

A la poursuite du signal de parole : suite et fin

Bernard Teston

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

ABSTRACT

At the beginning of the 20th century, the speech researchers use to make its signal visible, mechanical apparatuses like the phonautographs whose technology is at the end of the evolution. To improve the trace of the speech signal, the engineers will imagine new electric devices, around the technology of the telephone. The galvanometric recorders, the tape recorders and the oscilloscopes, will be developed successively to collect and observe the sounds and the traces. They will be followed by the digital processing of the audio and the speech signal editors.

1. INTRODUCTION

Dans un précédent exposé [1] nous avons montré qu'au cours du dix neuvième siècle, la quête de l'image du signal de parole a été essentiellement constituée par une course à l'amélioration des dispositifs de gravure du signal sur un support pérenne, dispositifs mécaniques d'abord, optiques ensuite.

Au début du siècle dernier, le signal de parole est visualisé au moyen de phonautographes mécano optiques sur de la pellicule photographique, ou de tambours de Marey sur papier noir, dans le cadre de la méthode graphique. Il peut également être enregistré et restitué par le *phonographe*. Mais, cette technologie est en fin d'évolution. Comme le *phonographe*, elle est purement mécanique, basée sur la mise en vibration par les variations de pression acoustique, de membranes associées à leur dispositifs d'inscription. Malgré cela, cette technique va encore utilisée dans les laboratoires pendant de nombreuses années. Son ultime développement est du à Clarence Miller qui propose en 1909 le *Phonodeik* pour des recherches d'acoustique musicale, et qui a été utilisé pour la parole par les phonéticiens surtout américains, dans le premier quart du 20^{ème} siècle [2]. Bien que donnant les plus belles traces du signal de parole de son temps, le *phonodeik* manquait de linéarité et de sensibilité. Il était de surcroît, d'une utilisation délicate.

La technique des phonautographes s'est développée au cours la seconde moitié du 19^{ème} siècle parallèlement aux applications naissantes de l'électricité, dont le *Téléphone* fut la révolution technologique de notre domaine.

2. LES METHODES ELECTRIQUES

Le principe du Téléphone est basé sur l'association d'un capteur (le microphone), qui transforme les variations de pression acoustique en courant électrique et d'un transducteur (l'écouteur), qui transforme les variations de courant électrique en pression acoustique. Ces deux composants sont reliés par un unique fil électrique, le circuit étant fermé par la terre, à travers une source de courant, pile ou batterie. Ainsi constitué, ce dispositif permet de communiquer à distance, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres. De nombreux inventeurs peuvent revendiquer l'origine du téléphone, mais Graham Bell semble en avoir déposé le brevet le premier en 1878, simultanément à la présentation d'un modèle fonctionnel.

Ce même Graham Bell a été quelques années plus tôt, un des plus actifs protagonistes de la course au signal de parole par l'amélioration des phonautographes. A partir de l'apparition du téléphone, la trace du signal de parole va être associée intimement à l'évolution des télécommunications et très vite, les « obsédés de la trace » vont s'acharner à appliquer le téléphone à la méthode graphique. Il s'agit surtout de Boudet de Paris, un médecin dans le giron de Marey qui a développé en 1882 un microphone à charbon particulièrement performant pour l'époque mais qui n'a pas abouti à des tracés exploitables à cause de la faiblesse en dynamique et en linéarité des premiers graveurs électromagnétiques de la méthode graphique mareysienne. Le « Téléphone écrivain » de Boudet de Paris fut donc un échec, qui resta sans suites car ce dernier disparut prématurément après être devenu un des plus importants acteurs et précurseurs de « l'électricité médicale ». La tentative de Rousselot dans le même sens est plus anecdotique au même titre que son brevet de pile originale, et tout aussi peu efficace. Mais il n'a pas persévéré, ayant trouvé dans les tambours de Marey une réponse à ses attentes. Dès lors, en qualité de performance, les microphones seront longtemps en avance sur les transducteurs inscripteurs électromécaniques.

Nous avons vu également que le *phonographe* à rouleaux d'Edison était devenu après d'importantes évolutions, le principal instrument d'enregistrement de la parole de préférence au *gramophone* à disque. La encore, le téléphone va être le moteur d'une évolution technologique décisive.

2.1 Le magnétophone

Le téléphone étant constitué par l'association d'un microphone pour capter la parole et d'un écouteur pour la restituer, de nombreux inventeurs se sont démenés pour enregistrer le courant électrique les reliant. Pour ce faire, dès 1898, Waldemar Poulsen propose une machine originale le *Telegraphon* dont le principe imaginé par Oberlin Smith dix ans plus tôt va donner naissance à une famille d'instruments qui s'est perpétuée quasiment dans la même configuration jusqu'à nos jours : le magnétophone. Le *Télégraphon* fonctionne de la manière suivante : Le courant électrique produit par un microphone crée un champ magnétique image des variations du courant dans un électro-aimant. Ce champ magnétique s'inscrit par aimantation dans un fin fil d'acier, qui défile en frottant contre l'électro-aimant. Les variations du champ magnétique, image du signal de parole original sont donc enregistrées dans le fil d'acier. Pour restituer le signal enregistré, on fait défiler le fil, à la même vitesse contre l'électro-aimant. Les variations du champs magnétique du fil induisent dans l'électro-aimant un courant électrique qui excite à son tour l'écouteur. Dans le dispositif original, le fil est enroulé en spires jointives sur un tambour, très vite, il sera enroulé sur deux bobines, émettrice et réceptrice comme pour tous les magnétophones à venir. Les premiers enregistrements préservés du *Télégraphon* font entendre un signal très sourd, distordu mais intelligible, et moins criard que celui du *Phonographe*. Destinée à enregistrer les conversations téléphoniques, cette machine, qui synthétisait toutes les

connaissances de l'époque sur l'électricité, n'a pas connu le succès. D'abord, son signal n'est pas significativement meilleur que celui du *Phonographe* et il est moins puissant, ensuite, son utilisation nécessite une source électrique, contrairement au phonographe dont le moteur à ressort est mécanique. Des améliorations telles que l'amplification électronique ont permis une meilleure qualité des enregistrements qui a alors surpassé celle des phonographes [3]. A partir des années 1930 le magnétophone à fil, sous la forme d'énormes machines à rubans d'acier défilant à 1 mètre par seconde a permis de diffuser en différé les programmes des stations de radio dont la BBC. Il a également commencé à supplanter le phonographe dans les laboratoires dans lesquels, il a longtemps encore, côtoyé les dictaphones à disques souples après l'invention par la Bell, de la gravure électrique sur disque en 1926. Ces deux appareils ont été jusque vers 1950 les enregistreurs standards des enquêtes linguistiques, avant d'être supplantés par les magnétophones à bandes puis à et à cassettes

En 1936 apparaît une innovation très importante pour l'avenir du magnétophone. Il s'agit de la bande magnétique constituée par de la poudre d'oxyde de fer collée sur un ruban plastique en acétate de 6,35mm de large. Pour cette bande, la firme AEG-Telefunken a développé un nouveau type de machine baptisée *Magnetophon* qui deviendra rapidement le nom générique de cette famille d'enregistreurs magnétiques. A la suite de la mise au point de la pré magnétisation haute fréquence, le magnétophone moderne à bande permet à la fin des années 1940 des enregistrements avec une dynamique proche de 50 dB et une bande passante de 10 kHz à une vitesse de 76 cm/sec. Il va supplanter définitivement les appareils à fil dans toutes les applications institutionnelles dont les nôtres, et faire exploser véritablement le marché de l'audio populaire dans les années 1960 avec l'apparition de la cassette. Ses performances ne cesseront de s'améliorer jusqu'à son remplacement par le Digital Audio Tape (DAT) à la fin des années 1980.

2.2 L'oscillographe galvanométrique

L'électricité ayant envahi les paysages technique et scientifique et de la seconde moitié du 19^{ème} siècle, la mesure des courants électriques fut une nécessité absolue pour qu'elle puisse continuer son développement. Ce fut le rôle des galvanomètres, fondés sur le principe des lois de l'électrodynamique décrites par Ampère. Ces lois exposent qu'un conducteur parcouru par un courant électrique placé dans un champ magnétique subit une force proportionnelle à l'intensité du courant et à celle du champ magnétique. Cette force a une direction perpendiculaire à celle du champ magnétique. Parmi une infinité de modèle, le type le plus répandu de galvanomètre fut le galvanomètre à cadre mobile proposé en 1880 par Emile D'Arsonval. Le courant électrique mesuré passe dans une bobine rectangulaire (le cadre) placé entre les pôles d'un aimant permanent. Le cadre est suspendu à un fil d'acier, dont l'élasticité le ramène à une position d'équilibre lorsque le courant qui le traverse est nul. Un petit miroir fixé au cadre permet de suivre un spot lumineux sur un écran et de mesurer l'amplitude de ses mouvements proportionnelle à l'intensité du courant. Le galvanomètre à cadre mobile de D'Arsonval est caractérisé par une grande sensibilité mais ne permet pas de suivre des variations de courant supérieures à quelques Hertz.

L'étude par observation directe avec une exactitude suffisante, des courbes périodiques des courants alternatifs pour en évaluer les distorsions, nécessite des

galvanomètres capables de suivre leurs variations rapides. Dans ce but, André Blondel développe à partir de 1893 une famille particulière de galvanomètre qu'il baptise oscillographe galvanométrique [4]. En 1900 il présente un dispositif où le cadre et le fil de suspension sont réduits à une simple boucle de torsion supportant un miroir minuscule et très léger. Cet équipement mobile est placé dans un liquide visqueux pour amortir ses mouvements dans les fréquences élevées. Associé à un puissant aimant permanent et à un dispositif atténuant les phénomènes d'hystérésis, l'oscillographe de Blondel, grâce à divers procédés optiques, permet d'observer directement les courbes qui représentent les variations des courants électriques, avec une grande fidélité jusqu'à des fréquences de 6 kHz. Il permet également, d'en obtenir des images pérennes sur des films photographiques [5].

Très vite, l'oscillographe de Blondel connaît un grand succès international couronné par de nombreuses distinctions honorifiques. Il donne naissance à une importante famille d'instruments de mesure qui va évoluer et perdurer dans les laboratoires jusque dans les années 1980. Dès 1902, il est utilisé pour enregistrer la trace de signaux de parole, mais son application dans ce domaine ne s'est développée que dans les années 1930, grâce à l'amplification des signaux microphoniques. C'est avec un oscillographe que Fletcher a étudié la parole en 1929 [6]. C'était alors la technique de visualisation du signal la plus fidèle et la moins restrictive en terme d'amplitude et de fréquence. L'oscillographe va ainsi être utilisé pour l'inscription du signal acoustique sur les pistes « son » de la pellicule du cinéma parlant.

Sa dernière évolution, toujours sur le même principe, est représentée par les oscillographes à galvanomètres « crayons » avec inscription sur du papier sensible aux rayons ultraviolets (UV recorders) capables de transcrire des signaux jusqu'à 20 kHz. Pour les études sur la parole, les phonéticiens ont souvent utilisé ce dernier type d'oscillographe qui malgré la fidélité de ses tracés avait deux grands inconvénients. D'abord, ils manquaient de contraste et s'estompaient très vite, jusqu'à disparaître en quelques mois. Ensuite, le papier UV était très onéreux, surtout à cause de la grande vitesse de défilement de 2 mètres à la seconde, nécessaire à une bande passante de 10 kHz. C'est essentiellement pour ces raisons que les phonéticiens ont eu une préférence marquée dès leur apparition pour les oscillographes à jets d'encre *Oscillomink*.

2.3 L'Oscillomink

L'oscillographe à jet d'encre est un galvanomètre de Blondin dans lequel on a remplacé le miroir par un tube capillaire. De l'encre est injectée sous une forte pression à travers le tube et se dépose sur un papier en y inscrivant la trace des variations du courant électrique traversant la boucle du galvanomètre. Le principe d'inscription est simple mais il a fallu de nombreux efforts pour l'appliquer de manière satisfaisante. Le tendon d'Achille de ce système se situe dans la difficulté à ne pas obstruer les tubes en utilisant des encres hyper fluides si possible « inséchables » et sous une très forte pression tout en gardant une bonne focalisation du jet pour avoir une trace bien définie. C'est la firme suédoise Elema-Schöenander qui résout tous ces problèmes et commercialise au début des années 1950 son oscillographe à jet d'encre sous le nom de *Mingograph* essentiellement pour le marché médical. La firme Siemens (propriétaire d'Elema), commercialise une famille du même type pour le marché industriel sous le nom d'*Oscillomink*. Elle rencontre

rapidement un grand succès auprès des domaines scientifiques et industriels qui nécessitent de grandes quantités de données car cette technologie de traçage est d'un usage économique (elle utilise du papier normal non couché) par comparaison avec les oscillographes optiques. En contre partie, l'augmentation de la masse de l'équipage mobile à cause du système de projection d'encre, limite la bande passante à 1 kHz. Malgré cela et le fait que les galvanomètres manquent de fiabilité et se bouchent souvent, l'*Oscillomink* devient à partir des années 1950 l'oscillographe standard des phonéticiens qui peuvent ainsi traiter des corpus plus importants. Ces oscillographes disparurent progressivement du paysage des laboratoires, évincés par les éditeurs de signaux à partir de 1985. Il doit cependant, en rester encore quelques un dans certains laboratoires.

2.4 L'oscilloscope

Tout le monde connaît l'oscilloscope, l'universel appareil de mesure permettant de visualiser les variations d'un signal électrique sur un écran. Son principe et sa première réalisation sont dus à Ferdinand Braun en 1897 sous la forme du premier tube cathodique, ancêtre également de tous les tubes image de télévision. Le diamètre de son écran n'était que de 9 cm et sa trace était floue et épaisse. De plus sa déviation magnétique ne permettait pas une bande passante élevée et provoquait des distorsions. Il resta longtemps une curiosité de laboratoire et ses améliorations furent lentes. Ses premières applications concrètes apparaissent plus de trente années plus tard à la suite de l'amplification électronique qui a permis d'augmenter sa bande passante avec la déviation électrostatique et diverses améliorations qui en ont fait un véritable appareil de mesure fabriqué par de nombreux constructeurs à partir de 1945. Les phonéticiens ont utilisé l'oscilloscope pour étudier la forme des signaux en défilement continu sur des phonèmes tenus ou des transitions courtes, surtout dans une perspective pédagogique. Il était possible de garder une trace de l'écran d'abord par photographie, et plus tard en utilisant des modèles d'oscilloscopes à mémoire. Pour étudier le signal de parole en continu il était possible de fixer sur l'oscilloscope une caméra à grande vitesse. En bloquant le défilement de l'oscilloscope, les mouvements verticaux du spot s'inscrivaient sur un film de 35 mm. Cette méthode donnait une bonne qualité de trace mais avait les mêmes inconvénients que les oscillographes à UV surtout en terme de coût d'utilisation. Ces derniers, plus simple à mettre en oeuvre eurent la préférence des phonéticiens. L'inscription des signaux de parole s'est donc répartie généralement dans les laboratoires entre ce dernier instrument pour les études nécessitant une grande définition du signal mais sur des durées courtes, et l'*Oscillomink* pour une définition moins grande (1 kHz), mais sur de plus longues durées

3. LA REVOLUTION NUMERIQUE

Depuis l'apparition des applications de l'électricité dans les domaines de la capture, la transmission, le traitement et la diffusion de l'information, elle était contenue dans un signal électrique, image d'un phénomène physique dont il était l'analogie le plus précis possible. Cette notion de signal analogique n'avait pas à être précisée tellement elle était transparente car elle était la seule représentation du signal. C'est dans les années 1930, que se développa l'idée que l'on pourrait substituer au signal électrique analogique continûment défini, une suite d'échantillons ponctuels dont on ne retiendrait que la valeur numérique. Les « téléphonistes » s'intéressèrent très tôt à la numérisation dans le but d'augmenter le

nombre de communication sur une même ligne en imaginant un nouveau type de modulation, la PCM (Pulse Code Modulation). Le signal analogique était donc réduit à une suite régulière de nombres. Pour numériser un signal analogique sans perte d'information, il faut l'échantillonner à une fréquence deux fois supérieure à celle de sa plus haute composante. C'est-à-dire par exemple, si un signal a une bande passante de 10 kHz, il faut l'échantillonner à 20 kHz. La numérisation du signal, opération réalisée au moyen de codeurs PCM analogique-numérique, ouvre des perspectives considérables en le faisant pénétrer directement dans les machines de traitement numérique de l'information, les ordinateurs. Il est également possible de l'en faire sortir par un codage numérique-analogique, qui transpose une suite régulière de nombres en signal analogique. Là encore les progrès furent lents et tributaires des évolutions technologiques de l'informatique. Le traitement numérique du signal de parole ne s'est développé dans les grandes institutions qu'à partir des années 1960.

Parallèlement, le domaine de l'audio visuel analogique s'est progressivement « numérisé ».

3.1 L'audio numérique

Indépendamment des progrès de l'informatique, l'enregistrement magnétique a évolué vers la numérisation plus tardivement, mais ses progrès vont être particulièrement rapides. En 1979 apparaît le premier dispositif audio numérique, le Compact Disk (ou CD Audio) proposé par *Phillips* et *Sony*. Appelé à remplacer le disque microsillon analogique, il témoigne de manière éclatante du bien fondé de cette nouvelle technologie qui fait gagner instantanément 20 dB de dynamique au signal audio.

La firme *Sony* propose en 1983, un nouveau type d'enregistreur magnétique, le DAT (Digital Audio Tape) qui s'éloigne du schéma classique du magnétophone jusqu'ici triomphant. Basé sur la technologie du tambour tournant, emprunté aux magnétoscopes, le DAT gagne également 20 dB de dynamique sur les magnétophones les plus performants avec une bande passante de 20 kHz et un pleurage quasi non mesurable. Son support est une cassette deux fois plus petite que la cassette *Philips* avec une autonomie de 60 minutes en stéréo. Avec de telles performances, le DAT, proposé sous la forme de modèles professionnels, de table ou portable, va progressivement supplanter le magnétophone analogique dans toutes ses applications.

Il est suivi rapidement par un autre système d'enregistrement audio numérique, le *MiniDisk*, proposé en 1992 également par *Sony*. Son principe s'apparente à celui des disques d'ordinateurs magnéto-optiques réinscriptibles, associé à un système de codage original (ATRAC). Le support est un petit CD ROM, de 6cm de diamètre, contenue dans une boîte d'un encombrement inférieur à celui d'une disquette d'ordinateur. Il permet une durée d'enregistrement de 74 minutes en stéréo. Les performances du *Minidisk* sont très proches de celles du DAT. Sous sa forme de baladeur portable, il s'est révélé être un des enregistreurs les mieux adaptés aux enquêtes linguistiques.

Mais déjà, dans cette dernière application pointée depuis 2004 un nouveau type d'enregistreur sous une forme « tout électronique » dont le support de l'information est un mini disque dur ou une mémoire « Flash ». Equipés pour recevoir des microphones de haute qualité, capables d'une grande autonomie en qualité HiFi, directement connectables via USB, ils échangent avec un ordinateur des fichiers *Wave*, *MP3* ou autres. Ces enregistreurs de dernière génération représentent l'ultime évolution de

l'enregistrement numérique. Associés à un PC, ils répondent à toutes les caractéristiques dont nous avons rêvées.

3.2 L'enregistrement numérique sur ordinateur

Faire entrer et sortir un signal analogique d'un ordinateur est resté difficile, onéreux donc rare, jusqu'à l'apparition des mini ordinateurs développés à la fin des années 1960 pour le contrôle des processus industriels et expérimentaux, avec un effort particulier sur les entrées-sorties d'information, les interfaces de communication homme machine surtout graphiques et les systèmes opérateur « temps réel ». Ces machines n'étaient certes pas très performantes. Leurs convertisseurs étaient lents, les traitements étaient souvent longs, peu aisés et portaient sur des durées de signaux relativement courtes, sauf à utiliser des ordinateurs puissants mais très coûteux. Cependant, leurs interfaces graphiques permettaient d'afficher et de reproduire les traces des signaux de manière efficace et commode. C'est à partir de cette évolution à laquelle on se doit d'associer la firme *Digital*, que l'informatique a commencé à gagner les laboratoires, avant de les envahir avec les stations de travail et de les submerger avec les PC. Ce n'est que depuis quelques années que les micro-ordinateurs sont devenus assez puissants pour permettre des enregistrements aux normes de l'audio numérique et des traitements rapides sur les signaux sonores à un coût abordable. Outre la puissance de calcul, l'augmentation des mémoires de masse en particulier, permet d'utiliser un micro-ordinateur comme un magnétophone de grandes qualités. Ainsi, les deux grandes opérations nécessaires aux études de la parole, que sont l'enregistrement et la visualisation du signal sont enfin réunies dans un même dispositif. Les avantages de l'enregistrement sur ordinateurs sont multiples. D'abord, comme il se réduit à un banal fichier informatique, ses propriétés ne varient pas dans le temps ; on peut considérer un tel enregistrement comme indestructible à condition d'être vigilant à sa sauvegarde. Ensuite, il peut être écouté et dupliqué autant que nécessaire sans aucune altération. Enfin, on peut lui appliquer une infinité de traitements, pour réaliser sur les signaux des mesures acoustiques de spectre ou de prosodie par exemple, et des calculs statistiques pour faire sortir du signal des informations très riches imperceptibles à l'écoute. Il est possible également de gérer une quantité considérable d'enregistrements sonores pour les trier, les classer, les comparer ou les mettre en relation avec des informations textuelles et des images sous la forme de bases de données. L'outil privilégié des études sur la parole qui synthétise et gère toutes ces opérations est l'éditeur de signal.

3.3 Les éditeurs de signaux

Un éditeur de signal est un programme ou plutôt un ensemble de programmes qui permet d'abord de visualiser un signal et les transformations que l'on peut lui faire subir à travers de multiples traitements dont on contrôle les caractéristiques. On recherche avant toute chose dans un éditeur de signal outre l'efficacité de l'outil, une grande facilité d'utilisation. Un éditeur de signal nécessite donc en priorité une bonne interface graphique et cela a été la difficulté principale à leur diffusion. Les premières tentatives de réalisation sont dues à la Bell et à l'UCLA au début des années 1960 pour faciliter leurs recherches sur la parole et la musique. L'apparition de la série des PDP 11 de *Digital* équipés d'interfaces graphiques ou de consoles *Tektronix*, favorisa le développement d'éditeur maison dans de

nombreux laboratoires et la diffusion des premiers éditeurs de signaux commerciaux. Ce mouvement s'amplifia avec les stations de travail bâties autour d'une interface graphique et équipées d'entrées-sorties audio, pour lesquelles de nombreux éditeurs furent développés pour la parole ou la musique, dont *X Wave* d'*Entropics* est un des plus fameux exemples. La puissance des PC rattrapant celle des stations, les éditeurs migrèrent tout naturellement vers le monde WINDOWS, stimulés par la modicité des coûts et aussi par le marché de la musique et le développement du « home studio ». Adobe Audition (Cool Edit) en est un des exemples des plus représentatifs avec Win CSL, Prat et Win Snori plus spécifiques aux recherches sur la parole.

4. CONCLUSION

Après ce succinct exposé de l'histoire longue de deux siècles d'une aventure scientifique à laquelle ont participé de nombreux protagonistes il nous faut tirer quelques réflexions. D'abord, les acteurs, surtout de la première partie de cette saga, sont d'origines très diverses et aux motivations variées. Elles se distribuent en effet sur une échelle qui va du plus estimable humanisme au plus impitoyable mercantilisme et paradoxalement parfois chez les mêmes personnes. Mais tous, ont un intérêt immense pour l'objet de leur étude avec parfois un attachement quasi mystique pour le verbe et pour leur quête de rendre la parole visible. Ce but étant atteint (plus ou moins bien) la description des segments phonétiques s'est développée à partir de cette représentation temps amplitude des variations de la pression acoustique jusqu'à l'apparition des analyseurs de fréquences donnant des spectrogrammes en représentation temps fréquence. A partir de ce moment la description des segments ne se fera presque exclusivement qu'à travers les spectrogrammes car les analyseurs utilisés par les phonéticiens (Sonograph de Kay) ne donnaient pas de trace du signal qu'ils ont petit à petit oublié. Ce n'est que depuis peu de temps que les éditeurs de signaux ont fait réellement redécouvrir aux phonéticiens le signal de parole. Ces outils, que l'on peut utiliser sur des PC, associés à un enregistreur numérique ont des performances qui dépassent celles nécessaires à une parfaite définition du signal de parole on peut considérer que la course au signal est gagnée et ... terminée.

Nos anciens peuvent donc être fiers de nous ! Mais nous pouvons être encore plus fiers d'eux car au début du siècle dernier, avec une technologie élémentaire et toute leur imagination ils avaient quasiment décrit tous les phénomènes essentiels des fondements des sciences phonétiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. Teston. A la poursuite du signal de parole. *Actes, Journées d'Etude sur la Parole 26^{ème} JEP*. 7-10. 2006.
- [2] D. C. Miller. *Sound waves-Their shape and speed*. Part 1. 3-73, Browne Press, 2007.
- [3] E.C.Wente. General principles of sound recording. *Bell Labs Record* 7. p. 82. 1928.
- [4] V. J. Philips. *Waveforms : A history of early oscillography*. Chapter 4, Moving coils oscillograph, 130-174. Adan Hilger. Bristol. 1986.
- [5] B. Escudier, C. Gazanhes, H. Tachoire et V. Torra. *Des cordes aux ondelettes*. Publications de l'Université de Provence. Aix. p. 482. 2001.
- [6] H. Fletcher. *Speech and Hearing*. Van Nostrand, New York. 1929.