

Histoire de la résonance et stabilité de systèmes résonants: des planètes à l'atome

ALI MOUHOUCHE¹, ABDELKRIM EL-HAJJAMI²

¹Laboratoire de Didactique des Sciences
École Normale Supérieure de Kouba, Alger
Algérie
amouhouche@yahoo.fr

²Laboratoire de Didactique et des TIC
École Normale Supérieure de Fès
Maroc
alhajjami@yahoo.com

RÉSUMÉ

De la préhistoire jusqu'aux temps modernes, nous retraçons dans cet article le long chemin historique de la résonance en physique des ondes en montrant comment d'un simple effet sonore découvert dans les grottes par l'homme préhistorique, elle est arrivée à des réalisations et utilisations dans presque toutes les branches de la physique (mécanique, électricité, optique, physique de la matière...). L'intérêt des anciens pour la résonance a mené à de grandes découvertes sur la stabilité des planètes en astronomie (Newton, Laplace...) puis, sur la cohésion de la matière en mécanique ondulatoire et en physique moderne (De Broglie, Schrödinger...). Ce travail sur l'histoire des sciences est aussi un apport à la culture scientifique, à l'épistémologie et la didactique. Il servirait également à la conception de curricula.

MOTS-CLÉS

Histoire, résonance, vibration, ondes, accord

ABSTRACT

From prehistory to modern times, we track in this article along historic path of the resonance wave physics, showing how a simple sound effect discovered in the caves by prehistoric man, she arrived to achievement and uses in almost all branches of physics (mechanics, electricity, optics, physics of matter...). The interest of the ancient for resonance led to major discoveries about the stability of the planets (Newton, Laplace...) and the cohesion of the mechanical wave and in modern physics (De Broglie, Schrödinger...). This work on the history of science is also a contribution to scientific culture, epistemology and didactics. It would also serve to design curricula.

KEYWORDS

History, resonance, vibration, waves, cord

INTRODUCTION

De la préhistoire jusqu'aux temps modernes, nous retraçons dans cet article le long chemin historique de la résonance en physique des ondes. Nous montrons comment, avec le concept de résonance comme fil conducteur, l'évolution des idées et des résultats a conduit à son utilisation dans presque toutes les branches de la physique (astronomie, acoustique, mécanique, optique, électricité, électromagnétisme, physique atomique, ...) jusqu'aux grands principes de la physique moderne. Un aspect important de cette investigation est l'influence des idées de Pythagore sur l'harmonie céleste, qui mena Laplace à travailler sur la résonance orbitale (des planètes), jusqu'à la résonance atomique et celle des particules avec comme point commun la stabilité de systèmes résonants.

Les éléments historiques et épistémologiques de cette recherche pourraient enrichir l'enseignement de la résonance et les curricula de physique.

DE LA PRÉHISTOIRE À L'ÉPOQUE ROMAINE

Le son et ses effets ont tout d'abord attiré l'attention de l'homme ancien utilisant seulement son ouïe. Des objets naturels et des instruments produisant, prolongeant ou amplifiant des sons datent de l'ère du Paléolithique. Grottes résonantes, cordes, peaux tendues, cornes, phalanges de renne sifflantes sont signalées comme existant depuis cent mille ans avant notre ère (Dauvois & Boutillon, 1994). Dauvois (1989) et Dauvois et Boutillon (1994) ont étudié les grottes et des échos produits du point de vue acoustique. Ils ont montré que les peintures rupestres sont situées dans les lieux bénéficiant de la meilleure résonance acoustique. Dans certaines grottes, la densité des images est proportionnelle à la qualité acoustique (résonance, échos) et il existe des marques anciennes presque à chaque point de forte résonance. Ils affirment que les hommes du paléolithique utilisaient les sons pour se guider dans les grottes, considérées par conséquent, jadis, comme instruments sonores.

Des indices attestant de l'existence d'instruments à corde avec caisse de résonance et manche datent d'environ 2500 ans avant J.-C. (Becker, 1982). Un instrument à vent, le lur (trompette danoise) a été retrouvé à l'époque de bronze (environ 2000-1100 av. J.-C.); la harpe est signalée entre 970 à 931 avant J.-C. Puis, chez les grecs et les romains, on trouve la lyre à caisse de résonance bombée, la cithare à caisse plate, l'aulos (sorte de chalumeau à anche).

De la découverte naturelle de la résonance, comme simple effet sonore, par l'homme préhistorique, aux exploitations technologiques des temps modernes, bien des péripéties ont jalonné l'histoire de ce phénomène.

CHEZ LES GRECS : PYTHAGORE, PLATON, HARMONIE CÉLESTE ET MARÉES

Pythagore, au V^e siècle av. J.-C., puis Aristoxène au IV^e siècle av. J.-C., observant une corde vibrante en modifiant sa longueur, caractérisèrent les sons musicaux par des rapports mathématiques. Pythagore en a déduit les intervalles musicaux et proposé sa gamme musicale utilisée jusqu'au XVI^e siècle. Voyant dans les nombres entiers le principe fondamental de l'Univers, il basa dessus sa cosmologie, et définit *l'harmonie céleste*, par analogie à l'harmonie rendue par les cordes de la lyre, comme une sorte de concert musical des astres en rotation

(Lindemann & Maeder, 2000). Les lois de l'harmonie sont donc aussi les lois de l'univers entier (Charon, 1980). Cette idée marqua les démarches cosmologiques ultérieures pendant plus de vingt siècles.

Le phénomène de résonance multiple était connu chez Aristote (384-322 av. J.-C.) qui se demandait par « *quelle raison les sons graves en renferment de plus aigus* » (Antoine, 1849, p. 192). On retrouve aussi, chez lui, le commentaire : « *Sont consonants deux sons tels que si l'on produit l'un sur un instrument à cordes, l'autre aussi résonne¹, en vertu d'une certaine affinité et sympathie²* ».

D'un autre côté, le philosophe grec Platon (~428-~348 av. J.-C.) prédit que les marées sont dues aux oscillations périodiques au sein de la Terre.

À PARTIR DU 16ÈME SIÈCLE

La résonance des bassins océaniques

Un long chemin mène les savants à travers l'histoire à lier le phénomène des marées, puis le mouvement des planètes, à la résonance (Lefebvre, 2000). La fin du XVIe et le début du XVIIe siècle voient un véritable commencement à l'explication de l'origine des marées avec Kepler (1571-1630) puis Descartes (1596-1659) qui l'imputaient à une force de la Lune. Le mathématicien anglais Wallis (1642-1727), ensuite, se basant sur la théorie de Galilée, explique les oscillations de la marée par le mouvement de la Terre autour du centre de gravité du système Terre-Lune.

Newton (1642-1727) propose en 1687 sa théorie de la gravitation et énonce que la Lune par sa proximité, et le Soleil par sa masse, sont les deux seuls astres perturbateurs engendrant les marées. Le mathématicien français Laplace (1749-1827) avance en 1775 dans sa théorie dynamique que la réponse des océans à l'excitation de la force génératrice prend la forme d'ondes qui se propagent sur toute la surface maritime.

Aux Etats-Unis, Harris (1863-1918) lie en 1897 la formation des marées à la résonance et introduit en compagnie de l'astronome anglais Hough (1870-1923) le phénomène de résonance des bassins océaniques. Hough détermine, suite à la théorie de Laplace, la nature et la période des oscillations libres des océans. Dans ce phénomène l'apport d'énergie est dissipé par les frottements des masses d'eau sur le fond des océans.

Résonance orbitale, résonance de Laplace et stabilité des orbites

On sait que Newton (1643-1727) a essayé de donner des explications à la permanence du système planétaire. Depuis la publication de ses lois, le problème de stabilité des orbites a préoccupé les mathématiciens, y compris Laplace. Dans son étude de la mécanique céleste il introduit la *résonance orbitale* dans le domaine de l'astronomie et explique cette stabilité en mettant en évidence les phénomènes de résonance dans le système solaire (Merleau-Ponty, 1983). Une résonance orbitale, ou résonance gravitationnelle, a lieu « *lorsque deux objets orbitant autour d'un troisième ont des périodes de révolution dont le rapport est une fraction entière simple* »³ (Seguin

¹ Ce verbe signifie clairement ici : émet un son. C'est le sens premier du verbe *résonner* dans l'histoire.

² *Affinité* et *sympathie* expriment déjà un lien entre exciteur et excité donc l'idée d'*accord* ou d'*excitation* à la fréquence propre.

³ Ainsi on dira que Pluton et Neptune sont en résonance 3 :2 pour exprimer que leurs périodes de rotation sont dans ce rapport.

& Villeneuve, 2002, p. 469). Cette condition rappelle l'harmonie des sons émis par les cordes et a donc des racines pythagoricienne. La résonance est ainsi entrée dans le domaine astronomique durant le premier quart du XIXe siècle. Notons que lorsque plusieurs objets ont des périodes orbitales dans un rapport avec des entiers simples, on parle de résonance de Laplace⁴.

Cordes vibrantes et tuyaux sonores

C'est au XVIIe siècle que des savants ont recommencé à s'intéresser à la consonance des sons produits par les cordes (Charrak, 2001). Une corde étant frappée, des harmoniques naissent dans des cordes voisines non frappées elles-mêmes. Plusieurs savants refont des expériences parfois similaires. Galilée (1564-1642), dans les Discorsi, étudie les cordes vibrantes et présente l'expérience de l'influence d'une corde sur une autre (Bailhache, 1993). Il lie la consonance d'un couple de notes aux percussions simultanées commensurables en nombre sur le tympan. Descartes (1596-1650), lui, explique dans son Compendium Musicae, écrit en 1618 et qui a eu une grande importance dans l'histoire de la théorie musicale, la mise en vibration de cordes, ayant des sons harmoniques, par la fondamentale. Il écrit: "(...) de deux termes qu'on suppose être en consonance le plus grave est de beaucoup le plus puissant et contient l'autre en quelque façon. On le voit sur les cordes d'un luth: si l'une d'elles est touchée, celles qui sont plus aiguës d'une octave ou d'une quinte tremblent et résonnent spontanément" (In Charrak, 2001, p. 26). On remarque que le verbe résonner, ici, complète et explique le verbe trembler. Donc il prend le sens de produire un son, retentir, *re-sonner*, c'est ce que désignait la résonance à ce moment.

Cette communication du mouvement par l'air et les supports de la corde, ou, comme on le disait alors, cette communication des sons *par sympathie*, connue depuis presque deux millénaires a fait l'objet d'analyse expérimentale avec soin par Mersenne (1588 - 1648) qui avait trouvé que les sons les plus aptes à exciter les vibrations d'une corde forment les divers harmoniques du ton fondamental. Il travailla sur les cordes, les cloches et les tuyaux sonores. En 1673 Noble et Pigot font l'expérience de résonances multiples par ondes stationnaires (Antoine, 1849).

Sauveur (1653-1716), en 1700, travailla aussi sur la résonance du corps sonore. En 1753, Daniel Bernoulli s'efforça de faire le lien avec les lois des cordes vibrantes proposées par D'Alembert et Euler à partir de 1747. Jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, les mathématiciens de l'époque contribuèrent à l'élaboration d'une physique de la vibration en travaillant sur les phénomènes décrits par Sauveur (Charrak, 2001). Jusqu'à la fin du XVIIe siècle, la résonance (par sympathie) désigne l'excitation, par une corde sonore, de cordes non frappées. La résonance du corps sonore désigne quand à elle, dans les textes du XVIIIe siècle, l'émission de consonances naturelles, série de sons plus faibles et plus aigus (les harmoniques), par la corde entière (le fondamental). Les écrits de cette époque montrent que la science acoustique intégrait aussi bien l'étude du son et de sa propagation que l'étude de la musique, des gammes musicales et des lois de consonance (l'harmonie). C'est cette dernière étude qui constitue la liaison entre les deux théories : la physique et la musique.

Du résonateur de Helmholtz aux ondes radio

Vers le milieu du XIXe siècle la résonance entre dans l'explication d'événements tels que la chute du pont suspendu d'Angers (1850) sous l'effet d'une tempête et des pas cadencés d'un bataillon de soldats qui passaient dessus.

⁴ C'est le cas, par exemple, des lunes de Jupiter : Ganymède, Europe et Io, qui sont dans une résonance 1:2:4.

Helmholtz (1821-1894), physiologiste et physicien, élucide vers 1860 l'audition par résonance de l'oreille et fait ainsi progresser la compréhension de la perception du son musical (Giancoli, 2004). Ce succès le pousse à fabriquer ensuite un dispositif portant son nom, le résonateur d'Helmholtz, permettant de décomposer un son complexe en ses harmoniques. L'analyseur est constitué de plusieurs sphères de différentes dimensions à deux ouvertures. L'existence de fréquence particulière, dans le son émis devant l'une des ouvertures d'une sphère, la fait résonner (ce verbe avait à ce moment encore le sens d'émettre un son).

C'est en cette époque que les notions d'excitateur, de résonateur et de fréquence propre apparaissent dans les explications des phénomènes vibratoires. Mais, jusqu'en 1877, Helmholtz n'utilisait pas encore le terme résonance pour désigner le phénomène. Il utilisait l'expression phénomène de communication des vibrations en parlant des cordes d'un piano (Helmholtz, 1877, p. 181). Il explique la mise en résonance du résonateur par l'apport d'énergie à chaque oscillation comme dans la mise en oscillation d'une cloche d'un poids énorme par un enfant. Il note: *“ce qui se passe ... dans notre oreille ressemble peut-être beaucoup à ce que nous venons de voir dans le piano”* (Helmholtz, 1877, p. 184)

Puis viennent les travaux de Hertz (1857-1894) et de Tesla (1856-1943). Hertz, élève de Helmholtz, crée en 1887 un résonateur d'ondes électromagnétiques faisant passer l'énergie d'un circuit à un autre sans l'aide d'un fil conducteur. Le premier à réaliser des oscillations aussi rapides avec son excitateur (Chappuis & Lamotte, 1911) et un résonateur (modèles primitifs d'un émetteur et d'un récepteur radio actuels) il vérifie la théorie de Maxwell et mesure notamment la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques. C'est à partir de ces expériences que la lumière est identifiée comme une onde électromagnétique d'une certaine gamme de fréquence (Alonso et Finn, 1986). Tesla applique la résonance, qui l'intéressa beaucoup, au courant alternatif et à divers objets mécaniques (oscillations diverses, radio, téléguidage...).

LE 20ÈME SIÈCLE : RÉSONANCE, MATIÈRE ET SPECTROSCOPIE

Au début du XXe siècle, les lois de la physique quantique et de la mécanique relativiste ont marqué une véritable rupture dans la manière d'appréhender le monde physique. La résonance s'est introduite dans la matière et dans ses interactions avec les ondes électromagnétiques. La profonde analogie entre les particules de matière (atomes, molécules, noyaux, ...) et les oscillateurs fut démontrée, donnant à la résonance de larges applications en rapport avec les éléments microscopiques.

Le spectre de raies d'un gaz (vapeur de sodium par exemple) éclairé par de la lumière, témoigne d'une énergie soustraite du faisceau de lumière, par absorption résonante à certaines fréquences.

En physique nucléaire, l'analogie entre le noyau et les oscillateurs permet la détermination de structures nucléaires. Le spectre du rayonnement gamma d'un noyau bombardé par des protons d'énergie variable témoigne par ses pics d'une absorption résonante. Ces phénomènes s'expliquent en associant une onde aux particules (Dion, 1974). Cette idée de dualité onde-particule est émise par Louis De Broglie (1872-1987) en 1923. Elle confère des propriétés ondulatoires aux particules. Ce savant assimile l'orbite électronique dans l'atome à une onde stationnaire circulaire fermée sur elle-même tel un mode résonant d'une corde vibrante. Ce qui assure la stabilité. Cette condition donne les orbites et les niveaux d'énergie discrets quantifiés de l'atome. La dualité onde-particule et la résonance sont à la base de la structure de l'atome (Giancoli, 2004).

Heisenberg utilise le mot résonance pour la première fois en mécanique quantique en 1926 dans ses travaux sur les systèmes d'oscillateurs couplés (Encyclopedia Universalis, 1974). Pauling, dans ses recherches sur la nature de la liaison chimique, vers 1930, introduit la résonance en chimie. Une molécule résonne entre diverses formes limites (cas du benzène par exemple) qui ont le rôle d'oscillateurs indépendants primitifs. L'espèce chimique unique s'appelle mésomère. Ce phénomène participe à la stabilisation de la molécule.

Dans l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière le phénomène de résonance est prépondérant. Sous l'effet de la force électrique agissant sur l'électron celui-ci se comporte comme un dipôle électrique effectuant des oscillations forcées et absorbe de l'énergie par résonance quand la fréquence ω de l'onde est égale à sa fréquence propre. Un traitement quantique plus détaillé révèle que cette fréquence est l'une quelconque des fréquences $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$, du spectre d'émission de l'atome (ou de la molécule) auquel l'électron est lié (Alonso & Finn, 1986). Les atomes libres se comportent comme des oscillateurs ayant plusieurs fréquences de résonance et des facteurs de qualité excessivement élevés (Dion, 1974).

Parmi les applications des interactions ondes-matière résonantes nous pouvons citer: la résonance des plasmons de surface, les micro-ondes et certaines techniques d'instrumentation.

STABILITÉ ET COHÉSION DE SYSTÈMES RÉSONANTS

La doctrine de l'harmonie de Kepler inspirée elle-même de l'harmonie céleste de Pythagore conférant la cohésion à la matière se répercuta sur l'élaboration de la mécanique ondulatoire de De Broglie et Schrödinger au milieu des années 1920. Parmi les prédécesseurs de Schrödinger, Kepler est le seul à avoir pressenti que l'harmonie - la résonance - confère à la matière sa cohésion. On peut en effet considérer que le résultat le plus important de la mécanique ondulatoire de Schrödinger est d'avoir permis d'établir que ce sont des conditions de résonance qui procurent la cohésion aux atomes et aux molécules (Klein, 2004). Ces préoccupations ne sont pas pour autant délaissées actuellement par la littérature et par la recherche scientifique. Murray et Dermott (1999), et plus récemment Sidorenko (2006), entre autres, reviennent sur *les résonances gravitationnelles dans le système solaire*. Ils expliquent la stabilité d'astéroïdes de Jupiter, et le mécanisme de maintien de leur régularité par le phénomène de résonance qui assure la grande pérennité de leur mouvement, mais aussi celui d'autres satellites en résonance gravitationnelle.

La stabilité et la cohésion en situation de résonance apparaît comme une caractéristique importante : nous la retrouvons dans la résonance orbitale en astronomie (Laplace), dans les modes résonants de l'électron dans un atome (De Broglie), dans les atomes et les molécules (Schrödinger) et dans les mésomères (Pauling) en chimie. Prigogine (1996), prix Nobel de chimie, écrit "*Il est difficile de citer un problème important en physique quantique où les résonances ne joueraient pas un rôle*" (p. 17).

Ces conclusions, auxquelles aboutit le présent travail, nous confortent dans les propositions d'ordre didactique de la section suivante.

REGARD DIDACTIQUE

Dans une étude sur la transposition didactique dans cinq manuels de physique du premier cycle universitaire (trois manuels français et deux manuels algériens), Mouhouche, El-Hajjami et

Himrane (2012) ont observé que la résonance est très souvent introduite comme cas particulier de couplage forcé en courant alternatif et dans les vibrations mécaniques. La notion de stabilité de systèmes résonants ainsi que l'existence d'une résonance orbitale ne figurent pas dans les cours. On ne trouve pas également d'activités d'apprentissage de la résonance portant sur la dimension microscopique. L'introduction d'éléments historiques et la description de régularités, dues à la résonance, existant dans les diverses dimensions de la nature, nous semblent être d'un apport scientifique et épistémologique important dans les programmes d'enseignement de la physique à l'université. La résonance serait confortée dans son statut de concept explicatif d'une classe de situations relatives à une réalité physique plus vaste et plus variée. Parallèlement la culture scientifique en serait promue. C'est ainsi que l'on peut augmenter la chance, pour les étudiants, d'accéder à de futures carrières scientifiques. Raynal et Rieunier, (1997) expriment cette préoccupation en affirmant que la didactique des disciplines devrait prendre des précautions "pour que le savoir appris n'obère pas la possibilité de passer ultérieurement au savoir savant" (p. 110).

L'ajout que nous proposons dans le cursus de formation en physique est une prescription pour laquelle il faudra ensuite convaincre la noosphère pour son admission dans le programme d'enseignement effectif. Un travail didactique sur la place et l'importance, par rapport au programme existant actuellement, à donner aux notions à introduire, sur le niveau de formulation du concept de résonance et sur la conception de situations d'apprentissage adéquates devrait être préalablement réalisé pour tenir compte de cette proposition. Cela fera l'objet de nos futurs travaux.

RÉFÉRENCES

- Alonso, M., & Finn, E. J. (1986). *Physique générale, Tome 1 et 2*. Paris: Inter Éditions.
- Antoine, M. J. (1849). *Résonnance multiple et phénomènes optiques produits par les corps vibrants*. Annales de chimie et de physique, Troisième série, tome vingt-septième. Paris: Victor Masson Retrieved from <http://books.google.dz/books?id=Eg8AAAAAMAAJ&hl=fr>.
- Bailhache, P. (1993). Cordes vibrantes et consonances chez Beeckman, Mersenne et Galilée. *Sciences et Techniques en Perspective*, 23, 73-91.
- Becker, L. (1982). *La Viole de gambe*. Paris: Dessain & Tolra.
- Chappuis, J., & Lamotte, M. (1911). *Leçons de physique générale (tome IV)*. Paris: Gauthier-Villars.
- Charon, J. E. (1980). *Vingt-cinq siècles de cosmologie*. Paris: Stock.
- Charrak, A. (2001). *Raison et perception. Fonder l'harmonie au XVIIIe siècle*. Paris: Vrin.
- Dauvois, M. (1989). Son et musique paléolithiques. *Les Dossiers d'Archéologie*, 142, 2-11.
- Dauvois, M., & Boutillon, X. (1994). Caractérisation acoustique des grottes ornées paléolithiques et de leurs lithophones naturels. In C. Homo-Lechner et al. (Edit.), *IVe Rencontres internationales d'archéologie musicale de l'ICTM*, (pp. 209-251). Paris: La maison des sciences de l'homme.
- Dion, J.-L. (1974). *Ondes et Vibrations*. Montréal: Centre Educatif et Culturel.
- Encyclopedia Universalis (1974). *Volume 14*. France : S.A..

- Giancoli, D. C. (2004). *Physique générale 3 (Ondes, optique et physique moderne)*. Bruxelles: De Boeck Université.
- Helmholtz, H. (1877). *Causes physiologiques de l'harmonie musicale*. Paris: G. Baillière. Retrieved from <http://gallica2.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k357717.r=Probl%C3%A8me+musicaux+d%27Aristote.langFR#>.
- Klein, E. (2004). La physique et l'idée d'harmonie. In *Actes de l'École d'été « Physique et Art »*, Lille (pp. 1-16). Retrieved from <http://e2phy.in2p3.fr/2004/actes/Klein.pdf>.
- Lefebvre, F. (2000). *Modélisation des marées océaniques à l'échelle globale: assimilation de données in situ et altimétriques*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France.
- Lindemann, E., & Maeder, A. (2000). *Mécanique, une introduction par l'histoire de l'astronomie*. Bruxelles: De Boeck Université.
- Merleau-Ponty, J. (1983). *La science de l'univers à l'âge du positivisme, étude sur les origines de la cosmologie contemporaine*. Paris: Vrin.
- Mouhouche, A., El-Hajjami, A., & Himrane, F. (2012). Enseignement de la résonance et obstacles didactiques. *Skholé*, 17, 65-70.
- Murray, C. D., & Dermott, S. F. (1999). *Solar System Dynamics*. Cambridge: University Press.
- Prigogine, I. (1996). La quête de la certitude. In M. Weyembergh & G. Hottois (Edit.), *Temps cosmique, histoire humaine* (pp. 9-21). Paris: Vrin.
- Raynal, F., & Rieunier, A. (1997). *Pédagogie : dictionnaire des concepts clés*. Paris: ESF.
- Seguin, M., & Villeneuve, B. (2002). *Astronomie et Astrophysique: cinq grandes idées pour explorer et comprendre l'univers*. Bruxelles: De Boeck Université.
- Sidorenko, V. V. (2006). Evolution of Asteroid Orbits at the 3:1 Their Mean Motion Resonance with Jupiter (Planar Problem). *Cosmic Research*, 44(5), 440-455.