

Une petite histoire de l'analyse harmonique de la parole

Bernard Teston

▶ **To cite this version:**

Bernard Teston. Une petite histoire de l'analyse harmonique de la parole. Journées d'Etude sur la Parole, May 2010, Mons, Belgique. pp.285-288. hal-00541982

HAL Id: hal-00541982
https://hal.science/hal-00541982

Submitted on 1 Dec 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Une petite histoire de l'analyse harmonique de la parole

Bernard Teston

Laboratoire Parole et Langage, UMR 6057, Aix-Marseille Université

ABSTRACT

Since the beginning of the harmonic analysis theory by Joseph Fourier in 1822, until his universal practices with the technics of digital signal processing in the seventies, many machines and methods have been proposed to make acoustical analysis of the speech signals. Mechanical, optical, electronical and acoustical devices have been realised successfully with a remarquable creative imagination and considerable efforts from speech scientist to make progress the knowledge of the secrets of the physical nature of the speech

I. INTRODUCTION

Dans le courant du 18ème siècle, les grammairiens étudient l'évolution historique des langues isolément sur des textes et les lettres de leurs alphabets. Plus rares, sont ceux qui s'intéressent aux sons qu'elles représentent c'est-à-dire, à la parole et à ce qui est dit plutôt qu'écrit. Ce sont pour l'essentiel des éducateurs de sourds-muets, partisans de l'oralité et des dialectologues phonéticiens. Cela oblige à appliquer des méthodes nouvelles empruntées à la physiologie (étude des articulations) et à la physique (acoustique des sons). Les savants de l'époque des lumières ne peuvent cependant que constater que les sons, sont des phénomènes physiques si fugaces que la connaissance de leurs structures et de leurs mécanismes créateurs ne pourra se développer qu'à la condition d'inventer des techniques nouvelles pour les capturer les analyser et les restituer. La fin du 18ème siècle connaît le développement d'outils mathématiques, dont certains vont permettre de modéliser des phénomènes acoustiques, ainsi qu'un engouement particulier pour les automates parlants. Il va se maintenir durant tout le 19ème siècle et ces synthétiseurs de voix et de parole, vont tester les modèles de production des segments phonétiques. De nombreux savants vont travailler alors sur la représentation graphique de la parole, pour la rendre visible, l'enregistrer, afin de pouvoir l'étudier dans le détail, l'analyser et même la reproduire.

Analyser un son ou plus généralement un signal, c'est étudier sa structure, c'est-à-dire l'amplitude et l'organisation de ses différents constituants. On peut voir l'acte fondateur de l'analyse harmonique dans les travaux de Daniel Bernouilli qui en 1753, a l'idée d'exprimer la solution du problème des cordes vibrantes au moyen de séries trigonométriques. Compte-tenu de la complexité structurelle et temporelle de la parole qui en fait un objet si particulier, son analyse harmonique représente un des aspects les plus fascinants de l'instrumentation de mesure avec notamment la notion de spectre évolutif. C'est cette histoire que nous nous proposons d'exposer.

II. L'ANALYSE HARMONIQUE

Au tout début du 19ème siècle, Joseph Fourier étudie la propagation de la chaleur dans les corps solides. Il la modélise au moyen d'une équation aux dérivés partielles parabolique, fonction unique mais difficile à manier mathématiquement. Il a alors l'idée originale pour l'époque, d'exprimer certaines fonctions périodiques sous la forme de séries trigonométriques infinies. Dans un but de simplification, il remplace son équation aux dérivées partielles par une série de fonctions trigonométriques, sinus et cosinus beaucoup plus maniable et dont la somme reconstitue la fonction initiale.

La proposition mathématique des séries de Fourier tient en deux formules :

- D'une part, celle de l'analyse (1), qui consiste à déterminer la suite des coefficients de Fourier *Cn* de la fonction périodique *f(x)*.

$$c_n = \int f(x)\, c_n e^{-i\,n\,x} \frac{dx}{2\pi} \quad (1)$$

- D'autre part, celle de la synthèse (2) qui permet de retrouver la fonction périodique f(x) à partir de la suite de ses coefficients de Fourier Cn.

$$f(x) = \sum c_n e^{i\,n\,x} \quad (2)$$

Analyse et synthèse sont deux aspects complémentaires de la théorie des séries de Fourier qui établit une correspondance entre la fonction périodique et les coefficients de Fourier. Publiée en 1822, cette nouvelle façon de décrire les fonctions périodiques permet de leur appliquer des opérations bien plus simples, particulièrement la dérivation. C'est à partir de la théorie des séries de Fourier que s'est développé le domaine mathématique de l'analyse harmonique qui est devenue l'outil fondamental pour l'étude des fonctions périodiques.

Certes, avant Fourier, les séries trigonométriques étaient connues, et Daniel Bernoulli avait eu l'idée de les utiliser dans la solution du problème des cordes vibrantes mais uniquement pour l'analyse de son cas particulier. Fourier a été le premier à généraliser les séries trigonométriques comme outil s'appliquant à toutes les fonctions périodiques mais surtout à considérer l'analyse et la synthèse (1) et (2) comme un tout indissociable. Les mathématiciens contemporains ont souvent reproché à Fourier son manque de rigueur, mais son but a été de fournir des outils mathématiques utiles à l'explication des phénomènes naturels et pour cela, on peut le considérer comme le créateur des mathématiques appliquées.

En 1843, Georg Simon Ohm émet l'hypothèse que tout son est une fonction périodique du temps décrite « à la Fourier » par une somme de sons purs constituée par une fréquence fondamentale (qui correspond à la hauteur du son) et de ses multiples (les harmoniques).

Au milieu du 19ème siècle, l'analyse harmonique permet donc aux acousticiens de calculer des spectres de son. Comme généralement on n'en connaît pas la fonction mathématique, il faut en avoir des images fidèles et cela ne sera possible qu'à la suite de nombreuses évolutions des phonautographes [1]. L'analyse harmonique va cependant se révéler avec les travaux de Herman von Helmholtz, dans la controverse sur l'origine du timbre des voyelles qui va perdurer pendant plus d'un siècle. En 1830, Robert Willis énonce que le timbre est défini par une hauteur et un signal laryngien particuliers à chaque voyelles. C'est la théorie du « fixed pitch ». Charles Wheatstone l'approuve en 1837 en la complétant par une influence partielle de la cavité buccale sur le timbre des voyelles. C'est la théorie du « relative pitch ».

Franciscus Donders propose en 1858 une théorie totalement opposée aux précédentes. Pour lui, le timbre des voyelles est uniquement défini par la configuration anatomique du conduit vocal supra glottique, hypothèse qu'il formule à la suite d'expériences minutieuses sur la voix chuchotée.

A la même époque, Helmholtz, qui poursuit des recherches sur les mécanismes de l'audition, développe une théorie de la résonance acoustique des cavités. Il propose un modèle de résonateur sphérique dont on peut calculer les caractéristiques acoustiques, fréquence de résonnance et sélectivité (coefficient de surtension), en fonction des ses dimensions (diamètre et orifice) ; les résonateurs de Helmholtz. Ce dernier, adepte de la théorie d'Ohm et de l'analyse harmonique de Fourier, va confirmer en 1852 les hypothèses de Donders au moyen de sa théorie des résonateurs qu'il applique au conduit vocal. Il réalise l'analyse de Fourier en hurlant des voyelles près du sommier d'un piano et en appréciant tactilement les vibrations des cordes qui résonnent à la fondamentale et à certains de ses harmoniques avec des amplitudes variables. Il réalise également la synthèse des voyelles au moyen d'un banc de ses résonateurs, en les excitant avec un signal périodique piloté par un diapason. Il constate que les voyelles peuvent être différenciées à hauteur constante par une distribution particulière de trois harmoniques dans le spectre de fréquence. C'est la première mention du concept de formant. Il précise ainsi l'hypothèse de Donders sous la forme de la « théorie du timbre ». Ses résonateurs ainsi que son synthétiseur de voyelles sont construits et diffusés par Rudolf Koenig, un de ses anciens élèves facteur d'instruments d'acoustique à Paris. Dès lors, de nombreux travaux vont se succéder pour tenter de réaliser l'analyse harmonique des sons, sans connaître la forme de leur signal.

III. LES ANALYSEURS DE KÖNIG

En 1862, Koenig, inspiré par les flammes chantantes, a l'idée de mesurer l'amplitude de la pression acoustique dans des résonateurs au moyen de la flamme d'un bec alimenté en gaz de ville par l'intermédiaire d'une capsule manométrique dont la membrane au contact de l'air vibrant, module la pression du gaz.

Il réalise une batterie de huit résonateurs de Helmholtz équipés de capsules manométriques dont les mouvements des flammes sont ralentis grâce à des miroirs tournants, pour pouvoir être observés, car leurs images sont fugaces. Sans développer les détails des caractéristiques acoustiques d'un tel dispositif, il nous faut reconnaître en lui l'origine de tous les analyseurs « temps – fréquence » dont la structure va perdurer jusqu'au traitement numérique du signal. Les résonateurs sont des filtres passe bande, les capsules manométriques sont des détecteurs d'énergie et les miroirs tournants, une base de temps. Très vite, Koenig étend son analyseur à quatorze résonateurs cylindriques, dont les fréquences peuvent être ajustées La bande d'analyse de 100 à 1200 Hz est assez réduite. La sensibilité d'un tel appareil est médiocre, et il est nécessaire, pour la parole, de crier très fort et très près des orifices des résonateurs, pour observer quelque chose. Tel quel, il a été diffusé dans de nombreux laboratoires universitaires (où on peut encore en rencontrer quelques uns) et a été utilisé comme outil pédagogique jusqu'au milieu du 20ème siècle.

Koenig a imaginé ses capsules manométriques couplées à un résonateur (tuyau d'orgue ou de Helmholtz), dans lesquels la pression acoustique est relativement forte. En champs libre, elles fonctionnent très mal. En 1882, il parle dans une embouchure connectée à une capsule manométrique et constate que la forme des flammes est plus complexe que celles obtenues avec des résonateurs et qu'elles semblent donner une représentation en relation avec la structure acoustique des voyelles et qui permet de les différencier. Ainsi, dans la description de chaque période on peut distinguer de une à quatre flammes de différentes largeurs et amplitudes, dont le positionnement dans l'image du cycle périodique varie en fonction du timbre du son. René Marage, un élève d'Etienne-Jules Marey, réussit en 1895 à fixer l'image des flammes sur un film grâce à plus de lumière et à la caméra de son maitre Il peut étudier ainsi les phénomènes de distorsions acoustiques dans les tubes et les cornets utilisés comme aides auditives avec des résultats cohérents avec les connaissances actuelles. Il a également utilisé les flammes pour une étude du timbre des voyelles ainsi que Nichols et Merritt en 1898. Mais ces flammes ne correspondent qu'approximativement à la structure harmonique du spectre. Elles sont de surcroit difficiles à interpréter (un de ces derniers auteurs a même déclaré qu'il avait plus de difficultés à discerner des indices dans les flammes que les haruspices de l'antiquité dans les entrailles de poulets). De fait, les flammes manométriques sont peu précises et se prêtent mal au calcul. Elles ont été peu utilisées et ravalées bien vite au niveau des curiosités par l'analyse de Fourier à partir de la représentation graphique du signal de parole.

IV.L'ANALYSE HARMONIQUE GRAPHIQUE

Depuis Léon Scott de Martinville, qui obtient en 1858 les premières traces d'un signal de parole que l'on pouvait voir et conserver avec son phonautographe, de nombreuses tentatives se sont succédées pour en améliorer les performances [1]. Ce n'est que dans le dernier quart du 19ème siècle que la finesse et la précision des traces sont jugées suffisantes pour que l'on puisse calculer les coefficients de Fourier correspondants aux composantes harmoniques sur une période de signal. C'est Schneebeli qui en 1878 réalise les premiers calculs de spectres de Fourier sur des signaux de voyelles tracés par son phonautographe. Ces calculs sont laborieux et très longs. Compte-tenu de l'intérêt de la méthode, de nombreux efforts sont déployés pour simplifier les calculs tout en conservant une bonne précision. Ludimar Herman propose en 1898 une méthode graphique basée sur l'utilisation de feuilles millimétrées pré-imprimées et d'une table de calcul, qui permettent de diviser par dix (approximativement) le temps de calcul des 20 premiers harmoniques. Cette méthode est la favorite des phonéticiens des débuts du 20ème siècle, Rousselot et

Scripture en particulier, pour analyser les signaux de parole fournis par des phonautographes optiques ou des kymographes [1].

Devant la grande quantité de calculs longs et fastidieux, nécessaires à l'obtention d'un spectre de Fourier « à la main », de nombreux savants proposent des solutions pour les réaliser de manière semi-automatique au moyen de dispositifs mécaniques. William Thomson propose en 1878, le premier analyseur harmonique mécanique pour calculer les mouvements des marées, et les variations météorologiques de température et de pression. Il fonctionne très bien mais est très complexe, volumineux et très cher à construire. En 1894, Olaus Henrici imagine une méthode mécanique beaucoup plus simple qui est immédiatement exploitée par la firme suisse Coradi. Léger, portable et d'un prix accessible, cet instrument permet dans sa version la plus précise le calcul du 100ème harmonique. Il obtient très vite une diffusion universelle dans les communautés scientifiques et techniques qui ne cessera qu'en 1960. Il est suivi plus tard par le planimètre spécialisé de Mader-Ott encore plus simple et moins onéreux mais moins performant en rapidité de calcul.

Malgré l'aide mécanique, l'analyse de Fourier reste fastidieuse à appliquer. D'abord il est nécessaire d'agrandir la trace des signaux de parole par la photographie, si l'on veut obtenir une bonne précision. Ensuite, les harmoniques sont calculés période par période et les masses de calculs, bien que très diminuées demeurent considérables, au point qu'elles doivent être sous traitées (souvent auprès de communautés monastiques). L'analyse harmonique mécanique va se perpétuer jusque vers 1950 pour les signaux lents ou transitoires. Pour les signaux de parole, elle est supplantée rapidement dans les années 1930 par l'analyse électronique qui, associée au microphone, magnétophone et oscilloscope, s'éloigne de Fourier pour quelques décennies.

V. LES ANALYSEURS ELECTRONIQUES

Depuis l'invention du téléphone par Graham Bell en 1878 on sait comment transformer une variation de pression acoustique en un signal électrique. On sait également que les résonateurs de Helmholtz peuvent être modélisés par des filtres passe-bande au moyen de circuits électriques RLC (capacités, inductances, résistance). Mais pour réaliser un modèle électrique de l'analyseur acoustique de Koenig, il manque une fonction essentielle; l'amplification, qui n'apparait que dans les années 1920 avec l'essor technologique de la radioélectricité. Plusieurs familles d'analyseurs électroniques vont alors se succéder jusqu'à l'apparition des techniques de traitement numérique du signal sur ordinateur dans les années 1970.

5.1. Les analyseurs à bancs de filtres

Ils sont dans la filiation directe de l'analyseur acoustique de Koenig dont ils simulent la même structure : des filtres passe-bande en parallèle et contigus suivis de détecteur d'énergie suivis d'un oscilloscope ou d'un enregistreur graphique pour visualiser les spectres. Les filtres, de largeur de bande relative constante (ΔF/F constant) se sont stabilisés rapidement à une largeur de bande 1/3 d'octave. Avec 22 filtres la bande d'analyse est comprise entre 36 Hz et 18 kHz. Les analyseurs les plus simples sont les analyseurs séquentiels dont les filtres sont commutés cycliquement en synchronisation avec l'enregistreur graphique. Le plus représentatif en est le Bruel et Kjaer 2101 associé à l'enregistreur graphique 2305. Avec ce type d'appareil, le signal analysé (segment d'un signal variable ou transitoire) doit être répété en boucle sur un magnétophone. En associant un détecteur d'énergie à chaque filtre, et en commutant rapidement les canaux sur un scope synchronisé, on dispose d'un analyseur en temps réel bien plus pratique. Le premier de ces instruments est proposé par Freistedt en 1935 mais ne sera commercialisé que plus tard par Siemens. Il est suivi dans les années 1950 par toute une gamme d'appareils proposés par plusieurs constructeurs dont ; General-Radio, Hewlett-Packard et Bruel et Kjaer. L'ultime évolution de cette famille, le modèle 3347 de ce dernier constructeur, a été exploitée jusqu'à la fin des années 1970. Ce type d'analyseur a surtout été utilisé par les phonéticiens pour des études sur la perception.

5.2. Les analyseurs à filtre continu

Contrairement aux précédents, ces analyseurs utilisent un filtre unique à bande étroite en ΔF/F constant, dont on fait varier de manière continue la fréquence centrale sur la largeur de la bande d'analyse. Ils ont été développés pour répondre à la nécessité de disposer d'une plus grande résolution spectrale que celle du 1/3 d'octave pour discriminer dans le spectre des harmoniques très proches. La variation de fréquence est effectuée soit au moyen d'un filtre RC (amplificateur sélectif) dont on fait varier les résistances, soit selon le principe de l'hétérodyne en faisant varier la fréquence d'un oscillateur. Les analyseurs du premier type, dont on fait varier la fréquence du filtre en synchronisation avec un enregistreur graphique, ont été proposés par plusieurs constructeurs dont Bruel et Kjaer. Le signal doit être répété en boucle au moyen d'un magnétophone et l'analyse est beaucoup plus lente qu'avec un analyseur 1/3 d'octave séquentiel, en revanche, elle est beaucoup plus précise. Le premier analyseur hétérodyne pour l'analyse de la parole est proposé par Grutzmacher. Dans ce type d'analyseur, la fréquence du filtre est fixe et sa largeur de bande peut être choisie en fonction de la définition spectrale désirée. L'analyse est en ΔF constant et l'exploration spectrale est obtenue par battement avec une fréquence variable dans la gamme d'analyse, générée par un oscillateur local. Le balayage de l'oscillateur est synchronisé avec la base de temps d'un oscilloscope ou d'un enregistreur graphique pour visualiser le spectre.

5.3. Les analyseurs à compression de temps

Ils ont été imaginés pour accélérer les temps d'analyse des analyseurs à filtre continu et se rapprocher de l'analyse en temps réel. Leur principe consiste à enregistrer un signal de courte durée, et de le reproduire en boucle beaucoup plus rapidement. On comprime ainsi le temps d'analyse et on multiplie la gamme de fréquence par le rapport de compression de temps. On applique ensuite une analyse hétérodyne. Le premier dispositif fonctionnant sur ce principe est le célèbre Sona-graph d'un rapport de compression temporelle de 10. Les ultimes évolutions des analyseurs à compression de temps sont les Spectral Dynamics et Saicor à la fin des années 1960. D'un rapport de compression de 1000, ils furent les seuls à analyser un signal en temps réel mais disparurent très vite, remplacés par les premiers transformateurs de Fourier numériques.

5.4. Le Sona-graph ou sonagraphe

Cet analyseur, véritable légende de l'analyse acoustique de la parole a été développé dans les laboratoires de la Bell dans le but d'étudier les distorsions des signaux de parole pour améliorer les communications radiotéléphoniques. Il a été imaginé dés le début des années 1930 par Ralph Potter avec les trois principes suivants : la compression de temps, l'analyse hétérodyne et des résultats d'analyse en présentation temps fréquence sous la forme de spectres évolutifs. Son développement est très long et en grande partie, occulté par la seconde guerre mondiale. Le premier prototype de faisabilité fonctionne en 1940 mais n'est présenté par Potter qu'en 1945. Toute une équipe autour de Walter Koenig améliore et stabilise l'appareil original après de multiples mises au point de la boucle magnétique et du système de gravure des spectres qui sont les deux parties les plus originales de l'appareil.

La boucle est constituée par une piste magnétique située sur la tranche d'un disque qui tourne à la vitesse d'un tour toutes les 2,2 secondes (courant alternatif de 50 Hz) durant l'enregistrement du signal. Pendant l'analyse, le disque tourne 10 fois plus vite. La durée du signal est donc comprimée d'un rapport 10 et la bande d'analyse dilatée d'autant, soit de 200 Hz à 200 kHz, qui sont les limites haute et basse de variation de l'oscillateur hétérodyne. Le spectre évolutif s'inscrit sur un cylindre vertical solidaire du disque d'enregistrement assurant une parfaite correspondance temporelle entre le signal et le spectre. La hauteur du cylindre correspond à la bande d'analyse, dont le balayage s'effectue de bas (20 Hz) en haut (20kHz), avec un pas de 50 Hz par tour, en 160 tours. Si à chaque instant de la boucle qui le reproduit, le signal contient de l'énergie au 1/10 de la fréquence du filtre d'analyse, une pointe électrique brûle plus ou moins un papier spécial disposé sur le cylindre, en fonction de l'intensité du signal dans le filtre. A chaque tour du cylindre, la pointe s'élève, et son mouvement fait varier la fréquence de l'oscillateur local. Le spectre évolutif du signal enregistré sur la boucle est présenté avec le temps en abscisse et les fréquences en ordonnée. L'intensité des composantes spectrales est donnée par le degré de noirceur de leurs traces.

Avec une largeur de bande d'analyse de 20 Hz à 20 kHz, sur une durée de 2,2 secondes, un filtre d'analyse étroit (40 Hz pour une meilleure résolution fréquentielle et visualiser les harmoniques) ou large (300 Hz pour une meilleure résolution temporelle et mieux visualiser les formants), et surtout un remarquable système de gravure du spectre évolutif, le Sona-graph est parfaitement adapté à l'étude de la dynamique des signaux de parole. En 1951, Bell cède la licence d'exploitation à la société Kay Electric qui va le distribuer sous le nom de Sona-graph pendant près de 40 ans identique, à quelques détails prés, à l'original fonctionnant avec des tubes à vide (Zoom des fréquences, courbe d'intensité, image en courbes de niveaux). Sa version transistorisée, le modèle 6061A, apparaît en 1964. Il devient très vite le standard des phonéticiens et sera le plus diffusé. A sa suite, Kay devenu Elemetric propose en 1978 le type 7800, une version dans laquelle la boucle est une mémoire circulante numérique qui permet d'afficher le signal de parole synchrone avec le spectre présenté sur le même type d'inscripteur à papier brulé. Il permet également d'avoir accès à certaines mesures quantitatives.

Le sonagraphe et ses documents les sonagrammes ont eu une importance considérable dans les études sur la parole pendant une quarantaine d'années et si de nos jours il est en grande partie oublié il nous a laissé le terme générique d'un *instrument permettant l'analyse et la représentation graphique d'un son*. Il nous a laissé également la représentation temps fréquence et jusqu'aux valeurs de la sélectivité des filtres d'analyse étroit et large. Le développement des techniques numériques de traitement des signaux l'a rapidement évincé dans les laboratoires.

VI. L'ANALYSE HARMONIQUE NUMERIQUE

Dés les années 1960, la diffusion des ordinateurs de calculs scientifiques a permis le développement du domaine du traitement numérique du signal et une véritable explosion des applications de l'analyse harmonique de Fourier avec la transformée de Fourier discrète (DFT). Une des principales avancées dans ce domaine est la proposition par Jones Cooley et John Tuckey en 1965 de l'algorithme de la transformée de Fourier rapide (FFT) qui permet une diminution considérable du temps de calcul, au prix il est vrais de quelques restrictions. Parallèlement, les progrès des circuits de calculs numériques ainsi que leur miniaturisation permettent au milieu des années 1970 de développer des instruments de mesure spécialisés, capables d'effectuer des analyses de Fourier en temps réel dont le DSP Sona-graph de Kay Elemetric est l'ultime représentant. Leur apparition suit de quelques années à peine celle des analyseurs à compression de temps rapides, mentionnés précédemment. Ils sont peu utilisés par les phonéticiens car onéreux, et leur existence est éphémère à cause du traitement numérique du signal qui se diffuse rapidement dans les laboratoires sur les mini-ordinateurs, les stations de travail puis les PC [2], sous la forme des éditeurs de signaux, qui regroupent toutes les fonctions essentielles pour l'analyse de la parole [3]. Ce sont des outils que maintenant nous utilisons tous à des degrés divers, sans bien en connaître les origines, et nos aînés qui les ont imaginé et auxquels nous sommes tous redevables.

Les lecteurs qui désireraient approfondir certains aspects de cet exposé pourront consulter avec profits les ouvrages [4], [5] et [6].

BIBLIOGRAPHIE

[1] B. Teston. A la poursuite du signal de parole. *Actes, Journées d'Etude sur la Parole 26ème JEP*. 7-10. 2006.

[2] B. Teston. A la poursuite du signal de parole : Suite et fin. Actes*, Journées d'Etude sur la Parole 27ème JEP*. 397-400. 2006.

[3] P. Martin. *Phonétique acoustique : Introduction à l'analyse acoustique de la parole*, Armand Colin, Paris, p. 163, 2008.

[4] C. Escudier, H. Gazanhes, Tachoire et V. Torra. *Des cordes aux ondelettes.* Publications de l'Université de Provence. Aix. p. 482. 2001.

[5] T. M. Hankins, R.J. Silverman. *Instruments and the imagination*, Princeton University Press, Princeton, p. 337, 1995.

[6] R. T. Beyer, *Sounds of our time*, Spinger, New-York ,p. 444, 1.999.