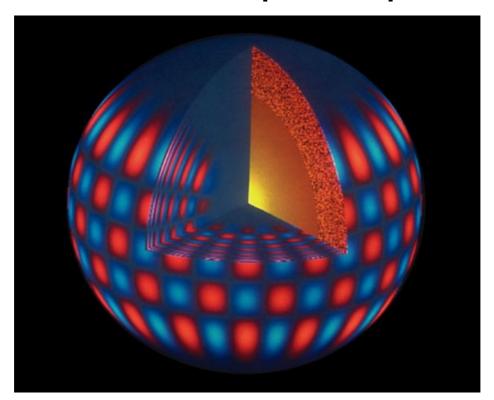




Comment voir à l'intérieur du Soleil ?

La véritable musique des sphères









Atelier scientifique du Lycée Bernard Palissy

Professeur encadrant: Laclaverie Jean-Michel

Table des matières

INTRODUCTION

Problématique

- 1- Acoustique solaire
- 2- Approche expérimentale des résonances 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
- 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, perspectives

Sources documentaires

Résumé:

Avant l'héliosismologie, les seules informations sur l'intérieur du Soleil provenaient d'observations de la surface. Mais aujourd'hui, le Soleil est vu comme 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. 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, 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. Enfîn, nous comparons le spectre du Soleil à celui de divers instruments de musique avant de tenter une reconstitution originale de sa musique.

Introduction

Toute la lumière qui nous provient du Soleil a été émise de la surface ou de l'atmosphère au-dessus de la surface. Aucune information directe ne nous parvient ainsi sur l'intérieur de la sphère solaire. Mais le Soleil est aussi un système qui oscille autour d'un état d'équilibre principalement grâce aux forces de pression. Ces oscillations engendrent des ondes acoustiques stationnaires qui s'établissent dans le Soleil, comme dans un instrument de musique.

Une source essentielle d'informations sur l'intérieur du Soleil est donc fournie par l'héliosismologie : le principe consiste à observer la déformation de la surface solaire due aux ondes acoustiques pour en déduire des informations sur les propriétés physiques sous la surface. Le Soleil présente des oscillations sur toute sa surface, qui présentent un motif compliqué. Ces oscillations ont été découvertes en 1960.

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 avons conçu des expériences dans le laboratoire de notre lycée pour mieux comprendre l'acoustique solaire. Nous étudions dans une première partie 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. Dans une seconde partie nous effectuons des mesures par effet Doppler sur un modèle du Soleil: l'effet Doppler est utilisé par la sonde SOHO pour déterminer les fréquences de résonance du Soleil. Dans une troisième partie, nous étudions les spectres de différents sons, qui permettent de déterminer la part des différents modes propres dans la vibration du soleil ou d'un instrument de musique. Enfin, nous tentons une reconstitution de la musique solaire.

Problèmatique

Comment comprendre les ondes acoustiques dans le Soleil grâce aux résultats de la sonde SOHO et à des modélisations de laboratoire?

1- Acoustique solaire

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

- sa masse, de 1,99 10³⁰kg, 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.

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.

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.

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. L'héliosismologie vise donc à étudier la partie visible

Photosphere (granules)

Sunapot

Core
Chromosphere
Filament

Coronal Hole

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.

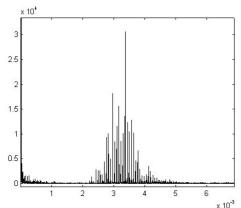
de ces oscillations, c'est à dire les " tremblements "

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

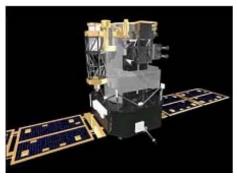
les progrès récents la détection des « modes-p » doit être encore améliorée, et la détection des « modes-g » n'en est encore qu'à ses débuts.

Ces oscillations se décomposent en une multitude de modes propres qui se comptent théoriquement par millions et dont plusieurs

Soleil qui permet d'étudier la structure et la dynamique interne de notre étoile. Mais malgré



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.



participé à ce projet.

Les vibrations acoustiques solaires sont lentes. Il faut des durées d'observation très longue pour en faire une étude correcte. 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, qui ont répondu à certaines de nos questons, ont

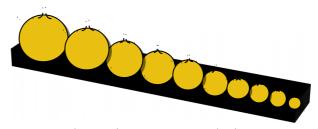
2- Étude expérimentale des résonances d'une sphère

Le Soleil a une forme très proche d'une sphère. Et il entre en résonance soumis à une excitation acoustique. L'air contenu dans une sphère peut être excité par un haut-parleur et entrer en résonance dans certaines conditions. Ces résonateurs sont nos premiers modèles du Soleil. 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. Étudions ces résonateurs.

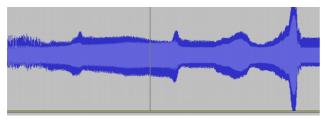
2.1 Influence du volume de la sphère sur les fréquences de résonance

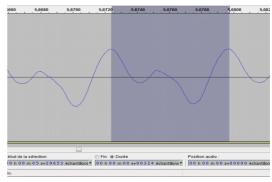
Nous disposons de 10 résonateurs de Helmholtz, soit 10 systèmes à peu près sphériques numérotés de 1 à 10 du plus gros au plus petit.

Nous relions le GBF à un haut parleur et un micro à la carte son de l'ordinateur. Nous générons un son en faisant varier la



fréquence du générateur de 100 Hz à 2500 Hz. Nous l'enregistrons sur Audacity et nous déterminons les fréquences de résonance, en mesurant la période au niveau des maxima. La fréquence changeant à chaque instant pendant l'enregistrement, nous zoomons sur un maximum et déterminons la période du signal sur une seule période (Période (s) = (nbre d'échantillon)/fréquence d'échantillonnage = (nbre d'échantillon)/44100)



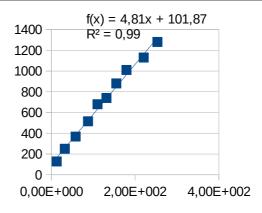


Certaines résonances sont très marquées, avec une forte amplitude. D'autres sont plus discrètes. Certains pics sont fins, d'autres très large. Nous ne pouvons cependant pas comparer leurs amplitudes respectives car l'amplitude du signal fourni par le haut-parleur dépend de la fréquence. Chaque pic représente un mode propre avec sa fréquence d'oscillation. L'écart entre ces fréquences de résonance n'est 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. Les 10 sphères étudiées confirment ces résultats

N°	D (cm)	V (m ³⁾	1/V (m ⁻³⁾	(1/V) ^{1/2}	F1 (Hz)	F2 (Hz)	F3 (Hz)	F4 (Hz)	F5 (Hz)	F6 (Hz)
1	23	6,37E-003	1,57E+002	1,25E+001	128	570	1020	1600	2190	2700
2	12,3	9,74E-004	1,03E+003	3,20E+001	250					
3	8,3	2,99E-004	3,34E+003	5,78E+001	368					
4	6,3	1,31E-004	7,64E+003	8,74E+001	515					
5	5,4	8,24E-005	1,21E+004	1,10E+002	680					
6	4,8	5,79E-005	1,73E+004	1,31E+002	740					
7	4,3	4,16E-005	2,40E+004	1,55E+002	880					
8	3,9	3,11E-005	3,22E+004	1,79E+002	1010					
9	3,4	2,06E-005	4,86E+004	2,20E+002	1130					
10	3,1	1,56E-005	6,41E+004	2,53E+002	1280					

ΔF (Hz) pour la sphère 1

fréquences	Hz		delta f en Hz
1		123	
2	2	570	447
3	3	1020	450
	ļ	1600	580
5	5	2190	590
(6	2700	510



Nous n'avons pas trouvé de relation entre les fréquences de résonance d'une sphère. Nous étudions maintenant la fréquence fondamentale et les paramètres physiques pour les différentes sphères. 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. En testant différents modèles, nous avons trouvé un lien entre la fréquence fondamentale de chaque sphère et l'inverse de la racine carrée de son volume de la sphère .

 $F_1=4,81.1/V^{0.5}+101,87$. Le coefficient 4,81 SI est proportionnel à c la célérité du son dans l'air de la sphère (342 m/s). (Bulletin de l'Union des Physiciens et des Chimistes 845, juin 2002 p 1061)

Conclusion 1 pour l'étude du modèle sphérique au laboratoire:

La valeur de la fréquence fondamentale d'un résonateur sphérique est une fonction affine de la racine carrée du volume de l'air dans la sphère.

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. 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.

Conclusion 1 pour le Soleil:

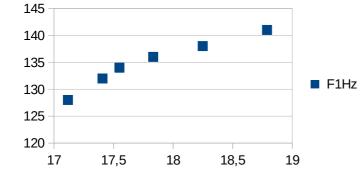
Le spectre solaire permet de déterminer la vitesse d'oscillation de la surface solaire et la fréquence de ces oscillations pour chacun des modes.

2.2 Influence de la température

Nous mesurons maintenant la première fréquence de résonance de la plus grosse sphère de Helmholtz pour diverses températures.

La fréquence de résonance fondamentale d'une sphère de Helmholtz est une fonction affine la célérité du son dans l'air selon le BUP 845, juin 2002 p 1061. La vitesse du son dépend de la racine carrée de la température exprimée en kelvins.

Temp érature (°C)	Température (°K)	(Température (°K))1/2	F ₁ Hz
20	293	17,1172427686	128
30	303	17,4068951855	132
35	308	17,5499287748	134
45	318	17,8325545001	136
60	333	18,2482875909	138
80	353	18,7882942281	141



La courbe obtenue permet de déterminer la fréquence de résonance de l'air dans la sphère, connaissant sa température. Cette vitesse du son dépend de plusieurs facteurs: nature du milieu, pression et température.

Conclusion 2 pour l'étude du modèle sphérique au laboratoire:

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

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 du soleil, sa vitesse est de 1'ordre de 410 000 m.s⁻¹.

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.

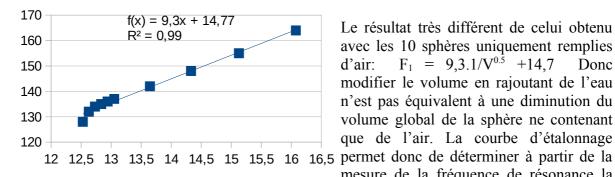
Conclusion 2 pour le Soleil:

Pour le soleil comme pour notre modèle, les modes de vibrations ont des fréquences qui augmentent avec la température et donc la célérité du son

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	$(1/Vair)^{1/2}$	F1 en Hz
0	6370,626303	12,529	128
100	6270	12,629	132
200	6170	12,731	134
300	6070	12,835	135
400	5970	12,942	136
500	5870	13,052	137
1000	5370	13,646	142
1500	4870	14,33	148
2000	4370	15,127	155
2500	3870	16,075	164



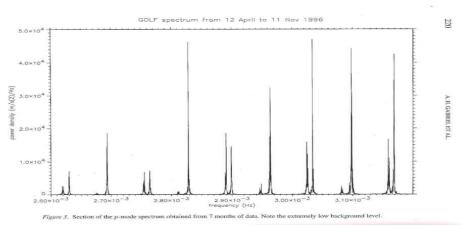
Le résultat très différent de celui obtenu avec les 10 sphères uniquement remplies $F_1 = 9.3.1/V^{0.5} + 14.7$ modifier le volume en rajoutant de l'eau n'est pas équivalent à une diminution du volume global de la sphère ne contenant que de l'air. La courbe d'étalonnage mesure de la fréquence de résonance la

quantité d'eau contenue dans le résonateur.

Conclusion 3 pour l'étude du modèle sphérique au laboratoire:

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.

Voici 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)



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.

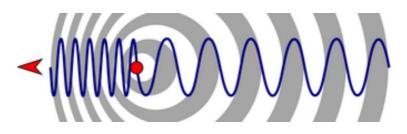
Conclusion 3 pour le Soleil:

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

3- Mesures par effet Doppler:

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.

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.

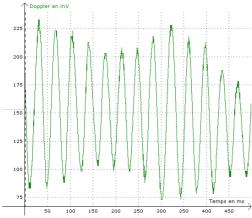
Il est donc possible de calculer la vitesse du mobile : $V = c\Delta f / f$

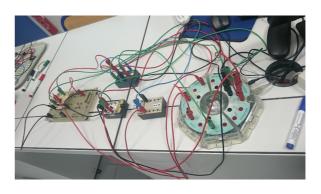
Les mesures solaires grâce à l'effet Doppler se font par l'analyse du spectre de la lumière. L'émetteur est le soleil et le récepteur la sonde SOHO. Pour mettre en évidence l'effet Doppler, le rapport v/c est déterminant (avec v vitesse de déplacement d'un objet dans le laboratoire de notre lycée de l'ordre de 1 m/s et c la célérité de la lumière dans le vide). Ce rapport v/c vaut donc 1/3.00.10⁸ = 3,33. 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:

 $v/c = 1/340 = 2,9.\ 10^{-3}$. 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.

L'émetteur (représentant le soleil) est mobile et le récepteur (représentant la sonde SOHO) est fixe. Nous faisons osciller l'émetteur manuellement. Nous obtenons un signal périodique d'amplitude variable. La durée d'acquisition est de 250 µs, pour visualiser à peu près 10 périodes de la tension. L'outil «mesures automatiques» de Latispro donne la valeur de la fréquence du signal.





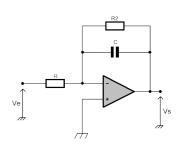
Pour un décalage de 100 Hz, nous trouvons une vitesse de l'émetteur de $V = c\Delta f / f = 340 \times 100/40000 = 0.85 \text{ m/s}.$

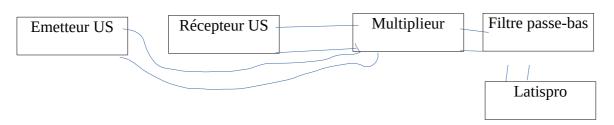
Mais ce résultat n'est qu'une mesure « presque instantanée » de la valeur de la vitesse des oscillations. Nous voulons pouvoir suivre les oscillations complètes du système. Nous envoyons pour cela le signal de l'émetteur et du récepteur sur un multiplieur puis un filtre passe bas. (http://pierre.colin.pagesperso-orange.fr/physique/pdf/Cahier%20de%20texte %20physique%202006/TP/Ultrasons-effet%20doppler.pdf)

Si l'émetteur est en mouvement la fréquence du signal du récepteur peut s'écrire $f = F + \Delta f$. On obtient 3 fréquences en sortie du multiplieur : F, F-f, F + f soit F, 2F + Δf et Δf . Le

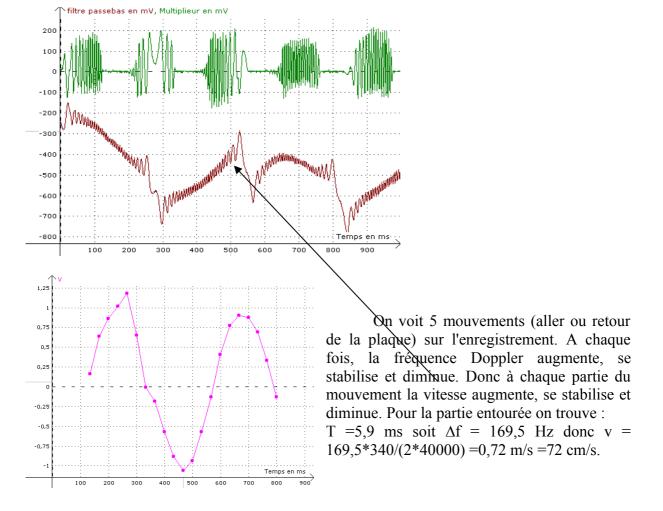
filtre passe bas, comme son nom l'indique ne laisse passer que les signaux de faible fréquence. Il permet de supprimer les tensions de fréquence F et $2F + \Delta f$, et donc de ne garder que la tension de fréquence Δf . C'est cette fréquence qui permettra de déterminer la vitesse de la cible.

La fréquence de coupure est une grandeur qui caractérise le comportement du filtre. Elle vaut f_c = $1/(2\Pi$ $R_2C)$ =2,1 Hz pour R_2 = $33~k\Omega$ et C = 2,31 μF_{\cdot} . Pour comprendre expérimentalement ce montage, nous avons fait varié la fréquence d'un signal sinusoïdal d'amplitude constante. La tension efficace diminue rapidement et s'annule pour 3000 Hz. Un tel montage ne laissera pas passer les signaux de fréquence supérieure à 3000 Hz. C'est ce que nous recherchons.





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 :



Conclusion 4 pour l'étude du modèle au laboratoire:

Notre modèle permet d'étudier l'évolution de la vitesse de l'émetteur sur plusieurs secondes grâce à l'effet Doppler

Lorsque le soleil vibre sur un mode propre, certaines zones de sa surface subissent des mouvements importants (ventres). Les parties qui s'enfoncent, et celles qui se soulèvent sont reliées par des zones stables (nœuds). Ce que permet de mesurer l'effet Doppler, c'est cette vitesse d'ondulation de la surface solaire de l'ordre du cm/s. Les vitesses d'oscillation de la surface du Soleil sont 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! 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.

Conclusion 4 pour le Soleil:

L'effet Doppler permet de déterminer la vitesse d'oscillation des granules solaires en mesurant le décalage en fréquence d'une raie de son spectre lumineux.

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.

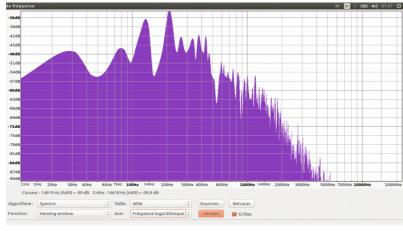
Nous avons fait la décomposition en série de Fourier du son de divers instruments : une grosse caisse, un tambour, une timbale, une cloche, un piano, un orchestre... Nous avons comparé ces spectres de fréquences avec ceux du Soleil. Le Soleil est 10 milliard de fois plus gros qu'un instrument de musique. 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 μ Hz. Pour rendre compte des modes l=1, 2, 3, etc., cela donne d'autres distributions complémentaires, avec toujours une séparation proche de 140 μ Hz, mais des fréquences décalées d'un mode 1 à l'autre. (voir tableau paragraphe 4.3)

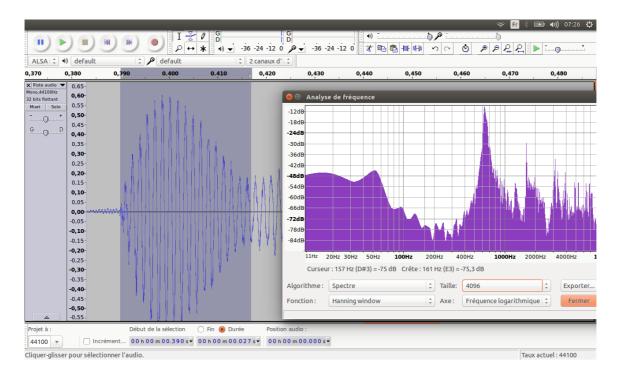
4.1.1 Spectre d'une caisse claire



C'est un son musical de hauteur bien déterminée avec deux fréquences principales à 131 Hz et 210 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.

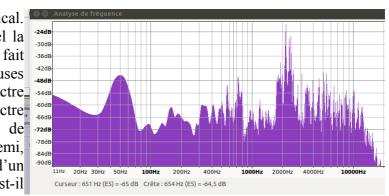
4.1.2 Spectre d'une cloche



Ce son est aussi musical avec les fréquences principales suivantes : 627 Hz, 1322 Hz, 3120 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 pseudo-période de l'ordre de 0,027s. Le signal s'amortit rapidement. Le dédoublement des pics est due à ces battements de deux fréquences proches. Pour le Soleil, le dédoublement est du à sa rotation.

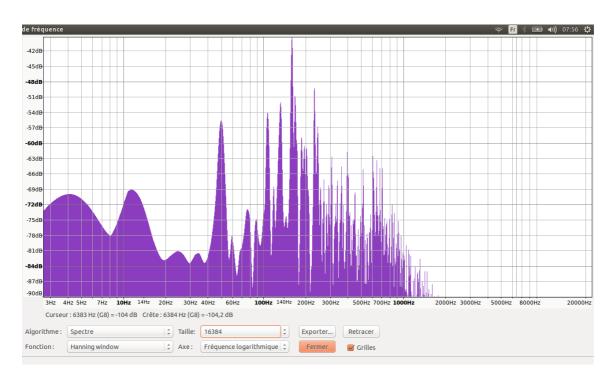
4.1.3 Spectre d'une cymbale

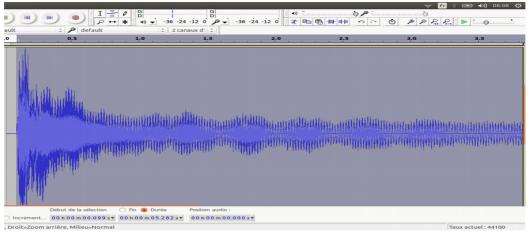
Le signal n'est pas musical. Ce n'est qu'un bruit, pour lequel la décomposition Fourier de très nombreuses apparaître de fréquences, comme dans le spectre -54d8 du Soleil. Donc, lorsque le spectre solaire, riche de millions fréquences sur une octave et demi, s'apparente davantage à celui d'un bruit que 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

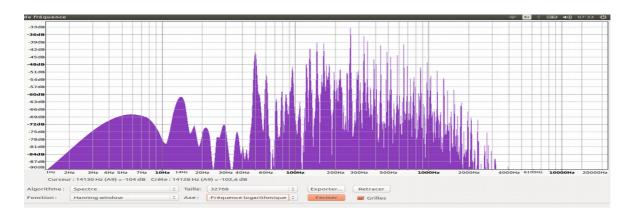




Comme pour la cloche, l'enregistrement de cette grosse caisse fait apparaître des battements, c'est à dire une évolution périodique lente de l'amplitude du signal. L'analyse de Fourier fait apparaître des doublets de pics qui rappellent les doublets des spectres du Soleil.

4.1.5 Spectre d'un piano

Nous avons réalisé une expérience à l'aide du logiciel Audacity, 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 obtenons un spectre avec de nombreux pics. Voici le spectre d'un piano d'étude.



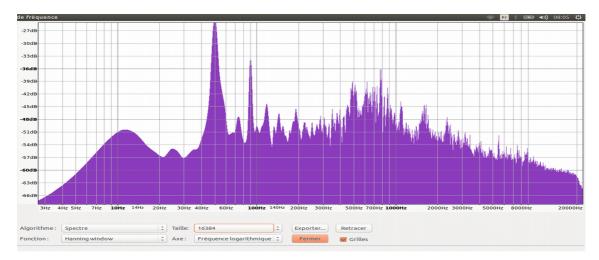
Nous avons une large ressemblance avec le soleil. La taille du Soleil étant largement supérieure à celle d'un piano, les fréquences seront beaucoup plus basses. Toutefois, nous observons une similitude dans l'allure générale de la répartition des pics.

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 $^{12}\sqrt{2}$. 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





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 50 Hz. Il nous fallait étudier un son produit par un mouvement de convection, car le son des granules solaires est produit par leur convection.

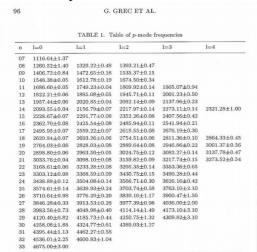
4.2 Une reconstitution de la musique solaire

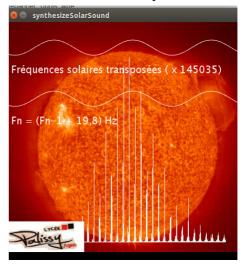
La musique du Soleil reconstituée par les scientifiques (notamment à Stanford) n'est pas belle à écouter. Elle est analogue à la musique de tuyaux d'orgues sans clavier excités au gré du vent. Il manque un compositeur.

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 écrit pour cela un sketch avec le logiciel libre Processing, où un clavier produit certaines notes solaires, transposées en sons audibles en multipliant leur fréquence par 145035. Ce coefficient permet de transformer en la3 à 440 Hz, la fréquence 3303,12 µHz 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. Cette gamme donne une ambiance musicale particulière. Le musicien n'est pas le Soleil. Il n'est ici que l'instrument.





Fréquences solaires

Notre programme

Conclusion, perspectives

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 notre année de Première S et le début de notre année de Terminale. Nous nous sommes appuyé sur le travail qu'un groupe d'élèves de notre lycée avait fait sur le sujet il y a 6 ans.

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.

Nous voulons améliorer notre programme de musique solaire pour rendre possible de jouer des notes solaires, grâce à un ordinateur, avec une composition originale et un groupe de musicien. Nous voulons y parvenir, grâce au travail en spéciailité ISN et en option musique. Un projet devrait être prêt au moi de mai.

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 ancien programme.

Annexe: Programmation des sons solaires

- Sketch créé sur le logiciel libre Processing

```
import ddf.minim.*;
                                                               text("Fréquences solaires transposées ( x 145035)",10, 100);
import ddf.minim.ugens.*;
                                                               text("Fn = (Fn-1 + 19.8) Hz", 10.200);
Minim
          minim;
                                                               // draw the waveform of the output
AudioOutput out;
                                                               for(int i = 0; i < out.bufferSize() - 1; <math>i++)
Oscil
        wave;
PImage soleil;
                                                                line(i, 50 - out.left.get(i)*50, i+1, 50 -
                                                              out.left.get(i+1)*50);
PImage palissy;
int [] frequencesSolaires = new int [30];
                                                                line(i, 150 - out.right.get(i)*50, i+1, 150 -
int frequence = 193;
                                                              out.right.get(i+1)*50);
void setup()
{
size(480, 450, P3D);
                                                              void mouseMoved()
 minim = new Minim(this);
                                                               float amp = map( mouseY, 0, height, 1, 0);
                                                               wave.setAmplitude( amp ):
 out = minim.getLineOut():
 wave = new Oscil( 440, 0.5f, Waves.SINE );
                                                               float freq = map( mouseX, 0, width, 193, 667);
                                                               frequence = 193;
 wave.patch( out );
 soleil = loadImage("solarspectrum.jpg");
                                                               while (freq >frequence)
 palissy =loadImage("cgenial3.jpg");
for (int i = 0; i < 24; i++)
                                                                frequence = frequence +20;
 frequencesSolaires[i] = frequence;
                                                               freq = frequence;
 frequence = frequence + 20;
                                                               wave.setFrequency( freq );
                                                              void keyPressed()
void draw()
                                                               switch( key )
 image(soleil,0,0);
 image(palissy,0,390,160,70);
                                                                case '1':
 stroke(255);
                                                                 wave.setWaveform( Waves.SINE );
 strokeWeight(1);
                                                                 break:
 textSize(20);
                                                                 case '2':
```

- Tableau des fréquences solaires transposées

coefficient	145035	Transposition		Fréquences audibles	
	en Hz	· ·			en Hz
n	I=0	l=1	l=2	I=3	L=4
C	19,8175824	0	0	0	0
1	40,1224824	0	0	0	0
2	60,4273824	0	0	0	0
3	80,7322824	0	0	0	0
4	101,037182	0	0	0	0
5	121,342082	0	0	0	0
6	141,646982	0	0	0	0
7	161,951882	0	0	0	0
8	182,819518	192,783423	202,064212	0	0
g	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				