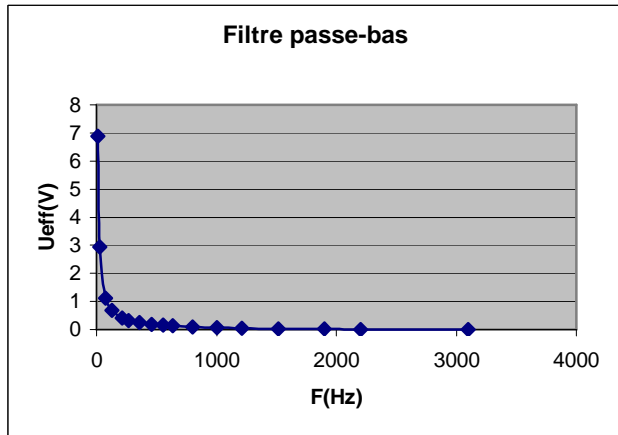
Nous n'avons pas encore étudié ce type de montage en cours, alors nous avons pris les valeurs données sur un TP de Mme Christine Lehman, du lycée Jacquart, centre de ressource de Paris, trouvé sur internet.

On alimente l'Amplificateur Opérationnel en +12V, 0V, -12V par le boîtier. On récupère la tension de sortie en branchant la sortie S en EA3. Dans le logiciel Latis pro, on

allonge le temps de mesure à 100ms car la fréquence de la tension de sortie (Δf) est beaucoup plus faible que celle du signal ultrasonore, donc la période plus grande.

Dans ce TP, $R_1 = 33 \text{ k}\Omega$ et $C = 2,31 \text{ }\mu\text{F}$. La fréquence de coupure est une grandeur qui caractérise le comportement du montage. Elle vaut $f_c = 1/(2\pi R_1 C) = 2,1 \text{ Hz}$. Pour comprendre expérimentalement ce montage, nous

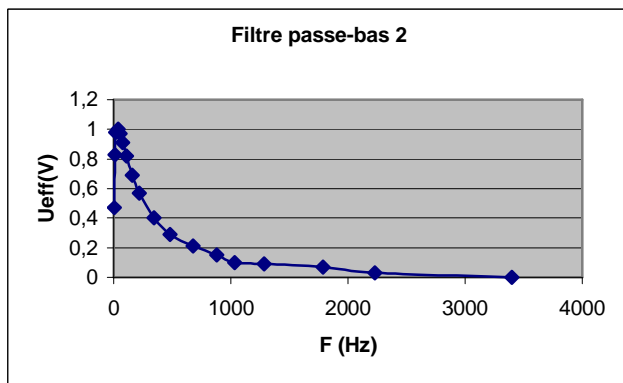
avons fait varier la fréquence d'un signal sinusoïdal d'amplitude constante. Nous avons mesuré la tension efficace en sortie du filtre avec un voltmètre. Voici la courbe de réponse en fréquence obtenue:



La tension efficace diminue rapidement et s'annule pour 3100 Hz. Un tel montage ne laissera pas passer les signaux de fréquence supérieure à 3100 Hz. C'est ce que nous recherchons.

Cependant la tension Doppler que nous cherchons à étudier a une fréquence de l'ordre de 100 Hz. N'est-il pas possible d'améliorer ce montage ? Remplaçons la résistance R_1 par une résistance de 470Ω . La fréquence de coupure vaut alors 146,6 Hz. Voici la courbe de réponse en fréquence obtenue:

Cependant la tension Doppler que nous cherchons à étudier a une fréquence



Le niveau du générateur de signaux n'a pas été modifié entre les deux expériences. Cependant le niveau de sortie du filtre est plus important dans le premier cas que dans le second pour les fréquences qui nous intéressent. Nous choisirons donc le premier montage de $f_c = 2,1 \text{ Hz}$ pour notre étude du phénomène Doppler.

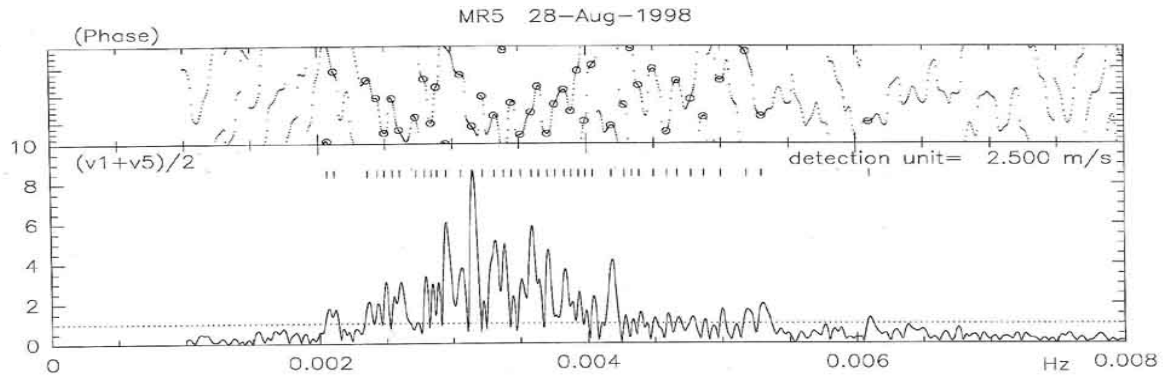
Sur Latis pro, on ouvre une deuxième fenêtre, en y isolant seulement la tension en sortie du filtre passe bas. On paramètre une durée d'acquisition de 500 ms. En mode d'acquisition permanente, on remarque que si l'on fait varier la position de la brique par rapport au système émetteur récepteur, on observe un changement de la fréquence du signal du filtre passe bas, selon la rapidité d'éloignement ou de rapprochement de la cible. C'est une illustration du phénomène Doppler.

Sur Latis pro, on ouvre une deuxième fenêtre, en y isolant seulement

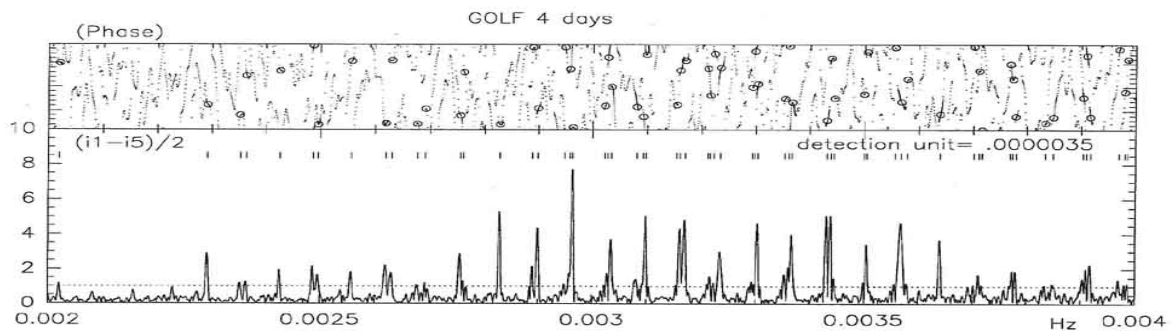
Annexe 5 : Quelques fréquences des modes de pression : spectres acoustiques du Soleil

Voici des spectres que nous a communiqué Monsieur Robillot, notre partenaire. Ces spectres sont des spectres de puissance, et porte donc en ordonnée le carré de l'amplitude du signal lumineux par unité de fréquence. Ils montrent l'importance de la durée des mesures sur la qualité du spectre. La précision du spectre obtenue augmente avec la durée de l'étude. Le dernier spectre, obtenu grâce à 7 mois d'observations, comporte des pics fins et peu de bruit de fond.

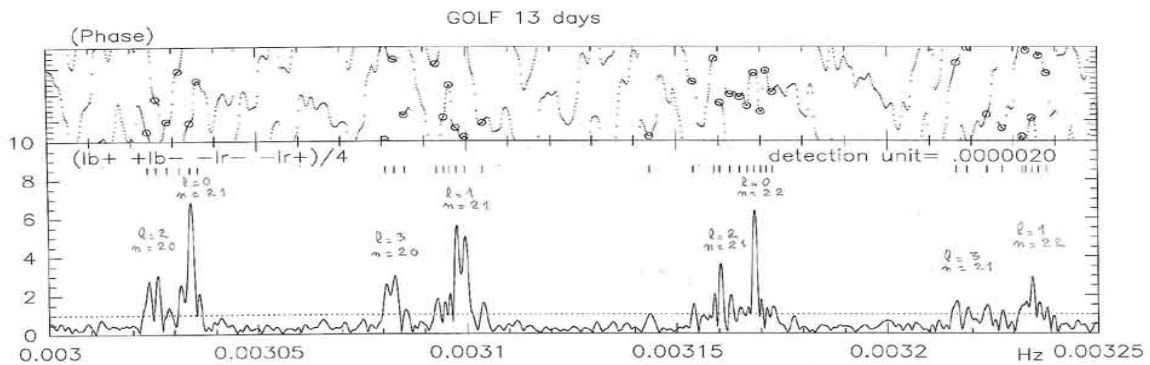
Pour une comparaison initiale, voici le spectre obtenu des "oscillations solaires de 5 minutes" avec une observation depuis le sol durant 8 heures. Les pics sont larges et confus.



Voici maintenant le spectre obtenu avec 4 jours d'enregistrement continu par GOLF, spectre où l'on distingue déjà bien l'essentiel les différents modes-p (modes de pressions)



Les pics sont déjà beaucoup plus fins et certains sont dédoublés à cause de la rotation du soleil. Puis, à partir d'un enregistrement continu de 13 jours par GOLF, voici un détail du spectre



Enfin, un détail du spectre obtenu avec 7 mois d'observations de GOLF (figure_3 page 220, d'un article de *A.H. Gabriel et al.* intitulé "Performances and early results from GOLF" paru en 1997 dans le livre "The First Results from SOHO" édité par "Kluwer Academic Publishers". Cette référence nous est donnée par Monsieur Robillot)

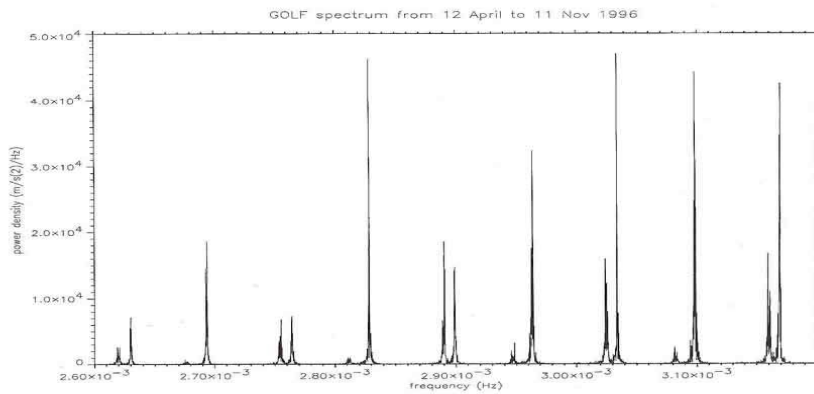


Figure 3. Section of the p -mode spectrum obtained from 7 months of data. Note the extremely low background level.

Ces modes de vibration de pression (modes p), obtenus après environ 7 mois de mesures GOLF se répartissent en des fréquences très pures de 1116 microHz à 4675 microHz.

Ces modes de vibration se présentent en doublets avec une séparation très étroite de l'ordre 450 nanoHz soit $\sim 0,450$ microHz (comparable à la largeur de ces résonances après 6 mois de détection sans interruption). Il s'agit pour l'essentiel d'un "rotational splitting", qui est dû à la différence de fréquence de résonance entre l'onde qui tourne dans le sens de la rotation et celle qui tourne en sens inverse de la rotation des couches du soleil où se propagent (majoritairement) tel ou tel modes p (d'où des différences de splitting des modes p selon que $l=1, 2, 3$).

On peut faire plusieurs remarques à propos de la précision qu'arrivent à atteindre les astronomes grâce à cette méthode de mesure. Afin d'être exploitables, les fréquences doivent être obtenues avec une précision supérieure à celle du niveau de connaissance du modèle solaire tel que nous l'avons décrit précédemment, c'est-à-dire qu'elles doivent être mesurées à moins de 1% près. Les modes propres ont un temps d'excitation et d'amortissement de quelques jours, ce qui donne aux pics correspondants une largeur naturelle de 1 m Hz environ (durée de vie de trois jours de l'oscillation). Ceci a pour conséquence que la précision possible sur la mesure d'une fréquence ne croît avec le carré du temps d'intégration qu'au-delà de ces quelques jours. Or il n'est pas possible d'obtenir de telles durées d'observation en continu sauf en travaillent dans l'espace comme l'a fait Soho à cause de la nuit et du mauvais temps. C'est pourquoi il s'avère nécessaire d'utiliser des réseaux de stations d'observation dispersées sur la surface de la planète. Ce problème de fenêtre temporelle affecte donc la précision des résultats.

Annexe 6 : Notre programme en Visual basic.(Programmation David Fadli)

TABLE 1. Table of *p*-mode frequencies

n	l=0	l=1	l=2	l=3	l=4
07	1116.64±1.37				
08	1260.52±1.40	1329.22±0.48	1393.21±0.47		
09	1406.72±0.84	1472.65±0.16	1535.37±0.15		
10	1548.38±0.05	1612.78±0.19	1674.50±0.34		
11	1686.60±0.05	1749.23±0.04	1809.92±0.14	1865.07±0.94	
12	1822.21±0.06	1885.08±0.05	1945.71±0.11	2001.23±0.50	
13	1957.44±0.06	2020.85±0.04	2082.14±0.09	2137.96±0.23	
14	2093.55±0.04	2156.79±0.07	2217.97±0.14	2273.11±0.14	2321.28±1.00
15	2228.67±0.07	2291.77±0.08	2352.26±0.08	2407.56±0.42	
16	2362.70±0.08	2425.54±0.08	2485.94±0.11	2541.94±0.21	
17	2495.95±0.07	2559.22±0.07	2619.55±0.08	2676.19±0.30	
18	2629.84±0.07	2693.26±0.06	2754.51±0.06	2811.36±0.10	2864.33±0.45
19	2764.03±0.08	2828.03±0.08	2889.64±0.08	2946.86±0.22	3001.37±0.56
20	2898.80±0.06	2963.50±0.05	3024.75±0.12	3082.27±0.14	3137.78±0.47
21	3033.76±0.04	3098.10±0.08	3159.82±0.09	3217.74±0.15	3273.52±0.54
22	3168.61±0.06	3233.28±0.08	3295.35±0.14	3353.36±0.65	
23	3303.12±0.08	3368.59±0.09	3430.75±0.15	3490.28±0.44	
24	3438.88±0.12	3504.08±0.14	3566.71±0.30	3626.16±0.42	
25	3574.61±0.14	3639.93±0.24	3703.74±0.58	3763.10±2.10	
26	3710.64±0.98	3776.29±0.20	3839.16±1.17	3900.47±1.50	
27	3846.28±0.33	3913.53±0.28	3977.39±0.98	4036.00±2.00	
28	3983.56±0.73	4048.98±0.40	4114.14±1.49	4173.10±3.10	
29	4120.40±0.82	4185.73±0.44	4250.75±1.32	4309.82±3.10	
30	4258.08±1.88	4324.77±0.61	4389.03±1.27		
31	4395.44±1.13	4462.27±0.58			
32	4536.01±2.25	4600.83±1.04			
33	4675.00±3.00				

coefficient	145035 Transposition					Fréquences audibles
	en Hz	en Hz	en Hz	en Hz	en Hz	
n	l=0	l=1	l=2	l=3	l=4	
0	19,8175824	0	0	0	0	0
1	40,1224824	0	0	0	0	0
2	60,4273824	0	0	0	0	0
3	80,7322824	0	0	0	0	0
4	101,037182	0	0	0	0	0
5	121,342082	0	0	0	0	0
6	141,646982	0	0	0	0	0
7	161,951882	0	0	0	0	0
8	182,819518	192,783423	202,064212		0	0
9	204,023635	213,585793	222,682388		0	0
10	224,569293	233,909547	242,861108		0	0
11	244,616031	253,699573	262,501747	270,500427		0
12	264,284227	273,402578	282,19605	290,248393		0
13	283,89731	293,09398	301,983175	310,079029		0
14	303,638024	312,810038	321,683279	329,680509	336,666845	
15	323,235153	332,386862	341,160029	349,180465		0
16	342,674195	351,788194	360,548308	368,670268		0
17	362,000108	371,176473	379,926434	388,141217		0
18	381,418844	390,616964	399,500358	407,745598	415,428102	
19	400,881091	410,163331	419,098937	427,39784	435,303698	
20	420,427458	429,811223	438,694616	447,037029	455,087922	
21	440,001382	468,938765	458,284494	466,684921	474,774973	
22	459,559351	488,563451	477,941087	486,354568		
23	479,068009	508,214243	497,578826	506,21276		
24	498,757961	527,917248	517,297785	525,920116		
25	518,443561	547,69422	537,171931	545,781209		
26	538,172672	567,598824	556,812571	565,704666		
27	557,84522	587,243814	576,860759	585,36126		
28	577,755625	607,077351	596,694295	605,245559		

29	597,602214	627,243017	616,507526	625,074744	
30	617,570633	647,185329	636,562966		
31	637,49264	667,281379			
32	657,88021				
33	678,038625				

Tout notre programme est bâti autour de la fonction BEEP qui permet d'émettre un son avec le haut-parleur système de l'ordinateur. Déclarons d'abord cette fonction selon un modèle trouvé sur un forum de développeur Visualbasic:

Option Explicit

Private Declare Function Beep Lib "kernel32" (ByVal dwFreq As Long, ByVal dwDuration As Long) As Long

Il suffit maintenant de créer des boutons de commandes permettant d'émettre un son de fréquence choisie, ici 270,50 Hz, pour une durée de 200 ms. Chaque touche du programme est un bouton de commande.

Private Sub Command1_Click()

Beep CLng(270.500427), 200

End Sub

Cette programmation est simple et permet de créer un piano solaire !