

# ARTICLE DE FOND

## La Nouvelle Musique des Sphères<sup>(\*)</sup>

Sylvie Vauclair, astrophysicienne à l'IRAP, professeur émérite de l'université de Toulouse

*Cet article nous invite à découvrir le « chant des étoiles ». Saviez-vous que le Soleil résonne en sol dièse et que chaque étoile semblable possède une signature musicale spécifique ? A la fin de l'article l'auteur nous invite à écouter un duo de « thérémine » composé à l'aide des fréquences observées dans les étoiles.*

Deux découvertes fondamentales sont venues récemment révolutionner nos connaissances sur les étoiles. Elles apparaissent a priori comme déconnectées, mais sont en fait très reliées l'une à l'autre. La première, c'est que les étoiles semblables à notre Soleil ont des vibrations internes, dues à des ondes sonores, ou ondes de pression, qui se propagent en permanence entre leurs régions profondes et leurs atmosphères, créant ainsi des variations de lumière et de vitesse radiale en surface, détectables par nos instruments actuels. La seconde, c'est qu'une large proportion de ces étoiles (peut-être 25 %) a des planètes en révolution autour d'elles.

Ces deux découvertes ont été rendues possibles grâce à des technologies qui utilisent les mêmes instruments. Ce sont soit des spectrographes, qui permettent de détecter les mouvements détaillés des étoiles grâce à l'effet Doppler, soit des photomètres, utilisés pour étudier en détail les variations de lumière globale de l'étoile.

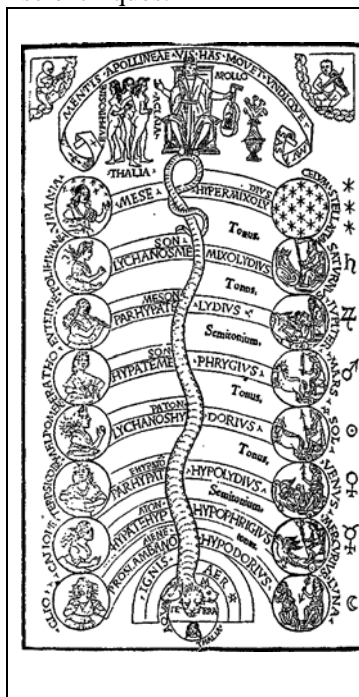
La première étoile dont les vibrations sonores ont été détectées est le Soleil, qui permet, grâce à sa proximité, des observations beaucoup plus détaillées que les étoiles lointaines. Cela se passait dans les années 1960-1970. On sait à présent que toutes les étoiles semblables au Soleil vibrent de la même manière. Les fréquences de vibration dépendent de la taille de l'étoile, de sa masse, de son âge, etc. Leur étude détaillée donne des informations scientifiques précieuses sur tous ces paramètres stellaires, beaucoup plus précises que ce qu'on pouvait obtenir dans le passé. Elle donne même des indications sur les détails de leur structure interne.

Par ailleurs, dans la mesure où les étoiles offrent une palette sonore riche et passionnante, rien n'empêche de transposer leurs vibrations pour les rendre audibles. Une musique originale, céleste, peut ainsi être composée. C'est un retour à la vieille idée de « musique des sphères », dans un contexte totalement renouvelé.

(\*) Voir La Nouvelle Musique des Sphères, éd. Odile Jacob, 2013

## De l'ancienne à la nouvelle musique des sphères

La découverte des vibrations sonores des étoiles nous reporte des millénaires en arrière, à l'époque des anciens philosophes grecs, qui avaient déjà relié la musique et l'astronomie en décrivant une « musique des sphères » très symbolique. Cette musique des sphères de l'Antiquité n'existe pas, mais il est intéressant d'y revenir pour mieux comprendre la manière dont se fait l'évolution des connaissances scientifiques.

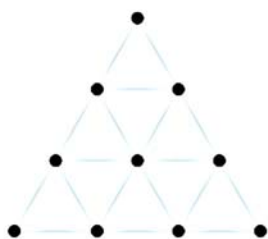


*Fig.1. Le monde selon Franchinus Gaffurius, moine contemporain de Copernic, qui présente encore la Terre fixe au centre du monde, entourée des sept planètes de l'Antiquité (à droite), surmontées par le firmament étoilé. À chaque planète est associée une muse (à gauche), ainsi que la Terre et le firmament dont la muse est Uranie. Les textes intermédiaires indiquent les « modes musicaux » (nous pourrions dire à présent les « notes ») attribuées à chaque planète. On reconnaît par exemple ici le phrygien pour Mars et le dorien pour le Soleil.*

Ces philosophes ne connaissaient du ciel et de l'espace que ce qu'on peut en voir à l'œil nu : le Soleil, la Lune, les étoiles et les planètes, astres errants au milieu des étoiles. En assimilant le Soleil et la Lune à des planètes, cela portait leur nombre à sept : dans l'ordre la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, le tout entouré des étoiles du firmament. Le Soleil occupait donc la place particulière de pilier central. Les planètes tournaient autour de la Terre d'un mouvement circulaire uniforme, et elles étaient sphériques, forme parfaite par excellence. C'est ainsi que les

pythagoriciens, autour des années 500 av. J-C, concevaient l'Univers, image reprise plus tard par d'autres philosophes, comme Platon (428-348 av. J-C) ou Aristote (384-322 av. J-C).

En même temps qu'ils décrivaient le monde à leur manière, les pythagoriciens étudiaient les mathématiques et la musique. Ils s'intéressaient aux sons caractéristiques des cordes vibrantes, ainsi qu'aux intervalles musicaux obtenus en divisant leur longueur par des nombres entiers, de un à quatre. Ils n'allaient pas plus loin que quatre, sans doute parce que l'ensemble des nombres 1+2+3+4 est égal à dix, nombre particulier, exprimant la plénitude, comme on le retrouve dans l'image de la Tétraktys.



*Fig.2. La Tétraktys, figure exprimant l'harmonie, la symétrie et la stabilité telles que les pythagoriciens les concevaient dans leurs représentations du monde et de la musique.*

Les pythagoriciens ont ainsi découvert les intervalles musicaux harmonieux de base, la quarte, obtenue en faisant vibrer une corde limitée aux trois quarts de sa longueur, et la quinte obtenue avec une corde limitée aux deux tiers. À partir de ces intervalles, en les reproduisant de manière successive, ils ont construit une gamme qui, avec quelques modifications, est encore la nôtre. Elle comporte sept notes de musique, il y avait sept planètes, la tentation était forte de les associer, en attribuant une note de musique à chaque planète. Ainsi est née la première « musique des sphères ».

Cependant, ces belles théories avaient des défauts, des hiatus, à la fois pour l'astronomie et pour la musique. Les anciens Grecs savaient déjà que les planètes ne tournaient pas vraiment d'un mouvement circulaire uniforme autour de la Terre. Lorsqu'on observe le mouvement de la planète Mars dans le ciel au cours du temps, d'une nuit à l'autre, on la voit se déplacer dans une direction par rapport aux étoiles, et parfois revenir en arrière pour repartir ensuite dans la première direction. Par ailleurs, on voit toujours les planètes Mercure et Vénus à proximité du Soleil, contrairement à Jupiter ou Saturne. Comment cela peut-il s'expliquer si toutes ces planètes tournent de la même manière autour de la Terre ?

En musique non plus, rien n'est parfait. La succession des notes obtenues par intervalles

successifs de quintes ou de quarts justes ne se reboucle pas sur elle-même. La musique refuse de se plier directement à la théorie des nombres<sup>1</sup> !

Comment réagir à ces défauts qui montrent que la théorie n'est pas parfaite ? Il y a deux attitudes opposées, très instructives pour l'analyse de l'évolution des connaissances dans les sociétés humaines. La première est celle de Platon et d'Aristote, qui consistait à refuser les évidences observationnelles, pour n'accepter que la perfection des théories élaborées par l'esprit humain.

La deuxième attitude est celle d'Aristarque de Samos (310-230 av. J-C). Elle consiste à prendre les observations comme des informations instructives, qu'il convient d'étudier en détail pour mieux avancer dans la quête de la connaissance. Ses observations du ciel ont conduit Aristarque à proposer, bien avant Copernic et Galilée, le premier modèle héliocentrique du monde, où la Terre était considérée comme une planète qui tournait autour du Soleil. Ceci est attesté par Archimède de Syracuse dans son livre « l'Arénaire ». Les idées d'Aristarque étaient cependant trop en avance sur leur temps et le modèle du monde prôné par Aristote fut le seul accepté par la société et la religion, au cours du Moyen Âge occidental, pendant de nombreux siècles.

On parle souvent de « révolution copernicienne ». Il est vrai que le modèle héliocentrique de Copernic a finalement réussi à s'imposer à la société et à mettre en retrait celui d'Aristote, mais Copernic n'a rien inventé, car les idées d'Aristarque étaient connues. Giordano Bruno, brûlé vif à Rome pour hérésie en 1600, est d'ailleurs allé beaucoup plus loin que Copernic, en imaginant l'Univers infini.

Par la suite, Kepler a montré que les orbites des planètes étaient des ellipses, plutôt que des cercles. Il n'avait cependant pas rejeté les idées musicales ! Il imaginait leur mouvement autour du Soleil comme un concert perpétuel, une musique dans laquelle intervenaient les excentricités des ellipses ! C'est grâce à Newton et à ses études de la gravitation que les astronomes ont pu donner une explication physique du mouvement des planètes, au-delà de la simple description. Dès lors, l'étude de l'Univers s'est fondamentalement dissociée de la musique même si l'exaltation devant l'immensité de l'espace a toujours conduit des musiciens à créer des œuvres musicales parfois magnifiques. Il ne s'agissait cependant plus de liaison théorique fondamentale entre les deux, seulement d'inspiration artistique.

<sup>1</sup> Voir la symphonie des étoiles, éd. Albin Michel 1996 chapitre 9.

Nous savons à présent que le Soleil, pas plus que la Terre, n'est le centre du monde. Il se trouve dans les régions extérieures d'une Galaxie, qui contient plus de cent milliards d'étoiles, et il y a des centaines de milliards de galaxies dans l'Univers observable. Alors est arrivée la surprise, cette découverte inattendue, très récente, des vraies résonances sonores des étoiles. Ce ne sont pas les planètes, qui font de la musique, mais bien les étoiles<sup>2</sup> !

## Héliosismologie

Le 16 octobre 1961, la revue américaine d'astronomie « *Astrophysical Journal* » reçoit une proposition d'article de la part de trois astrophysiciens du « *California Institute of Technology* », situé à Pasadena, près de Los Angeles. Les auteurs, Robert Leighton, Robert Noyes et George Simon, ont découvert dans l'atmosphère du Soleil des mouvements très réguliers, avec une période d'environ cinq minutes, ce qui correspond à une fréquence de l'ordre de trois millièmes d'hertz. Ces mouvements se superposent à tous ceux qui se produisent dans les régions externes du Soleil, comme la granulation, les protubérances, etc. Ils s'en distinguent parfaitement grâce à leur régularité et leur faible période comparée aux autres. Ils n'avaient pas été détectés jusque-là en raison de leur faible amplitude et du fait que les instruments appropriés n'existaient pas encore.

La méthode utilisée est reliée à l'effet Doppler-Fizeau. Il s'agit d'une utilisation précise de la spectroscopie optique. Le rayonnement solaire, du rouge au violet, contient un nombre immense de raies spectrales dues à l'absorption du rayonnement, à des longueurs d'onde bien précises, par les atomes qui se trouvent dans l'atmosphère du Soleil. Si cette atmosphère est soumise à des mouvements réguliers qui font osciller la matière autour d'une position d'équilibre, les longueurs d'onde des rayonnements que nous recevons reflètent directement ces oscillations. Elles sont raccourcies, donc plus bleues, si la matière se rapproche, allongées, donc plus rouges, si elle s'éloigne. Les astrophysiciens ont mis au point des instruments qui peuvent mesurer très précisément les variations des longueurs d'onde reçues et mettre en évidence leurs oscillations.

Une dizaine d'années après la découverte des oscillations de l'atmosphère solaire, trois chercheurs américains en donnent l'explication de manière indépendante. Ce sont Roger Ulrich, en 1970, John

Leibacher et Bob Stein, en 1971. La grosse sphère gazeuse est soumise à des ondes acoustiques internes, c'est-à-dire des ondes sonores, comme les caisses de résonance de nos instruments de musique, sauf que le Soleil n'a pas de paroi. C'est une « sphère autogravitante », c'est-à-dire que la matière y est retenue par l'effet de son propre poids. Sa densité décroît très vite vers l'extérieur, jusqu'à devenir trop faible pour que les ondes sonores puissent continuer à se propager. Elles restent donc piégées à l'intérieur. L'atmosphère, qui joue le rôle de paroi virtuelle, subit des variations régulières de pression que les astronomes peuvent détecter en utilisant les techniques appropriées.

La découverte des vibrations solaires fut une réelle surprise pour les astrophysiciens, qui ne l'avaient pas du tout anticipée, car le Soleil ne faisait pas partie des classes d'étoiles dites « variables ». À présent l'analyse détaillée de ses vibrations permet de connaître sa structure interne avec une précision de l'ordre de 0,1 %. Cette étude a pris le nom d'héliosismologie. On sait maintenant que toutes les étoiles semblables au Soleil sont elles aussi des caisses de résonance, chacune avec une signature sonore qui lui est propre.

## Astérosismologie

D'une manière générale, on appelle « étoiles variables » toutes les étoiles dont l'éclat dans le ciel varie au cours du temps. Certaines sont le siège d'explosions, comme les variables cataclysmiques, les novae, ou les supernovae. D'autres sont des variables périodiques, parfois appelées « étoiles pulsantes ». C'est le cas, par exemple, des « céphéides » et des « RR Lyrae ».

Ces étoiles ont des pulsations de grande amplitude, comme des ballons de football qui se gonflent et se dégonflent – ce sont alors des oscillations radiales – ou des ballons de rugby qui s'aplatissent en ressemblant à des soucoupes volantes, pour ensuite reprendre leur forme initiale – dans ce cas, ce sont des oscillations non radiales. Les variations de lumière correspondantes sont si grandes qu'elles peuvent être facilement détectées avec de petits instruments d'observation.

C'est en étudiant ces étoiles variables, dans l'équipe du professeur Pickering à Harvard, à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, que l'astronome Henrietta Leavitt découvrit la relation période-luminosité des céphéides. Plus l'étoile est intrinsèquement brillante, plus ses oscillations sont lentes. Cette relation a permis ensuite de déterminer des distances d'étoiles et de galaxies dans l'Univers et de montrer que le Soleil n'est pas le centre de notre propre Galaxie.

---

<sup>2</sup> Il est possible que les planètes, en particulier Jupiter, présentent des vibrations sonores, mais cela n'est pas encore certain.

Seules quelques étoiles présentent ce type de vibrations périodiques de grande amplitude. Elles sont dues à des ondes sonores excitées par un phénomène particulier, appelé « mécanisme kappa ». Cela correspond à une capacité plus ou moins grande de la matière de capter l'énergie lumineuse. Il existe certaines régions, à l'intérieur des étoiles, où la matière retient mieux l'énergie lumineuse lorsqu'elle est comprimée, et d'autres où c'est l'inverse. La raison de cette différence est complexe, liée aux conditions de température, densité, pression et composition chimique. Dans le premier cas les ondes sonores sont amplifiées parce qu'elles récupèrent de l'énergie à la compression, alors que dans le second cas elles sont amorties.

Dans les étoiles variables de grande amplitude, comme les céphéides, les ondes sonores sont amplifiées. Le Soleil ne se trouve pas dans ce cas, heureusement pour nous. Pourrions-nous imaginer un Soleil pulsant, qui pourrait devenir deux fois plus brillant en une dizaine de jours ? Dans ces conditions, la vie n'aurait jamais pu se développer sur Terre.

Nous voici de retour à la surprise du 16 octobre 1961. Des oscillations périodiques de la surface solaire ? Comment est-ce possible ? Tous les calculs montrent que, dans une étoile comme le Soleil, les ondes sonores ne peuvent pas être entretenues. Elles sont toujours amorties.

Alors on se souvient que les régions extérieures du Soleil sont convectives. En raison des conditions de température qui y règnent, le gaz qui constitue la matière solaire fait des bulles qui montent exploser à la surface, puis cette matière retombe vers les profondeurs. Cette zone convective, qui s'étend sur un tiers du rayon solaire environ, est souvent comparée à de l'eau qui bout, même si la situation n'est pas la même puisque le Soleil est gazeux. Mais il s'agit dans les deux cas de convection, et la convection fait du bruit. Lorsque l'eau bout dans une casserole, les mouvements de matière produisent des ondes sonores qui se dissipent rapidement dans l'air ambiant, mais qui sont toujours renouvelées tant que l'eau continue à bouillir.

Le Soleil n'est donc pas une étoile variable au sens des céphéides, car sa structure interne ne permet pas d'amplifier les ondes sonores. Cependant la convection qui mélange en permanence ses régions externes produit sans arrêt de nouvelles ondes, toujours amorties mais toujours reformées. Ces ondes se propagent à l'intérieur de la grosse sphère et la font vibrer doucement, selon ses possibilités de résonance interne, avec une amplitude beaucoup plus faible que celle des céphéides, et aussi une période beaucoup plus faible. En effet, le Soleil

vibre dans des harmoniques élevées, les seules qui peuvent être excitées par la zone convective. Les variations de lumière qui en résultent sont nettement plus faibles que 0,1 pour cent, ce qui n'est pas sensible pour nous, ni pour nos yeux ni pour la chaleur reçue. Il fallait des instruments très précis, spécialement adaptés pour mesurer les vitesses superficielles de l'atmosphère solaire pour pouvoir détecter ces vibrations.

Beaucoup plus récemment, d'autres instruments ont permis de découvrir les fréquences de résonance d'étoiles semblables au Soleil. Chacune d'elles a une signature sonore qui lui est propre. L'étude détaillée des résonances acoustiques des étoiles apporte aux astronomes des informations précieuses sur leur structure et leur évolution. Une nouvelle science est née, l'astérosismologie.

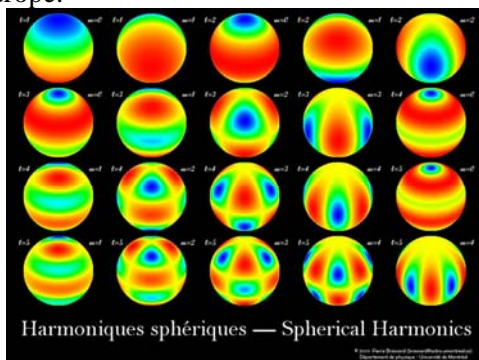
La première détection de la résonance acoustique d'une étoile semblable au Soleil date de 1999. Elle est due à une équipe française d'une dizaine de personnes, qui ont observé Procyon, l'étoile la plus brillante de la constellation du « Petit Chien », depuis l'Observatoire de Haute-Provence. Peu de temps après, en 2001, ont été dévoilées, grâce à des observations faites au Chili, les harmoniques de l'étoile alpha Centauri A.



*Fig.3. Amas ouvert NGC 290 observé avec le HST. Crédit: ESA & NASA. De très nombreuses étoiles présentent des oscillations acoustiques, observées avec les mêmes instruments que ceux utilisés pour la détection d'exoplanètes.*

Les découvertes n'ont cessé de se succéder depuis cette date. Elles ont été obtenues grâce à deux méthodes principales, les mêmes que celles utilisées dans le but de détecter des exoplanètes. La première méthode est celle de spectrographie, encore appelée « méthode des vitesses radiales » semblable à celle que j'ai déjà décrite pour le Soleil. Des spectrographes de haute précision ont été construits dans ce but, en particulier au Chili (HARPS, qui signifie « High Accuracy Radial velocity Planetary Search project »), ou à l'Observatoire de Haute-Provence (SOPHIE). La deuxième méthode est photométrique, c'est-à-dire qu'on étudie les

variations de lumière de l'étoile. Cette méthode est essentiellement utilisée depuis l'espace, grâce à des télescopes spatiaux spécialement construits dans ce but (COROT, lancé en décembre 2006, qui a cessé de fonctionner après avoir apporté de nombreux résultats, et *Kepler*, télescope américain lancé en mars 2009, qui fonctionne encore actuellement). D'autres instruments spatiaux sont en cours d'étude, dont les projets TESS, aux États Unis, et PLATO, en Europe.



**Fig.4.** Exemples d'harmoniques sphériques. Crédit : Pierre Brassard, Université de Montréal. Les résonances acoustiques internes des étoiles produisent des variations périodiques de lumière que les astronomes réussissent à observer. Ils analysent le signal qui peut être décomposé en nombreuses harmoniques sphériques.

D'une manière générale, toutes les étoiles semblables au Soleil qui ont pu être observées avec une grande précision sont le siège de vibrations acoustiques. Les grosses étoiles ont des fréquences plus graves que les petites étoiles et l'amplitude de leurs vibrations est plus importante. L'astérosismologie permet à présent de déterminer les paramètres stellaires avec une précision beaucoup plus grande que par les méthodes traditionnelles. Elle est en particulier beaucoup utilisée pour caractériser les étoiles centrales de systèmes planétaires, ce qui permet par conséquent une meilleure détermination des caractéristiques des planètes détectées.

## La musique des étoiles

Dans l'Antiquité, les notes de musique attribuées aux planètes correspondaient non pas à la résonance naturelle d'une sphère, mais aux harmoniques d'une corde vibrante. Tout cela était symbolique. À présent, ce que nous observons, c'est la vraie musique des sphères.

Mais peut-on vraiment dire que les étoiles font de la musique ? Non, évidemment. Les étoiles ne font pas plus de musique que le violon ou la guitare. C'est le musicien qui utilise les instruments comme outils de création et de représentation musicale. Les étoiles ne font pas de musique, mais elles peuvent être

utilisées comme des instruments de musique, seules ou parmi d'autres instruments.

Les sons des étoiles, qu'il nous est impossible d'entendre directement, doivent être transposés d'au moins 18 octaves pour devenir accessibles à nos oreilles. Comme il s'agit d'harmoniques sphériques, les notes « jouées » par les étoiles ne correspondent pas aux notes de notre gamme occidentale. Le résultat en est d'autant plus intéressant.

Dans notre échelle contemporaine, où le « la » du diapason correspond à 440 hertz, le Soleil résonne approximativement en sol dièse, ce qui est plutôt amusant. De très nombreuses harmoniques sont aussi excitées, qui lui donnent un timbre bien particulier, différent de celui de tous les autres instruments connus. Il en va de même pour les étoiles. Chacune présente une fréquence maximale, la « note » de base, et un timbre associé, tous différents les uns des autres. Nous sommes loin de la musique des sphères de l'Antiquité, fondée sur l'arithmétique et les divisions d'une corde vibrante. Nous devons sauter dans le siècle actuel, où la musique rejoint l'astronomie et l'étude du cosmos d'une manière totalement nouvelle.

J'ai fourni dans ce but au musicien compositeur Claude Samuel Lévine un ensemble de douze étoiles dont les fréquences sonores sont bien connues, y compris le Soleil. Les sons bruts de ces étoiles peuvent être écoutés, avec une transposition de 18 octaves, et il a composé une oeuvre musicale très intéressante et originale à partir de ces étoiles. Place à la musique céleste !



**Fig.5.** Claude-Samuel Lévine et Sylvie Vauclair jouant un duo de thérémines pour symboliser les étoiles alpha Centauri A et B. Le fond d'écran est celui du synthétiseur de sons permettant la création musicale à partir des fréquences observées des étoiles. Le thérémine est un instrument électronique émettant des ondes électromagnétiques qui peuvent être modulées par les positions des mains dans l'air ambiant, et transformées en ondes sonores grâce à une « sono » classique.

Pour en savoir plus et écouter la musique :  
Sylvie Vauclair, Claude-Samuel Lévine, La Nouvelle  
Musique des Sphères, Odile Jacob 2013  
[www.sylvievaclair.fr](http://www.sylvievaclair.fr)  
[www.cslevine.com/etoiles](http://www.cslevine.com/etoiles)