

PAROLE¹

Rares sont les domaines d'études dont la complexité peut être comparée à celle de la parole. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer les champs d'études qui y sont rattachés. Travailler sur la parole c'est s'intéresser à la physiologie et l'anatomie des voies aériennes humaines. L'origine des sons de parole est de nature aéro-élastique : les sons voisés (les voyelles par exemple) et plosives (les sons tels que /p / ou /k/, par exemple) sont essentiellement produits par la perturbation de l'écoulement d'air provenant des poumons. Cette perturbation peut être périodique comme celle générée par l'auto-oscillation des cordes vocales lors de la phonation, ou de caractère transitoire comme lors du relâchement d'une occlusion du conduit vocal dans le cas d'une plosive. Étudier ces phénomènes implique donc, outre les aspects liés à la mécanique des fluides, la prise en compte de la bio-mécanique des tissus (cordes vocales, lèvres, langue...). Les sons de fricatives (/f/, /s/...) sont de nature aéro-acoustique, puisque liés aux fluctuations internes d'un écoulement turbulent, ou, plus correctement, à l'interaction entre l'écoulement et le conduit vocal.

Les sources acoustiques générées par ces sources de propagation à l'intérieur des voies aériennes (conduit vocal, poumons) et rayonnement, essentiellement au niveau des lèvres ou des narines.

Cette description, strictement physique, fait abstraction de la fonction essentielle de la parole : communiquer, véhiculer un message (en général) chargé de sens et destiné à être perçu (voir le paragraphe Perception de la parole). À ce titre, l'étude de la parole relève également du domaine des Sciences de l'Homme (psychologie, phonétique, phonologie...).

Les champs d'applications de ces recherches multi-disciplinaires sont de fait extrêmement variés. Le premier objectif est de contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes associés à la production de la parole. Ceci concerne la modélisation des sources de sons, bien entendu, mais aussi la coordination entre ces sources sonores (voir le paragraphe sur la modélisation physique) ainsi qu'au contrôle moteur de la parole.

La synthèse de la parole constitue un enjeu technologique majeur, dont on trouve des applications dans notre vie quotidienne. Les techniques de traitement du signal (TDPSOLA, par exemple) bien plus efficaces, sinon en qualité, du moins en temps de calculs sont en général préférées aux modèles physiques encore très incomplets. La synthèse de la voix chantée constitue cependant une exception. L'enjeu se situe alors plus dans le domaine de l'interprétation et de la création musicale.

La reconnaissance de la parole, et sa conversion en texte ou l'identification du locuteur, par exemple, le codage ou l'inversion acoustique-articulatoire et toutes les applications qui y sont rattachées (voir le paragraphe Inversion acoustique articulatoire) constituent également des enjeux scientifiques majeurs. Bien que les avancées dans ces domaines aient été spectaculaires à la fin du siècle dernier, il est de plus en plus couramment admis, à l'instar de Flanagan et coll.², que certaines limitations actuelles semblent infranchissables sans une meilleure compréhension de la physique des phénomènes mis en œuvre lors de la production de parole. À titre d'exemple, dans le domaine de la compression, les taux actuels sont typiquement de l'ordre de 10 à 12 (par canal), l'amélioration d'un ordre de grandeur de ces performances constitue un enjeu scientifique et technologique important.

L'analyse et le traitement des pathologies de la voix, l'aide à la chirurgie, à la conception de prothèses vocales constituent un autre axe en pleine expansion. Ces pathologies sont, en effet, nombreuses (cancers, polypes, kystes...), fréquentes (par exemple chez les enseignants, les chanteurs...), largement étudiées d'un point de vue clinique (voir le paragraphe sur l'exemple de la dysarthrie) mais encore mal expliquées du point de vue de la physique. En particulier, il n'existe pas actuellement de modèle physique réaliste des pathologies anatomiques.

Dans la suite, sont présentés plus en détails quatre aspects de travaux concernant la perception de la parole, sa modélisation physique, l'inversion articulatoire et un exemple de pathologie.

1. Perception de la parole

La parole est une activité proprement humaine, sans doute la plus importante. Sa perception fait intervenir, outre les mécanismes auditifs génériques semblables à ceux qu'on trouve chez d'autres espèces, des mécanismes spécifiques qui nous sont propres. Comprendre ces mécanismes est important sur le plan scientifique, et aussi pour les applications médicales (prothèses, implants, etc.) et industrielles (téléphonie, interfaces homme-machine, etc.). La perception de la parole est aussi essentielle pour calibrer les modèles de production, en particulier pour déterminer quelles sont les dimensions pertinentes pour l'évaluation de la qualité d'un modèle.

La perception de la parole est abordée par plusieurs disciplines. La psychoacoustique caractérise les facultés auditives de base, en relation avec la physiologie (chez les modèles animaux), l'imagerie cérébrale (chez l'homme) et la modélisation de l'audition. La phonologie et la phonétique étudient respectivement la structure abstraite et la forme acoustique détaillée des sons du langage. La psycholinguistique s'intéresse aux mécanismes perceptifs et cognitifs de haut niveau, et à leur développement. La reconnaissance de la parole, et plus généralement les techniques d'apprentissage automatique (machine learning) fournissent des modèles utiles dont on peut s'inspirer pour mieux comprendre les mécanismes de perception de la parole. En retour les mécanismes naturels peuvent inspirer de nouveaux algorithmes applicables dans les systèmes artificiels.

Les implants cochléaires et appareillages pour malentendants visent en premier à rétablir les facultés de perception et communication verbales. Il est essentiel de préserver la part de l'information acoustique nécessaire à la perception dans la conception des systèmes et algorithmes de traitement, sachant que les contraintes techniques (miniaturisation, nombre de canaux réduit, etc.) sont sévères. Un problème important est l'intelligibilité dans le bruit, en particulier la présence de voix concurrentes (effet cocktail ou « cocktail party effect »). Les porteurs d'implants, malentendants, et même les sujets normaux agés, souffrent particulièrement dans ces situations.

1. Ce chapitre a été écrit en collaboration avec des collègues de l'association francophone de la communication parlée (AFCP), www.afcp-parole.org/

2. FLANAGAN J. L., ISHIZAKA K., SHIPLEY K. L. (1980). *Signal Models for Low Bit-Rate Coding of Speech*. J. Acoust. Soc. Am., 68, 780-791.

L'acoustique des salles de conférence, de cours (écoles) et des théâtres vise à concevoir des espaces aptes à préserver l'intelligibilité. Il est essentiel de connaître les traits acoustiques nécessaires à la perception de la parole afin de les préserver. Les métriques globales (par exemple basées sur la puissance) risquent d'attribuer trop de poids à des dimensions moins utiles, et ainsi perdre de leur pouvoir prédictif. Il en est de même des métriques qui mesurent la qualité de modèles de production, ou de systèmes de synthèse de la parole: l'erreur RMS sur un signal n'est pas le meilleur prédictif de la qualité du modèle. Les tests perceptifs, et modèles de perception, font partie de la boucle de synthèse. La téléphonie est la principale application qui s'intéresse à la perception de la parole, et les premiers progrès dans ce domaine datent des travaux dans les laboratoires Bell dans les années 20 à 50 du siècle dernier. Les progrès techniques ont amené à s'intéresser à la mesure de la « qualité » (définie comme ce qui affecte la satisfaction de l'utilisateur à intelligibilité égale). Avec le développement des réseaux cellulaires l'intelligibilité redevient à l'ordre du jour. La quantification des effets de variations de taux de compression ou pertes de paquets est complexe.

La reconnaissance de la parole substituée à l'oreille et au cerveau de l'auditeur un microphone et un ordinateur. Le développement de ces techniques artificielles s'est inspiré de la perception et la cognition de la parole chez l'homme, même si la trace de cet apport est difficile à reconnaître dans les techniques actuelles (réseaux de Markov, modèles de langage, etc.). Les capacités humaines d'écoute dans le bruit (parole concurrente notamment) continuent à inspirer le développement de techniques de séparation de source et reconnaissance robuste (par exemple les modèles CASA, Computational Auditory Scene Analysis).

La parole est extrêmement robuste face aux dégradations du signal, telles que filtrage, distortion non linéaire, interruption, ce qui complique la détermination des traits acoustiques importants pour la perception. Face à un locuteur, l'auditeur utilise aussi de surcroît des indices visuels (mouvements des lèvres et du visage). La compréhension du message acoustique prend appui sur le contexte et les connaissances partagées, qui elles-mêmes progressent au cours du dialogue. Ce sont des phénomènes difficiles à caractériser et quantifier, et reproduire dans des systèmes artificiels.

2. Modélisation physique de la production de la parole

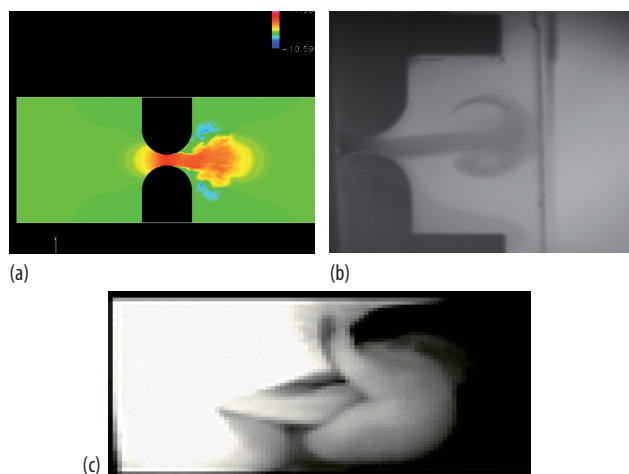
De manière très générale, la production des sons de parole résulte d'un ensemble d'interactions complexes entre un écoulement d'air provenant de poumons, des structures déformables (les cordes vocales, la langue, les lèvres) ou non (les dents) et un ou plusieurs résonateurs acoustiques (le conduit vocal, nasal et les poumons).

La modélisation physique de ces processus est complexe, en particulier parce qu'elle implique la description conjointe de phénomènes relevant du domaine de la bio-mécanique, de la mécanique des fluides, de l'acoustique ainsi que de leurs interactions c'est-à-dire de l'aérodynamique ou de l'aérodistorion et de l'aéroacoustique.

Le véritable défi de la modélisation et en particulier de la modélisation (bio)-mécanique est d'arriver à concilier une description précise des tissus humains tout en conservant un nombre « raisonnable » de paramètres de commande (c'est-à-dire de contrôle). À titre d'exemple un modèle à deux masses, pourtant considéré comme une représentation simpliste de la mécanique des cordes vocales, ne possède pas moins de neuf paramètres mécaniques. Si pour certains d'entre eux, par exemple les masses, des ordres de grandeurs peuvent être inférés des observations in-vivo, pour d'autres, tels que les raideurs ou les amortissements des ressorts, la détermination de valeurs adéquates est un problème considérable, et finalement vain puisque les humains n'ont pas de ressorts dans leurs cordes vocales !

En ce sens, l'approche proposée par Titze³ qui consiste à augmenter la complexité (le nombre de degrés de liberté) des modèles mécaniques en ajoutant des masses et des ressorts semble fort discutable. L'approche initiée par Lous et coll.⁴ qui consiste, au contraire, à simplifier, jusqu'à l'épuration, la mécanique du modèle à deux masses pour se concentrer sur les aspects les plus critiques (description de la collision des cordes vocales, prise en compte du couplage acoustique, des conditions aux limites...) semble bien plus efficace. Il n'en reste pas moins qu'en ce qui concerne la description « fine », par exemple celle nécessaire à la prise en compte de pathologies, l'orientation vers des modélisations continues (éléments finis, par exemple) semble inévitable.

La prise en compte de la turbulence reste également un enjeu théorique majeur. Ce champ d'étude est vaste puisqu'il concerne la phonation, les plosives (modélisation du bruit d'aspiration ou de souffle, du murmure...) ainsi que, bien entendu, la modélisation des fricatives. À l'heure actuelle, ceci n'est pas propre au domaine de la parole, la description détaillée des écoulements turbulents et, plus encore, de la production de son par de tels écoulement reste « l'un des secrets de la nature les mieux gardés » pour reprendre une formule célèbre de Dowling et Ffowcs-Williams⁵. L'approche aéroacoustique nous permet d'ores et déjà d'analyser, au moins qualitativement, ce type de production sonore. La nature de la source turbulente et sa localisation dans le conduit vocal, l'influence d'obstacles tels que les dents sont des exemples de



[FIGURE 1] a) Simulation numérique (LES 3-D) de la vitesse de l'écoulement turbulent (modèle de Smagorinsky) au travers d'une constriction du conduit vocal (glotte, lèvres...). b) Visualisation de l'écoulement au travers d'une maquette de constriction. c) Visualisation de l'écoulement d'air lors de la production d'une plosive (/ba/).

3. TITZE, I. R., 1973, *The human vocal cords: A mathematical model. I*, *Phonetica* 28, 129–170.

4. LOUS N. J. C., HOFMANS G. C. J., VELDHIJS R. N. J. and HIRSCHBERG A., *A Symmetrical Two-Mass Vocal-Fold Model Coupled to Vocal Tract and Trachea, with Application to Prosthesis Design*, *Acta Acustica*, 84, 1135–1150, 1998.

5. DOWLING A., FFWOCS-WILLIAMS J. (1983) *Sound and sources of sound*, Chichester: Ellis Horwood Pub.

paramètres dont l'influence peut être rationalisée théoriquement. Cette étude s'approche également de l'analyse des bruits respiratoires, en particulier pour le diagnostic de pathologies. L'analyse et la modélisation plus fine de ces phénomènes constituent un axe de recherche à long terme puisqu'à la complexité théorique il faut faire face également aux difficultés du point de vue expérimental. L'ouverture vers des techniques telles que la simulation numérique « lourde » ou la Vélocimétrie par Image de Particules constitue une opportunité essentielle dans cet objectif.

3. Inversion acoustique articulatoire

Bien que les premières tentatives d'inversion du processus de production de la parole pour remonter aux gestes articulatoires soient très anciennes, ce défi scientifique conserve en grande partie son statut d'inaccessibilité. Au-delà du défi lui-même, il existe de nombreuses applications potentielles. L'une des plus séduisantes est d'offrir un retour d'efforts articulatoires pour apprendre à articuler les sons d'une langue étrangère qui n'existent pas dans la langue maternelle. Les travaux récents de neurophysiologie ont confirmé qu'il existait un lien étroit entre les représentations cognitives articulatoires et acoustiques de la parole à travers les neurones miroirs⁶, et que, dans une certaine mesure, les humains inversaient donc la parole pour mieux la percevoir.

Comme d'autres défis en traitement automatique de la parole, l'inversion a suscité un courant de recherches se fondant sur la modélisation statistique depuis les années 1990. L'idée est d'apprendre le passage de l'acoustique vers l'articulatoire à l'aide d'un corpus de données associant données articulatoires et acoustiques. Il existe ainsi plusieurs méthodes, stochastiques⁷ ou neuro-mimétiques⁸ qui ont été évaluées sur des données articulatoires acquises pour un petit nombre de points du conduit vocal, en général une dizaine répartis sur la langue, les lèvres et la mâchoire inférieure. Il reste que ces données sont très étroitement liées à un locuteur et aux choix des points à suivre. L'inversion fournit donc plus un ensemble de points géométriques qu'une réelle solution inverse. Par ailleurs, une méthode statistique doit s'appuyer sur un corpus de données représentatives, corpus dont la construction semble délicate lorsqu'il s'agit de pouvoir guider un locuteur vers des formes articulatoires qu'il n'a jamais produites.

Contrairement à la plupart des signaux rencontrés en perception humaine, l'origine du signal de parole est bien circonscrite tant du point de vue géométrique – le conduit vocal – que du point de vue de la physique – les équations de l'acoustique. Cela justifie l'intérêt porté aux méthodes d'analyse par synthèse, l'idée étant d'inverser le signal en le comparant au signal synthétisé à l'aide d'une simulation plus ou moins élaborée de la production de la parole. Cette simulation couvre deux aspects : la précision géométrique de l'approximation du conduit vocal et la fidélité de la simulation acoustique. La précision géométrique est tributaire des progrès des techniques de l'imagerie médicale, l'imagerie par résonance magnétique en particulier. Il faut souligner qu'il

reste encore impossible de mesurer précisément, et cela à une cadence élevée, la forme du conduit vocal. Il faut donc s'attendre à des avancées notables dans le domaine des modèles articulatoires destinés à modéliser la forme du conduit vocal à l'aide d'un petit nombre de paramètres, mais aussi dans le domaine de la simulation acoustique des consonnes qui ne couvre encore que des séquences Voyelle-Consonne-Voyelle pour les fricatives et occlusives⁹.

L'inversion consiste à chercher les paramètres articulatoires contrôlant les modes de déformation du conduit vocal, ou plus simplement les paramètres géométriques de tubes uniformes discrétisant grossièrement la forme du conduit vocal. Cette recherche peut s'effectuer soit globalement dans tout l'espace articulatoire¹⁰, soit localement à chaque pas de temps¹¹. Comme l'espace à explorer est vaste, l'un des enjeux est d'ajouter des contraintes permettant de guider l'optimisation. Ces contraintes portent sur la continuité ou la cinématique des paramètres articulatoires, proviennent de l'observation des paramètres articulatoires visibles, ou encore sont inspirées de connaissances physiologiques ou phonétiques sur l'articulation des sons. La figure 2 montre que des connaissances phonétiques simples¹² portant sur les paramètres articulatoires permettent de récupérer des formes du conduit vocal très similaires à celles relevées pour un locuteur réel.

L'une des questions ouvertes est la précision articulatoire que pourra atteindre l'inversion d'une suite de sons par rapport à celle que doit réaliser un locuteur humain pour produire la même suite de sons.

4. Pathologies de la voix, l'exemple des dysarthries

Parler implique la réalisation de multiples gestes articulatoires, d'amplitudes très variables, simultanés, très précis, et bien coordonnés, mettant en œuvre de nombreux muscles. Comme toute activité motrice, la réalisation des gestes articulatoires implique quatre phases : l'intention, la programmation, la réalisation et le contrôle des gestes. Très schématiquement, l'intention et la programmation s'élaborent dans les structures neurolinguistiques et les zones motrices du cortex cérébral de l'hémisphère gauche (pour les droitiers et la grande majorité des gauchers). La réalisation est faite par les commandes neuro-motrices et leurs coordinations et ajustements sont effectués au niveau des structures cérébrales du tronc et du cervelet. Enfin, le contrôle est réalisé par des informations sensorielles traitées au niveau du thalamus et des noyaux gris centraux, structures profondes sous thalamiques des deux hémisphères cérébraux.

Qu'une de ces fonctions soit atteinte par un léger dysfonctionnement et la belle bio-mécanique, complexe et à l'équilibre subtil, qu'est la production de la parole, peut en être affectée particulièrement sous la forme de dysarthries.

On appelle dysarthries les troubles de la parole provoqués par des dysfonctionnements du contrôle musculaire des organes articulatoires, qui trouvent leur origine dans des lésions du système nerveux central ou périphérique. Il s'agit de désordres purement

6. RIZZOLATTI G. et al., *Premotor cortex and the recognition of motor actions*, Cogn. Brain Res., vol. 3, pp. 131-141, 1996.

7. HIROYA S. et HONDA M., *Estimation of articulatory movements from speech acoustics using an hmm-based speech production model*, IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, vol. 12, n° 2, pp. 175-185, March 2004.

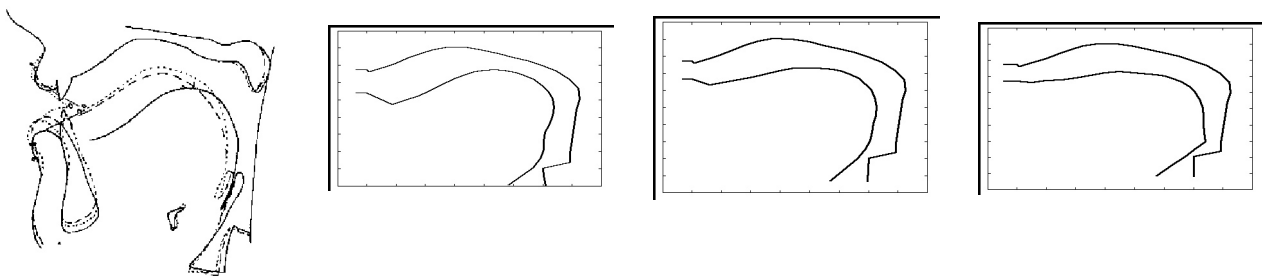
8. RAHIM M. G. et GOODYEAR C. C., *Estimation of vocal tract filter parameters using a neural net*, Speech Communication, vol. 9, pp. 49-55, 1990.

9. MAEDA S., *Phoneme as concatenable units: VCV synthesis using a vocal tract synthesizer*, in Sound Patterns of Connected Speech: Description, Models and Explanation, Arbeitsberichte des Institut für Phonetik und digitale Sprachverarbeitung der Universität Kiel, pp. 145-164, June 1996.

10 - OUNI S. et LAPRIE Y., "Modeling the articulatory space using a hypercube codebook for acoustic-to-articulatory inversion", J. Acoust. Soc. Am., vol. 118(1), pp. 444-460, 2005.

11 - SCHOENTGEN J. et CIOCEA S., "Kinematic formant-to-area mapping", Speech Communication, vol. 21, pp. 227-244, 1997.

12 - POTARD B., LAPRIE Y. et OUNI S., "Incorporation of phonetic constraints in acoustic-to-articulatory inversion", J. Acoust. Soc. Am., vol. 123(4), pp. 2310-2323, 2008.



[FIGURE 2] Coupe médiosagittale obtenue à partir d'images aux rayons X du conduit vocal pour 3 réalisations de la voyelle /a/ (les courbes en traits continus ou pointillés de la vignette de gauche), et 3 solutions obtenues par inversion à partir du signal acoustique d'une voyelle /a/ réalisée par le locuteur correspondant aux images aux rayons X (les 3 vignettes de droite).

moteurs des mouvements des muscles mis en jeu dans la prononciation sans atteinte des fonctions mentales.

Les dysarthries sont schématiquement caractéristiques de certains symptômes associés aux grandes familles d'affections neurologiques ayant une influence plus ou moins grande sur la production de la parole : rigidité, incoordination, paralysie et spasmes.

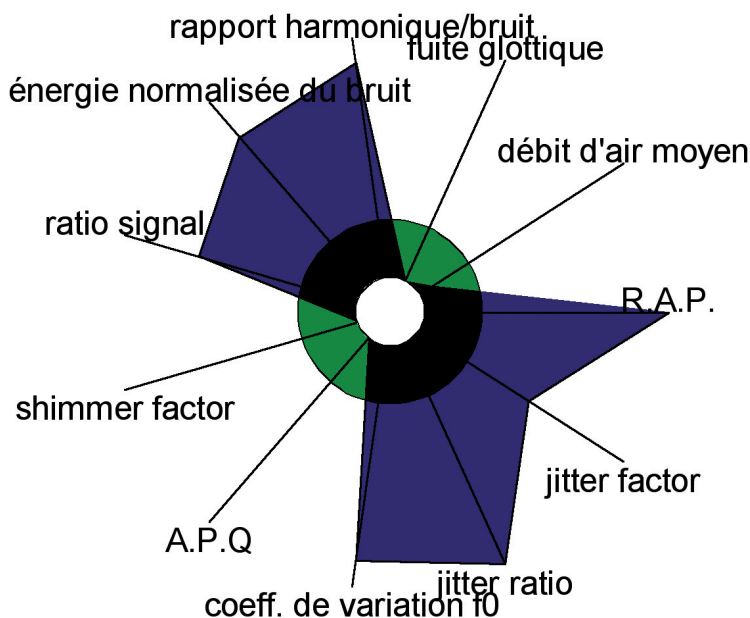
Les dysarthries affectent la production verbale des patients sur les aspects qui se rapportent d'une manière générale à l'intelligibilité, tels que la netteté et la précision des voyelles et des consonnes, la réalisation de groupe de consonnes (coarticulation). La prosodie est affectée à travers la facilité du discours, la longueur des pauses, les changements de rythme et dans son maintien au niveau mélodique ou accentuel.

Les dysarthries des coordinations pneumo phoniques et des muscles intrinsèques et extrinsèques du larynx, provoquent des dégradations de la voix appelées dysphonies. Ces dysfonctionnements vocaux peuvent également être la conséquence de changements morphologiques de l'anatomie du larynx, (souvent provoqués au niveau de la glotte, par un forçage vocal perma-

nent ou brutal), la génération d'un excès de tissus biologiques, ou à l'inverse, des manques anatomiques provoqués par des gestes chirurgicaux.

Les dysphonies correspondent à des anomalies de la vibration des cordes vocales. Elles ont pour conséquence une dégradation de la qualité de la voix qui peut aller d'un léger enrrouement à l'impossibilité totale d'émettre un son. La voix est affectée au niveau de sa qualité générale, et plus particulièrement, de sa force, son timbre, sa raucité, son souffle, son forçage et sa stabilité.

Les « acousticiens de parole » interviennent dans les études sur la parole pathologique particulièrement dans deux domaines ; la modélisation des phénomènes physio pathologiques et l'évaluation objective des dysfonctionnements. Ces activités nécessitent pour être productives une bonne collaboration entre les scientifiques et les cliniciens. En France, sans être exemplaire elle monte en puissance depuis quelques années comme en atteste la tenue des « Journées de phonétique clinique » organisées tous les deux ans à l'initiative de l'AFCP.



[FIGURE 3] Exemple du profil vocal de la voix d'un patient dysphonique souffrant d'un kyste sur une corde vocale. Ce diagramme permet de synthétiser de manière qualitative l'importance relative de tous les indices acoustiques et aérodynamiques objectifs, mesurés simultanément lors de la production d'un « A » tenu. Cette représentation polaire utilise un système de coordonnées circulaires où la place de chaque indice est donnée par un angle et son amplitude par la longueur d'un rayon. Le cercle de rayon maximum, représente la limite supérieure de pathologie et le petit cercle, la valeur des indices, frontière de normalité. On constate dans cet exemple, une grande instabilité de la fréquence fondamentale responsable de la raucité de la voix, attestée par les fortes valeurs des indices RAP, Jitter et varia Fo. On constate également de fortes valeurs des indices de bruit dans le signal vocal démontrant une voix soufflée et au timbre dégradé.

Liste (non exhaustive) des principaux laboratoires traitant de la parole en France

- Institut de recherche en informatique de Toulouse - www.irit.fr
- Laboratoire d'informatique de l'Université du Maine, Le Mans - <http://www.lium.univ-lemans.fr/fr/content/bienvenue>
- Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications, Nancy - www.loria.fr/
- Département du signal et des image, Télécom Paris - www.telecom-paristech.fr/recherche/traitement-signal-image/
- Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur, Orsay - www.limsi.fr/
- Laboratoire d'informatique d'Avignon - www.lia.univ-avignon.fr/
- Lutheries acoustique musique de l'Institut Jean Le Rond D'Alembert, Paris - www.lam.jussieu.fr/
- Institut de recherche et coordination acoustique/musique, Paris - www.ircam.fr
- Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires, Rennes - www.irisa.fr/metiss
- EURECOM, Sophia-Antipolis - www.eurecom.fr
- France Telecom R&D, Lannion
- Laboratoire parole et langage, Aix en Provence - www.lpl.univ-aix.fr
- Gipsa-Lab, département parole et cognition, Grenoble - www.gipsa-lab.inpg.fr
- Laboratoire dynamique du langage, Lyon - www.ddl.ish-lyon.cnrs.fr/
- Équipe de recherche en syntaxe et sémantique, Toulouse - www.univ-tlse2.fr/erss/
- Laboratoire d'information de Grenoble, Grenoble - www.liglab.fr/spip.php?article97
- Institut de linguistique et phonétique générales et appliquées, Paris - www.cavi.univ-paris3.fr/ilpga/ilpga/
- Institut de phonétique de Strasbourg et Équipe d'accueil 1339 - Linguistique, langues et parole (LILPA), Strasbourg - www.misha.fr/IPS/
- Praxiling, Montpellier - <http://praxiling.univ-montp3.fr>
- Laboratoire Jacques Lordat, Toulouse - <http://w3.lordat.univ-tlse2.fr/web/>
- LEAPLE, Villejuif - <http://www.vjf.cnrs.fr/clt/>
- Laboratoire de psychologie et neurosciences cognitives, Boulogne-Billancourt - www.psychu.univ-paris5.fr/spip.php?article2005
- Unité de neuroimagerie cognitive, Saclay - www.unicog.org/
- Laboratoire de linguistique, Nantes - http://www.lettreslangages.univ-nantes.fr/90699/0/fiche_laboratoire/