

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

ECOLE DOCTORALE «LANGAGES, ESPACES, TEMPS, SOCIETES»

Thèse en vue de l'obtention du titre de docteur en

PHONETIQUE

LES FORMES AERIENNES DES SONS DU LANGAGE

Contribution à la mise en évidence des morphologies
spécifiques des turbulences phonatoires externes
Une approche morphodynamique et acoustique

Présentée et soutenue publiquement par

Serge MAINTIER

Le 20 décembre 2007

Sous la direction de M. le Professeur Jean-François P. BONNOT

Membres du jury:

M. Christian ABRY, Professeur de phonétique expérimentale à l'université Stendhal de Grenoble,
Rapporteur

Mme Sylviane CARDEY, Professeur de linguistique (TAL) à l'université de Besançon

M. François LUSSEYRAN, Chargé de recherche HDR en mécanique des fluides au CNRS,
LIMSI d'Orsay, Rapporteur

M. Michel ROGER, Professeur en aéroacoustique à l'Ecole Centrale de Lyon

Sommaire

Sommaire	1
Introduction	3
Première partie : contexte théorique	
Chapitre I – Le phénomène des tourbillons dans la nature	19
Chapitre II – La phonation, le larynx et la turbulence	47
Deuxième partie : Rares recherches sur les formes aériennes des sons du langage à la sortie de la bouche et aspects théoriques	
Chapitre III – Les recherches de la pionnière Johanna Zinke: les formes aériennes des sons du langage	98
Chapitre IV – Les recherches de Boris Rybak et les turbulences phonatoires externes	133
Troisième partie : approche expérimentale	
Chapitre V – Objectifs, méthode, protocole expérimental	169
Chapitre VI – Analyses descriptives: morphodynamique et acoustique	191
Conclusion et perspectives	249
Table des matières	263
Bibliographie générale	269
Annexes I, II, III, IV	intégrées à cette thèse 1 à 83

Introduction et motivation de cette recherche

Objet de cette étude

L'objectif principal de notre travail de recherche est de vérifier les observations de Johanna Zinke qui a été, dès 1962, la première à mettre en évidence des « *formes aériennes des sons du langage* » à la sortie de la bouche. Parallèlement à l'émission d'un son, d'une syllabe ou d'un mot de plusieurs syllabes pendant l'acte de la parole, une « forme aérienne en mouvement » ou « morphodynamique » apparaît devant la bouche de manière structurée, avec une enveloppe globale bien différenciée et cela de manière reproductible.

Zinke a étudié ces formes aériennes des sons pendant une vingtaine d'années. Nous avons donc beaucoup expérimenté pour visualiser une partie des sons étudiés par Zinke et surtout pour élargir certains aspects de ses recherches.

Nous avons travaillé plus spécialement sur la segmentation naturelle et le développement morphodynamique de ces formes et avons essayé d'en faire apparaître des corrélations avec le développement acoustique par une analyse oscillographique, chose que n'avait pas faite la pionnière Zinke, ni le biophysicien Rybak qui avait lui aussi, en 1980, visualisé quelques-unes de ces formes par strioscopie. Il nomma à l'époque ces phénomènes aérodynamiques et aéroacoustiques reproductibles dans un langage plus scientifique : *les turbulences phonatoires externes*.

Vu la nature aérodynamique, morphodynamique de notre sujet nous donnons la partie centrale et expérimentale de notre travail (3^e partie) sur un support numérique cinématographique (DVD d'1h30) accompagnant notre thèse écrite qui est contenue dans un CD-ROM.

Le lecteur de cette thèse devra visionner notre film DVD, sur son ordinateur de préférence ou sur un écran de télévision, *au fur et à mesure des chapitres et des endroits qui lui seront indiqués*.

Rares recherches sur ce sujet

Sur le plan théorique on ne trouve presque rien sur ce sujet. À l'heure actuelle, il n'y a, à notre connaissance, que les deux chercheurs précédemment nommés qui ont réellement travaillé sur les formes aériennes des sons du langage à la sortie de la bouche, qui les ont nommées et essayé de les saisir conceptuellement. Nous avons donc fait un travail de recherche de leurs

travaux que nous avons alors étudiés dans le détail. Nous en donnons un résumé fourni, chose qui pourra être utile à d'autres chercheurs intéressés. Ce travail nous a permis de voir aussi ce qui nous semblait être mis en évidence deux fois encore dans ces formes aériennes des sons.

- Dès les années 1961, Zinke, comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, a surtout étudié les « formes aériennes », les morphologies dynamiques à bordure globale de *sons isolés*. Dans notre mémoire de D.E.A. (1999-2000) nous avons présenté les principes de sa recherche et un choix de quelques formes aériennes de voyelles et de consonnes. À l'époque, nous n'avions pas encore le matériel photographique souhaité. Depuis, des prises de vue de Zinke ont été cataloguées comme dans une sorte d'alphabet et publiées en Allemagne dans un ouvrage qui lui est consacré. Nous avons pu personnellement rencontrer la fille de Zinke. Elle nous a offert un choix de photographies originales de la recherche de sa mère et quelques articles en allemand inédits jusqu'à ce jour. Nous pouvons ainsi consacrer un chapitre entier, le chapitre III, à l'historicité du travail de Zinke, documenté par de nombreuses visualisations. Cela rendra l'ampleur de ce qu'a accompli cette pionnière solitaire qui a vu, vers la fin de sa vie, des physiciens et des mécaniciens des fluides s'intéresser à son travail et lui apporter leur support technique.

Il est regrettable qu'elle n'ait commencé à faire une recherche acoustique et donc phonétiquement convaincante que vers la fin de sa vie. Zinke a fait certaines observations extrêmement étonnantes mais qui sont encore aujourd'hui inexplorées et donc incomprises, comme le lecteur de cette thèse pourra le remarquer.

- A partir de 1971, Boris Rybak, biophysicien, spécialiste du coeur et des poumons, indépendamment de Zinke et sans aucune connaissance de son travail, était lui aussi sur la piste de ces morphologies aérodynamiques des sons. De par ses propres conceptions sur le fonctionnement de la parole, avant tout physiologiques, Rybak s'attendait à trouver *des structures tourbillonnaires* itératives pour les sons, les syllabes du langage. Il a pu les mettre en évidence en 1980, grâce au moyen technologique sophistiqué de la strioscopie interférentielle. Il nomma alors ces formes aériennes des sons du langage à la sortie de la bouche : *turbulences phonatoires externes (external phonatory turbulences)*. Mais il ne s'est pas attardé sur l'étude de ces morphologies. Son objectif principal était la mise en évidence *de microstructures spécifiques des circonvolutions de la surface de la langue pendant la formation de chaque phonème*. Ses recherches et découvertes sont malheureusement peu

connues dans le monde de la linguistique ou mal comprises. Lors de notre première visite à Paris il nous a montré un film de ses prises de vue faites en strioscopie. Il nous présenta une autre fois un appareillage de sa conception (V.A.P.) et nous en fit une démonstration lors d'une séance à laquelle le mécanicien des fluides François Lusseyran, du LIMSI d'Orsay, était aussi présent.

Nous donnons l'historicité des recherches et des conceptions originales de Rybak de manière très détaillée car elles forment une base théorique qu'on ne saurait ignorer et avec laquelle on doit se confronter pour essayer de comprendre les formes aériennes des sons du langage.

Le chapitre IV est devenu un peu un hommage à Boris Rybak qui est décédé en octobre 2003, à 82 ans, alors qu'il était toujours aussi actif et productif.

Il nous faut faire référence ici à un troisième chercheur de pointe qui lui travaille dans le domaine de l'aéroacoustique :

- Xavier Pelorson. Nous lui avons rendu visite, à l'Institut de la Communication Parlée de Grenoble en 2001, et lui avons présenté, ainsi qu'à ses collègues Pierre Badin et Jean-Luc Schwarz, un film vidéo (25 images/sec) de la première étape de nos recherches. A l'époque nous n'avions pas encore mis en évidence des détails morphodynamiques pertinents, faute d'éclairage au laser et de caméra ultrarapide.

Pelorson nous indiqua un chercheur peu connu, Rybak, qui avait travaillé sur ces formes aériennes.

Pelorson étudie entre autres le comportement du flot glottique. Il a mis en évidence le caractère turbulent, non linéaire, donc chaotique, des écoulements aériens dès leur passage au travers de l'espace glottique. Il ne s'est intéressé à ces structures turbulentes à la sortie de la bouche, jusqu'à maintenant apparemment que de manière sporadique, dans le but de vérifier que l'on constate aussi *des phénomènes de turbulence à la sortie des lèvres*.

Mais c'est aussi dans certains domaines limitrophes - comme les recherches sur les tourbillons dans les « lames d'air » de tuyaux d'orgue - que nous avons trouvé des travaux permettant d'éclaircir un peu notre sujet. (Chapitre II, 6.)

Démarche

Notre travail s'est étalé des années 2000 à 2007 parallèlement à l'exercice de notre profession libérale entre deux pays.

Nous avons été assez seul dans cette entreprise, vu que presque personne ne s'intéresse encore à ce domaine particulier de l'aérodynamique de la parole, domaine qui, pour le courant principal de la recherche en linguistique semble inintéressant. Ce domaine relève aussi de la mécanique des fluides et plus spécialement de l'aérodynamique et de l'aéroacoustique, tout comme de la phonétique.

Comme nous l'avons précisé plus haut, il était évident que si nous voulions montrer le bien-fondé des formes aériennes des sons du langage telles que Zinke - et Rybak en partie - les avait mises en évidence, il nous fallait, après les avoir revérifiées, les mettre *en relation avec leurs structures acoustiques, phonétiques*. Cette tentative représente en soi une étape pionnière.

Nous avons rencontré un cinéaste intéressé par notre sujet : l'aspect professionnel des prises de vue, au départ avec une caméra 25 images/s, était ainsi bien résolu. Puis nous nous sommes mis à la recherche de nos locuteurs : des jeunes d'une vingtaine d'années, tous fumeurs, puisque nous utilisons la fumée de cigarettes d'eucalyptus comme ensemencement de l'air expiré.

Dans nos séances de faisabilité nous avons retrouvé pour les cinq voyelles [a,e,i,o,u] et pour plusieurs consonnes les mêmes formes aériennes qu'avait photographiées et filmées Zinke.

Alors nous avons abordé, avec plusieurs locuteurs, des séries de syllabes *en coarticulation de manière systématique* - donc pas seulement des sons isolés - chose essentielle en phonétique et que n'avait pas faite Zinke: [ba,be,bi,bo,bu] puis [bak,bèk,bik,bOk ,buk].

Nous avons longuement travaillé sur ce corpus, sur le découpage de la segmentation naturelle morphodynamique qui se présentait à nous. Ces analyses descriptives morphodynamiques sont dans le DVD : 3e et 4e parties.

Parallèlement à ce travail nous avons pris contact avec un laboratoire de mécanique des fluides, le LIMSI d'Orsay, et rencontré un chercheur intéressé et disposé à nous soutenir pour

la prochaine étape déterminante pour cette recherche : la visualisation en tomoscopie (éclairage par nappe de laser) des formes aériennes des sons.

Après plusieurs séances d'installation et de prises de vue nous avons constaté que les résultats étaient encourageants.

Mais pour l'élaboration d'un corpus sur lequel nous voulions travailler afin de mettre en évidence des transitions qui n'apparaissaient pas clairement avec seulement 25 images/s et un éclairage de photographe au tungsten, une nouvelle étape était encore indispensable.

Ceci nous fut rendu possible grâce à la location d'une caméra 100 images/s, synchronisée sur notre prise de son. Nous avons concentré alors notre travail sur les deux syllabes [bak, bək] prononcées par deux locuteurs. Une fois ce corpus obtenu et le traitement de ces données réalisé, nous avons pu entreprendre des analyses descriptives *morphodynamiques et acoustiques*.

Vu que ce champ d'observation est encore très inhabituel nous avons fait le découpage minutieux au 1/100 s d'une syllabe [bək]. Cela peut paraître rébarbatif, mais il nous fallait étudier ces formes dans le détail. Nous présentons le résultat de ce travail dans la **4^e partie** du DVD et dans sa totalité dans le CD-ROM. Il nous semble avoir réussi à mettre en évidence la corrélation entre la segmentation naturelle des morphodynamiques et la structure des événements acoustiques leur correspondant.

Il ne s'agissait pas pour nous de nous limiter à « une recherche appliquée », avec une intention utilitaire au départ, mais d'aborder par une démarche phénoménologique descriptive cet aspect reproductible de la parole et du langage.

Comme toute recherche fondamentale dans un domaine nouveau, il nous faut d'abord constater les phénomènes, les mettre en évidence, décrire comment ils se présentent, montrer leur reproductibilité, en faire ressortir si possible des caractéristiques, des « traits distinctifs » ou éléments constituants, pour peu à peu les comprendre. Pour arriver à en définir des paramètres, il nous aurait fallu avoir un matériel logistique approprié et la collaboration d'une équipe interdisciplinaire. Mais ceci concerne peut-être des perspectives de ce travail.

C'est souvent le sort de toute recherche nouvelle, qui explore des domaines inhabituels, d'être d'abord regardée de côté ou de travers avant d'être prise en considération. Cela peut parfois

durer des années.

Un exemple de recherche qui a été faite dans un domaine linguistique inexploré jusqu'en 1966 environ est celui de *la synchronie interactionnelle ou microkinésie*.

Ce champ de recherche fondamentale et phénoménologique est d'autant plus intéressant qu'il a été étudié aux USA, principalement par William Condon, à peu près à la même époque où Zinke, en pionnier solitaire, faisait ses recherches sur les formes aériennes des sons et que Lorentz, le météorologue, développait sa théorie du chaos et des attracteurs étranges.

De nombreuses observations sur les micromouvements du locuteur et de l'auditeur pendant l'interaction langagière ont été filmées, analysées et documentées par Condon entre les années 1966 et 1980 (voir Annexe I sur la microkinésie). Une grande partie de ses observations, visualisations et analyses ont été confirmées sur des nouveau-nés par une équipe japonaise, en 1984, et ce, avec des moyens technologiques très sophistiqués (Annexe I). Et pourtant, ces découvertes sont encore mal comprises et à peine prises en compte dans le monde de la linguistique, de la pédagogie et de la thérapie. On confond parfois d'ailleurs la microkinésie avec la microkinésithérapie ou la kinésiologie.

Nous nous permettons ici une remarque personnelle vu qu'elle fait partie intégrante du cheminement de notre recherche.

En été 2002, à Denver, Colorado, lors d'un colloque international sur la voix en biophysique et biomécanique, nous avons présenté un poster et un extrait de notre premier film d'essais de faisabilité. Sur le chemin du retour, à Boston, nous avons rendu visite à Condon qui nous a aimablement accueilli et expliqué le comment de sa découverte et de ses recherches. Nous lui avons présenté quelques formes aériennes des sons du langage. Il nous conseilla de procéder de manière phénoménologique, comme il l'avait fait, et d'essayer de trouver des paramètres pertinents qui mettraient en évidence des corrélations entre les structures morphodynamiques et les structures du signal acoustique.

Motivation

Ce sujet de recherche nous est apparu sur notre chemin d'expériences professionnelles quotidiennes et pratiques avec *la substance de la parole* et son impact sur le développement personnel et la santé d'enfants et d'adultes.

Après une longue expérience pédagogique comme enseignant de langues vivantes avec des élèves de tous les âges, du primaire à la terminale, puis des études d'art dramatique et de diction, nous avons travaillé à la formation continue des enseignants: voix, respiration, stature, gestes, diction, poésies, prise de parole, théâtre.

Les rapports entre la motricité fine, les gestes et la motricité articulatoire nous sont apparus toujours plus clairement au cours des années. Ce fut d'ailleurs en partie le thème de notre maîtrise : « *Voix-Langage-Poésie. Présentation d'une méthode artistique pour l'éducation vocale des enseignants* ».

Encouragé alors par nos professeurs d'université à faire un travail de recherche, nous avons choisi comme thème pour notre diplôme d'étude approfondie celui des rapports entre les gestes et la parole. Le sujet en était *les modalités kinésiques de l'être humain et leurs rapports avec les formes aériennes des sons du langage*. Nous avons fait une recherche sur de nombreuses études concernant les rapports entre mouvement et parole des années 60 aux années 2000. Notre intention de l'époque pourrait se laisser résumer ainsi : la longue *marche* vers la *manifestation* de la parole... *oralisée*. La *marche*: la marche bipède, l'équilibre instable et la libération de la respiration et des membres supérieurs. La *manifestation*: l'expression de la *main* libre, le rôle du pouce et des doigts, puis la place du larynx et le rôle de la langue dans la cavité buccale qui module et modèle la substance aérienne respiratoire. C'est là que nous présentions quelques formes aériennes et leurs principes.

Ce travail était un regard global, une tentative de montrer les rapports entre la marche, les mouvements, les gestes, la main et la parole. Dans l'annexe I nous en donnons un condensé, élargi et approfondi ces dernières années. Il donne un cadre conceptuel plus général ainsi que différentes considérations d'anatomie fonctionnelle et de physiologie sur l'organe de la langue, les bandes ventriculaires... en rapport avec des questions soulevées tout au long de cette thèse.

Depuis une quinzaine d'années nous animons des stages pour des éducatrices, des orthophonistes, des conseillères parentales de la prime enfance et des jeunes parents. Dans ces ateliers, en français comme allemand puisque nous travaillons dans les deux cultures, nous abordons sous forme artistique et pratique un répertoire de comptines, de jeux de doigts et de poésies pour accompagner de manière saine le développement langagier des jeunes enfants. Qu'une « simple » comptine, qu'un jeu de doigts parlé puisse avoir un impact sur la santé de

l'enfant surprend, enthousiaste et donc motive les éducateurs et les jeunes parents à faire vivre ces poésies et comptines avec *une plus grande conscience*. Ces petits moments poétiques, langagiers donc interactifs et réguliers ont un effet « salutogénétique », comme on le dit depuis une vingtaine d'années en médecine, ou préventif pour parler en terme de santé publique. On trouve dans les recherches actuelles en neurosciences et en psycholinguistique suffisamment d'éléments pour monter le bien fondé et la profondeur des comptines, des jeux de doigts populaires et modernes, de la poésie même, si l'on sait *faire les liens* entre ces résultats scientifiques et la substance de la parole, de la poésie et de la nature humaine.

Paradoxalement ces découvertes sont faites à une époque où la vie du langage se tarit, se meurt. Les cabinets d'orthophonistes débordent et de nombreux enfants ont des problèmes graves d'élocution comme de construction du langage, tout comme de coordination des mouvements, d'orientation, de motricité fine. (30 à 40 % dans les classes en Grande-Bretagne, en Allemagne à l'époque où nous nous enseignions dans les classes. Nous n'avons pas trouvé d'étude longitudinale pour la France.) Toute la culture enfantine des jeux de doigts, des poésies des cours d'écoles, se retrouve dans les livres d'orthophonie ou de psychomotricité. Ce qui était naturel il y a quelques décennies est devenu aujourd'hui thérapie, rééducation. Même la gymnastique, l'éducation physique, disparaissent dans les programmes des petites classes au profit des sports, alors que les jeunes enfants n'ont pas encore construit pleinement leur corps.

Puis les dernières années nous avons été amené à participer à des congrès de dentistes et de médecins en y donnant des ateliers sur la parole et les mouvements. Les questions des dentistes viennent du fait qu'ils rencontrent toujours plus d'enfants sans respiration nasale, avec une « paresse linguale » et des mauvais placements de dents (mal occlusion). Quant aux médecins, ce sont surtout les cas de plus en plus fréquents d'enfants asthmatiques qui les font nous interpellé.

Et nous voici au cœur des motifs qui nous ont poussé vers notre sujet: les liens entre la parole et les gestes, la motricité ou, exprimé d'une manière plus synthétique, entre « l'homme respiratoire, aérien » et « l'homme de mouvements ».

Quand nous avons pris connaissance par un ami médecin des premières photographies des formes aériennes des sons du langage de Zinke il était clair qu'il nous fallait approfondir cette

couche sous-jacente de la parole de telle sorte que son importance puisse ressortir et éveiller l'intérêt et le soutien de scientifiques de branches concernées: phonéticiens, psycholinguistiques, aérodynamiciens, aéroacousticiens, médecins, artistes et pédagogues...

Les perspectives que nous ouvre - ou ouvrirait - l'étude de telles morphodynamiques sont d'après nous multiples.

Sur le plan physique : en approfondissant ce sujet nous nous sommes rendu compte que nous entrons dans un champ de phénomènes aérodynamiques extrêmement complexes mais très actuels.

Sur le plan aéroacoustique de la cavité buccale : là presque tout reste à faire.

Sur le plan physiologique: Rybak en a tracé la voie. Les perspectives dans le domaine de l'éducation et de la thérapie s'y laissent entrevoir.

Nous suggérons d'autres perspectives dans notre conclusion.

« Il est étrange que, parmi toutes nos disciplines instituées, nous n'ayons pas encore une science de la voix... Elle embrasserait en effet, au-delà d'une physique et d'une physiologique, une linguistique, une anthropologie et une histoire. Élément le plus subtil et le plus malléable du concret, le son n'a-t-il pas constitué, ne constitue-t-il pas encore, dans le devenir de l'humanité comme dans celui de l'individu, le lieu de rencontre entre l'univers et l'intelligence? Or la voix est vouloir dire et volonté d'existence » (Zumthor, 1983:11).

Présentation de notre recherche et du phénomène

« *DVD : 1^e partie* »

« *Mais la voix n'est pas seulement de l'air, mais de l'air modelé par nous, imprégné de notre chaleur et enveloppé comme d'une espèce de peau par la vapeur de notre atmosphère intérieure dont quelque émanation l'accompagne et lui donne une certaine configuration et de certaines propriétés propres à faire de certains effets sur les esprits* ».

Joubert, J. (Journal, 10 mars 1799)

«... *il s'agit de prendre les sons, les phonèmes, comme ils sont dans l'air*».

Gibson, J.J. (1966) fondateur de l'écologie de la perception.

Remarque

Les deux citations invitent à une démarche phénoménologique. C'est pour cette raison, qu'avant de présenter les recherches et les conceptions de Zinke (Chap.III) et de Rybak (Chap.IV) sur les formes aériennes des sons du langage, nous proposons au lecteur de cette thèse de faire une première et courte rencontre avec *ce phénomène aérodynamique de la phonation, phénomène apparemment simple*, en regardant la **1^e partie** du DVD après avoir lu ces quelques lignes d'introduction.

La segmentation aérodynamique obtenue par une analyse descriptive des « enveloppes globales » sur nos visualisations à 25 images/s donne une impression que l'on pourrait qualifier au premier abord de générale ou peut-être d'imprécise car macroscopique. Mais ce n'est pas le cas, puisque dans la dernière étape de notre travail, grâce à la tomoscopie (éclairage par une nappe de laser) et une caméra 100 images/s, ces « morphodynamiques », c'est-à-dire ces formes aériennes des sons à bordure globale en mouvement ainsi que leur segmentation, ont été revérifiées. De plus le laser et la caméra 100 images/s nous ont rendu possible la mise en évidence de *structures aérodynamiques intrinsèques* encore plus subtiles qui nous font prendre conscience de la richesse des informations imprimées dans cet air phonatoire.

Ce film d'1 h 30 est le fruit d'un travail de plusieurs années et il rend compte d'une certaine construction et progression. Nous expliquons dans la troisième partie la raison de cette progression.

Au fur et à mesure des chapitres et à des endroits *qui lui seront indiqués*, le lecteur devra *visionner notre film DVD*, sur un écran d'ordinateur de préférence, muni d'enceintes pour le son, chose importante, ou bien sur un écran de télévision, mais avec un risque de perte de taille de l'image.

Comme vue d'ensemble :

Contenu du DVD entier (qu'on retrouve dans le menu)

1^e partie : Présentation de notre recherche et du phénomène (7 min)

2^e partie : Analyses morphodynamiques -A (17 min)

3^e partie : Analyses morphodynamiques - B (21 min)

4^e partie : Morphodynamique et acoustique (40 min)

5^e partie : Turbulences et phonétique (7 min)

6^e partie : ...pour finir ! (et avec nos remerciements) (4 min)

À cette étape de notre thèse :

« DVD : 1^e partie » : Présentation de notre recherche et du phénomène (7 min)

- Présentation de notre recherche: elle se recoupe en partie avec l'introduction à notre thèse écrite mais en apportant d'autres nuances. Elle était nécessaire pour introduire ce travail filmé.
- Présentation du phénomène : Ce sont les visualisations de quatre mots, prononcés par une locutrice et un locuteur qui ont inhalé de la fumée d'eucalyptus auparavant. Ils ont été filmés à 25 images/s. Une répétition au ralenti de chaque mot, sans le son, permettra au lecteur de découvrir par lui-même une sorte d'articulation, de segmentation naturelle dans le « souffle parlé » de ces jets tourbillonnaires de l'air phonatoire.

Lecture du DVD : 1^e partie !

Après la lecture : *On voit, répartis dans l'espace sous forme de petits nuages, de bouffées d'air structurées et clairement segmentées, ce qui semble être l'empreinte des événements articulatoires et acoustiques de la parole que l'oreille distingue, même si chaque syllabe dure à peine une seconde.*

Diverses réactions à la rencontre de ce phénomène des formes aériennes des sons

Pour beaucoup d'observateurs c'est d'abord une surprise. Puis, quand on échange sur ce phénomène, il en ressort pour ces mêmes observateurs qu'il est « naturel et logique » qu'on retrouve des formes qui ont été modelées dans la bouche pendant l'acte de la parole.

Certes d'autres personnes disent aussitôt qu'il y a des déformations dues aux lèvres ou aux dents, donc que ces formes sont certainement très aléatoires. Ce sont certains « spécialistes » qui ne se laissent pas le temps d'observer le phénomène.

D'autres, linguistes ou techniciens, viennent et posent la question de l'utilité d'un tel phénomène. « Qu'est-ce que cela nous apporte de plus sur la phonation, c'est un simple épiphénomène, tout vibre quand nous parlons, même la racine de nos cheveux ! ». Un épiphénomène étant un phénomène associé à un processus. C'est un effet secondaire qui n'a aucune influence sur la source qui l'a provoqué. La seule grande différence pour la parole c'est que le tremblement des cheveux par la conduction osseuse des vibrations acoustiques de la parole n'est vraiment qu'un effet secondaire, alors que la substance de l'air pour l'être humain est facteur de sa respiration et de la génération du son dans le larynx. Les formes aériennes qui sortent de l'orifice buccal sont donc liées à la production des sons de manière beaucoup plus directe et intrinsèque que le tremblement des cheveux sur notre crâne.

Nous avons même entendu : « A quoi ça sert ? », question peu scientifique, nous semble-t-il, en tout cas pour la recherche fondamentale.

D'autres y reconnaissent des tourbillons connus dans leur soufflerie d'aéronautique et se montrent très intéressés, surtout par les enveloppes globales reproductibles et bien structurées. Ce sont des mécaniciens des fluides.

D'autres posent tout de suite la question : « Ne pourrait-on pas mettre ainsi en relief les différences entre les langues: *Baum* est une autre image sonore et plastique, une autre image respiratoire-phonatoire, une autre représentation mentale qu'*arbre* ou que *tree* ou que « *diéréva* » ? Cela devrait se refléter dans ces formes aériennes en mouvement. ». Ce sont des linguistes qui parlent, ceux qui connaissent et aiment les « langues vivantes » (le terme xénophobe de « langues étrangères » est un fossile qui se ballade encore ici et là).

D'autres posent la question de l'impact des sons du langage sur la respiration et par là sur la santé des hommes. Car ces formes nous réveillent, nous « ressensibilisent » au fait que c'est avec l'air et en particulier avec notre propre substance de respiration que nous parlons. Cette remarque paraît si naïve, si simple. Peut-être ne faudra-t-il encore que quelques années pour qu'un scientifique nous en donne la signification, le fondement physiologique qui nous fera alors repenser à ces réflexions surgies à la vue de ces formes aériennes en mouvement. Toutes ces remarques viennent des thérapeutes et formateurs de la voix et du langage.

Première partie

Contexte théorique

Chapitres I

Le phénomène des tourbillons dans la nature

« Le plus grand phénomène de la Nature, le plus merveilleux, est le mouvement ».

Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759)

*«...aucune théorie n'a réussi à expliquer comment naissent ces tourbillons et
comment ils progressent ».*

Julien Bourdet (2005, journal du CNRS)



Forme du passage entre l'eau mouvante et l'eau immobile. (Schwenk, 1963: n°54)

Table du premier chapitre

1 La turbulence : énigme toujours actuelle	25
2. La turbulence et les tourbillons	26
3. Vortex ou vorticité ?.....	28
4. Tourbillons, spirales et vortex	31
4.1. Tourbillons libres dans un milieu fluide	31
4.2. Tourbillons libérés à la sortie d'une embouchure ou d'un ajutage	33
4.3. Remarque sur les jets.....	34
4.4. Les jets tourbillonnaires pulsants	35
4.5. Tourbillons créés par des obstacles au sein d'un fluide	36
4.6. Un type de tourbillons de « contournement » : la turbulence de sillage.	37
4.7. Les allées ou chaînes tourbillonnaires.....	40
5. Une notion de physique : le nombre de Reynolds et la turbulence	41
6. Le chaos et la turbulence	42
7. Les tourbillons et la turbulence comme moyen de locomotion	44
8. Une autre énigme, encore : le son	44

1 La turbulence : énigme toujours actuelle

« C'est dire la complexité de ce phénomène, dénommé certainement pour la première fois turbulence de (*turbulenza*, en italien) par Léonard de Vinci. De nombreux dessins du maître italien représentent en effet les tourbillons formés par l'eau ou par l'air. Depuis, aucune théorie n'a réussi à expliquer comment naissent ces tourbillons et comment ils progressent. »

Julien Bourdet (2005, journal du CNRS)



Figure n° 1 : Tourbillons (Léonard de Vinci, Wikipedia, 2007)

Si un spécialiste du CNRS, en 2005, résume les recherches et les travaux en mécanique et dynamique des fluides par ces mots, on comprendra encore mieux que notre intention, en tant que spécialiste formateur de la voix parlée, n'est pas d'apporter des explications et des modèles qui relèvent de la mécanique des fluides.

Mais en explorant de manière phénoménologique les turbulences phonatoires externes pendant l'acte de la parole nous avons rencontré des processus tourbillonnaires avec lesquels il nous a fallu nous familiariser peu à peu et qui font aussi partie du champ de recherche de la mécanique et de la dynamique des fluides.

Nous donnons ici une esquisse des principales formes tourbillonnaires que l'on retrouve en grande partie dans les formes aériennes des sons du langage.

D'abord un peu d'humour dans le monde des définitions, ici dans l'encyclopédie libre Wikipedia, sur l'Internet :

« *La turbulence : la terminologie est assez **fluctuante**, pour une part à cause de la contamination par l'anglais.* » (Wikipedia, 2007 : Turbulence, Tourbillon,)

Quelques définitions générales données par des spécialistes de la mécanique des fluides et qui montrent combien complexes sont encore aujourd'hui pour notre compréhension ces phénomènes tourbillonnaires sans lesquels la vie ne serait pas possible.

« *On raconte qu'Einstein, à son entrée au paradis, n'aurait eu que deux questions à poser à Dieu, classées par ordre croissant d'importance: 1) comment quantifier la gravité ? 2) **Quelle est la solution à la turbulence ?** Plus récemment, la fondation Clay (S. M. : et encore à ce jour en 2007 avec six autres « problèmes du millénaire ».) a annoncé qu'elle offrirait un million de dollars à celui ou celle qui réussirait à démontrer que la turbulence est un problème bien posé. **Quelle est donc cette entité étrange, dont la tête est mise à prix, et qui obsède nos plus grands savants jusque sur leur lit de mort** » (Farge, 1988)*

« *En mécanique des fluides, la turbulence désigne l'état d'agitation et de désordre que l'on observe dans tout écoulement quand son inertie dépasse un certain seuil. Bien qu'il concerne la majorité des cas pratiques, ce phénomène échappe encore à toute description théorique. Cet échec fut l'un des principaux facteurs d'essor de la simulation numérique qui domine dorénavant les sciences pour l'ingénieur* » (Jacquin, 2006).

2. La turbulence et les tourbillons

La turbulence désigne l'état instable, chaotique d'un fluide, liquide ou gaz, provoqué par des différences de température, de pression, de vitesse, de composition chimique etc. telles que des tourbillons y apparaissent, variant constamment leur localisation et leur orientation. Ces tourbillons sont toujours le résultat de la confrontation de pôles antagonistes : chaud-froid, lent-rapide, solide-fluide etc. Quel que soit le matériau dans lequel ils se forment, ils ont tous des propriétés et des structures communes. On en trouve même dans des formations géologiques.

Un exemple simple :



Figure n° 2 : Un écoulement d'eau chaude traversant un récipient plein d'eau froide (Schwenk, 1963:37)

Quand on fait traverser un filet d'eau chaude au travers d'un récipient d'eau froide, ou l'inverse, il se forme des zones de frottement, d'instabilité et une succession de tourbillons apparaît qui se présente comme une structure rythmique presque pulsante. Ces tourbillons se défont ensuite, parfois soudainement, dans une turbulence générale, réalisant ainsi le mélange des deux types d'eau et de leurs températures.

Nous faisons remarquer que ce phénomène simple, la traversée d'un écoulement dans un milieu extérieur à lui, se retrouve dans la projection de l'air phonatoire dans l'air ambiant.

« Si on se focalise sur la physique, on trouve dans les synonymes de la turbulence : dispersion, mélange, dissipation, et dans les antonymes : unité, homogénéité. (...) La turbulence disperse et mélange le milieu où elle se développe. Puis elle s'efface et disparaît une fois produites l'unité et l'homogénéité qu'elle a favorisées.

*Les applications physiques de la turbulence illustrent alors de nouveau la dualité du phénomène : par exemple, la turbulence augmente considérablement la traînée d'un véhicule en diffusant sa quantité de mouvement et son énergie dans l'espace environnant ; mais elle assure aussi le mélange indispensable à la combustion utilisée pour la propulsion. Voilà donc l'ogre qui avale une bonne part de l'énergie fossile que nous consommons ; mais c'est aussi ce qui mélange le sucre dans nos boissons, ce qui homogénéise la température de nos pièces ou celle de l'atmosphère, ou encore ce qui disperse loin du sol les éléments chimiques mortels produits par l'industrie ou par la nature. **Sans turbulence, la terre serait un caillou stérile.** La*

turbulence est donc au cœur des recherches en sciences de la terre et elle impacte de très nombreuses applications en sciences de l'ingénieur » (Jacquin, 2006).

3. Vortex ou vorticité ?

En français technique le mot vortex représente généralement un tourbillon unique observé par exemple lors de la vidange d'une baignoire, alors qu'en anglais, d'où ce terme technique provient, ce mot a un sens beaucoup plus général.

D'après les ouvrages spécialisés de mécanique des fluides une définition simple et univoque du vortex n'est pas possible. On pourrait dire : c'est le mouvement circulaire d'une pluralité de particules de matière autour d'un centre commun.

« Le tourbillon, parfois appelé vorticité, est une formulation des mathématiques de la dynamique des fluides relié à la quantité de vitesse angulaire ou de rotation que subit un fluide localement. Une façon simple de visualiser le tourbillon est de considérer un fluide en mouvement dans lequel on délimite un petit volume rigide. Si cette parcelle tourne par rapport à un référentiel au lieu de translater, elle tourbillonne » (Wikipedia, 2007: Tourbillon(Physique)).

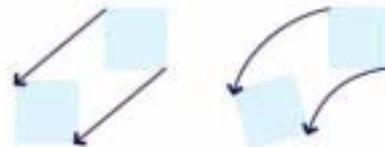


Figure n° 3 : Translation simple à gauche, à droite rotation menant à du tourbillon. (Wikipedia ,2007)

Il faut encore différencier les notions de vorticité et de tourbillon qui sont souvent confondues.

Dans son manuel pour les études en mécanique des fluides, Marcel Lesieur, de Grenoble, donne les explications suivantes :

«... un tourbillon au sens physique, (est) une recirculation, ou un enroulement, du fluide sur lui-même. Les images que l'on peut en donner sont le tourbillon de vidange d'un lavabo ou d'une baignoire, ou encore une tornade... L'exemple le plus simple de tourbillon est un tube immatériel,

c'est-à-dire sans parois solides, de fluide de rayon R , environné de fluide, et tournant en bloc autour de son axe avec la vitesse angulaire Ω (figure ci-dessous)

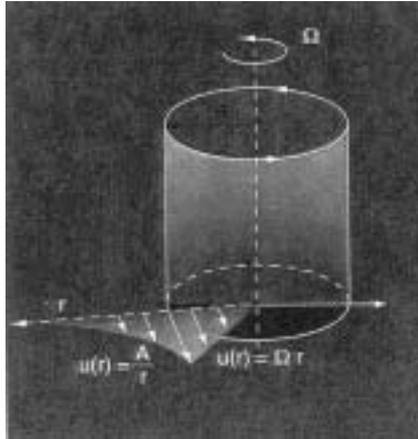


Figure n° 4 : Vitesse des fluides induite par un tube tourbillon de rayon R

Alors, chaque parcelle fluide dans le cylindre tourne autour de l'axe à la vitesse $u(r) = \Omega r$, ou r est la distance de la parcelle à l'axe. Si le fluide extérieur était initialement au repos, on peut montrer mathématiquement qu'il va être mis en mouvement par le tube tourbillon constitué par le cylindre, avec une vitesse proportionnelle à l'inverse de r .

(...) Ce phénomène d'« induction de vitesse » à l'extérieur du tourbillon est essentiel (...). Si l'on crée localement un tourbillon, tout le fluide extérieur à ce tourbillon va être entraîné dans la rotation de celui-ci » (Lesieur, 1994 : 38-39).

Ce spécialiste en mécanique des fluides précise que « la vorticité peut être définie aussi quand il n'y a pas d'enroulement tourbillonnaire dans le fluide. », c'est le cas notamment si la viscosité d'un fluide est trop élevée et que le tourbillon reste potentiel et ne se développe pas. La vorticité correspond alors « dans le cas général, à la vitesse angulaire de rotation d'un tourbillon latent si celui-ci se développait » (Lesieur, 1994: 40)

Quand par exemple un écoulement uniforme dans sa vitesse « arrive au contact d'un obstacle qui, par viscosité, le freine au voisinage de la paroi, la vorticité est engendrée. La vorticité est le germe de la turbulence » (Lesieur, 1994: 40).

À l'inverse, on appelle laminaire le régime d'un écoulement constitué de « lames » régulières et prévisibles.

Dans la nature on ne voit pas les lignes, les courants de déplacement des particules dans ces tourbillons. Il n'est pas toujours facile non plus de rendre ces tourbillons et ces déplacements de courants visibles. On utilise pour cela souvent des colorants tels que l'encre pour les liquides ou bien des spores de lycopode, de la fumée de cigarette pour l'élément aérien.

Les tourbillons restent des énigmes car ce sont des synergies ou des structures faites uniquement de mouvement, d'énergie cinétique. Ils ont un caractère avant tout dynamique, donc invisible au sens habituel du terme.

On ne voit pas le tourbillon derrière une feuille qui tombe d'un arbre en virevoltant. Mais dans un parc ou un jardin, plusieurs feuilles d'automne qui tourbillonnent, poussées - ou aspirées ! - par le vent, nous rendent attentifs à la présence de courants tourbillonnaires qui seraient restés invisibles autrement. Nous réagissons presque toujours avec un certain émerveillement face à ce phénomène simple de la nature car nous prenons conscience de la réalité dynamique et palpable de l'air dans lequel nous baignons comme dans un aquarium, ou mieux dit, comme dans un océan. C'est dans cet océan aérien que nous respirons et que nous vivons sur le plan chromatique, olfactif, acoustique et sonore.

Et même les espaces interplanétaires et interstellaires, que l'on croyait vides, forment un véritable océan énergétique extrêmement différencié et structuré et ce, justement par des processus tourbillonnaires. Le soleil pulse régulièrement comme un cœur et émet en son sein des ondes acoustiques hautement ordonnées (García et Couvidat, 2006). Nous baignons aussi dans le gaz interstellaire qui est ionisé, donc bon conducteur d'électricité, et les effets magnéto-hydrodynamiques - comme on les nomme depuis quelques décennies - y sont importants. Ce « plasma magnéto-hydrodynamique interstellaire » est parcouru de courants et de tourbillons qui se reflètent dans la formation des galaxies par exemple. C'est dans les dernières années seulement, grâce au développement de sondes munies d'appareils de détection ultrasensibles aux champs électromagnétiques, que l'on a mis en évidence ces structures tourbillonnaires magnéto-hydrodynamiques dans lesquelles notre planète baigne et se trouve traversée.

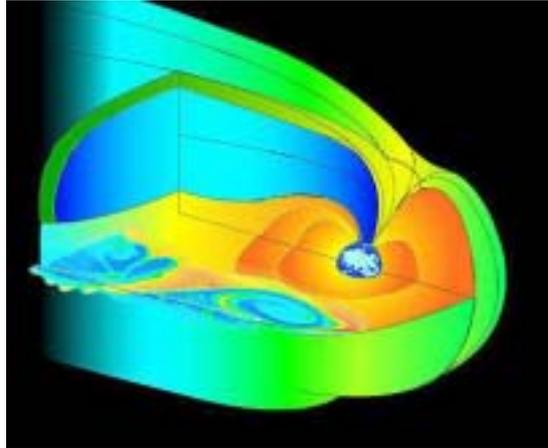


Figure n° 5 : Reconstitution de la magnétosphère terrestre et des ses tourbillons, visibles à gauche, dans la section horizontale de la coupe. Les pointillés blancs dans cette zone tourbillonnaire indiquent le passage des satellites Cluster, qui ont permis leur détection.

(ESA/Hasegawa et al In : Goudet, Futura-Sciences Internet : 17 12 06)

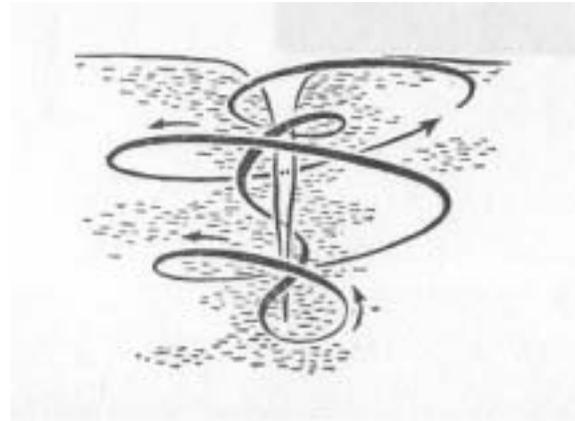
On comprend alors pourquoi Einstein en mélangeant du lait au café de sa tasse observait la « formation des mondes ». De l'infiniment grand à l'infiniment petit ce sont les mêmes forces et formes qui interagissent, même si elles sont réparties à différents degrés.

4. Tourbillons, spirales et vortex

4.1. Tourbillons libres dans un milieu fluide

Observons une truite qui nage: derrière elle on ne voit les tourbillons que si celle-ci s'approche de la surface qui rend alors ces derniers visibles.

En surface les tourbillons sont perçus comme des spirales, chose que l'on retrouvera particulièrement dans nos prises de vue des turbulences provoquées par l'acte phonatoire dans l'éclairage d'une nappe de laser. Mais en réalité les tourbillons sont des structures dynamiques tridimensionnelles : ce sont des volumes.



Figures n° 6 et 7 :

Entonnoir tourbillonnaire

(Schwenk, 1963 :42)

La figure de droite fait ressortir la manière dont le fluide ambiant et avoisinant la structure tourbillonnaire se trouve emporté, structuré, interagissant avec l'axe rotatoire du vortex. Il faut le suivre avec le doigt et imiter ces mouvements pour en prendre réellement conscience, on en ressent même les différentes vitesses. Dans cette structure dynamique, appelée mouvement tourbillonnaire spiralé (toroïdal), sont réunis les trois types de mouvements énergétiques élémentaires agissant dans la nature : le mouvement orbital (la spirale sans fin), le mouvement rotatif (comme la terre autour de son axe) et le mouvement circulatoire (comme les courants magnétiques d'un aimant). (Bartholomew, 2003 :92.)

On sait entre-temps, en hydrologie par exemple, que ce sont ces phénomènes tourbillonnaires qui donnent à l'eau sa structure colloïdale vivante, son oxygénation, pour ne nommer que deux de ses propriétés fondamentales.

Nous connaissons ces vortex isolés dans la vie quotidienne, au fond d'un évier, quand l'eau de vaisselle s'écoule, ou bien, plus spectaculaire et terrible, mais plus rare dans nos contrées, lors de tornades, avec des puissances d'aspiration éolienne allant jusqu'à 500 km/h.

4.2. Tourbillons libérés à la sortie d'une embouchure ou d'un ajutage



Figures n°8 et 9 : Sortie d'un filet de liquide sous l'eau, à deux stades différents (Schwenk, 1963:n°46-47)

L'enroulement est le principe de déplacement de tous les tourbillons. (Bouasse, 1931 : 226)
Ici le jet va à la rencontre du fluide extérieur : leur confrontation dynamique prend la forme d'un champignon. On comprend que le diamètre de ce tourbillon soit plus grand que celui du trou d'où il est sorti : il est formé en partie du courant qui l'alimente et en grande partie du fluide extérieur entraîné, aspiré, par la force rotatoire qui s'est créée pendant cette confrontation. Avec des liquides de couleurs différentes on peut mettre en évidence cette aspiration du fluide extérieur dans les lames spiralées de l'axe central du jet intrusif. (Bouasse 1932 : 318-325)

Différents cas de figure et de formations extrêmement complexes sont possibles, suivant que le jet soit rapide et pénètre dans un milieu calme, ou qu'il soit lui-même lent ou encore qu'il pénètre dans un milieu lui-même rapide et à contre-courant...

Nous rencontrerons dans les jets tourbillonnaires des différentes voyelles, consonnes et syllabes apparaissant dans l'air expiré plusieurs de ces cas de figure. (Voir la 3^e partie de cette thèse et les visualisations dans le DVD)

Dans les trois images suivantes on peut suivre, grâce à la numérotation, des stades intermédiaires.

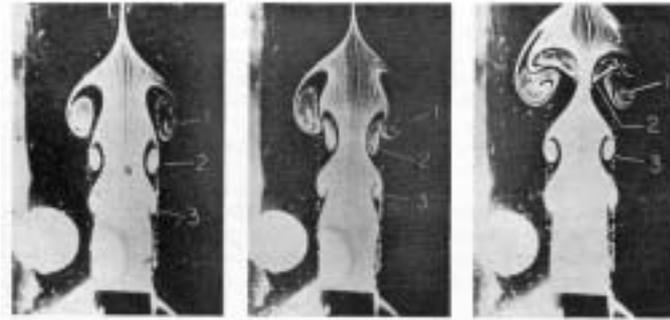


Figure n°10 : Un jet d'eau s'écoulant dans de l'eau par une embouchure en coupe sagittale. (Mueller, 1977)

Ce type de structure tourbillonnaire se trouve à la sortie d'une embouchure. Dans la nature il se présente par exemple comme une source ou comme la respiration humaine sortant de la bouche, voire même le flot phonatoire.

4.3. Remarque sur les jets

Un jet est un écoulement radial produit par un fluide sortant *d'un réservoir sous pression*. Le jet peut sortir soit d'un ajutage, soit d'un trou circulaire percé dans une paroi mince.

A sa sortie le jet ne reste lisse, laminaire, qu'un court instant. Très vite « *l'instabilité, qui est la caractéristique fondamentale d'un jet* » (Bouasse 1932 : 318-325), se met en place, suivant la vitesse de ce jet. Ceci est du en partie à la rencontre, à la confrontation avec le milieu fluide extérieur. La forme limite d'un jet, son « enveloppe », sa morphologie, *dépend surtout de sa vitesse*. Si la vitesse croît, la partie lisse, la queue du champignon, du tourbillon s'allonge. (Bouasse 1932 : 318-325)

Il y a deux sortes d'instabilité :

- *capillaire* : la partie lisse se résout en gouttes, quand le jet entre dans un milieu qui lui est différent : un jet d'eau dans l'air ou dans de l'huile.

Nous pensons à un jet d'eau dans un parc.

- *visqueuse* : un jet d'air dans de l'air ou un jet d'eau dans de l'eau a une instabilité nécessairement visqueuse. Cela entraîne la production d'enroulements, de tourbillons, comme à la sortie d'une cheminée d'usine ou justement à la sortie de l'orifice buccal pendant l'acte de la parole.

Pendant la respiration nous avons plutôt un écoulement, les cordes vocales - ou plis vocaux - ne compressant en rien l'air expiré. Pour la phonation par contre, de forts et rapides changements de pression sont nécessaires pour la production de la voix et des sons et c'est un jet extrêmement complexe qui agit. En fait le jet qui se forme au travers de la glotte correspond à un autre type de jet qu'on appelle un *jet pulsant*.

4.4. Les jets tourbillonnaires pulsants

Ces jets pulsants sont encore très peu étudiés dans la branche de la mécanique des fluides spécialisée dans les tourbillons.

Ce n'est qu'en l'an 2000 par exemple qu'on a réussi à visualiser les jets pulsants tourbillonnaires à l'intérieur des ventricules et des oreillettes du coeur, grâce à la méthode d'I.R.M.

(On trouvera ces visualisations d'un cardiologue de Londres sous le titre « *The fluent heart* » sur Internet et qui figuraient en page de garde de la revue scientifique *Nature*, en 2000. Nous en donnons un exemple dans notre CD-ROM, en annexe).

Le jet aérien qui traverse la glotte et qui provient justement d'un écoulement aérien sous pression est un jet turbulent qui devient un *jet pulsant* turbulent par le fait qu'il est interrompu régulièrement. Ce jet pulsant turbulent est ensuite transformé de manière ultra rapide au travers du conduit vocal pour être de nouveau projeté à la sortie de la bouche dans une variété fort complexe de structures tourbillonnaires à bordure globale.

C'est la raison pour laquelle nous devons caractériser dans cette esquisse différents types de tourbillons car nous les retrouverons en grande partie dans les jets tourbillonnaires correspondant à la formation des voyelles, des consonnes et des syllabes.

Ainsi on comprend mieux les réactions d'étonnement des spécialistes en aéroacoustique face aux visualisations que nous avons soumises à leur jugement. Ils retrouvaient dans des formations tourbillonnaires produites par l'émission de certaines voyelles, consonnes ou syllabes, des structures identiques à celles qui se forment par exemple le long des ailes d'avion ou de fusées étudiées dans leurs souffleries.

Et c'est en mentionnant les ailes d'avion que nous abordons une autre formation de tourbillons.

4.5. Tourbillons créés par des obstacles au sein d'un fluide

Il y a d'autres types de formations tourbillonnaires, très importants dans notre monde technique aujourd'hui. On les rencontre en aéronautique, en nautique, dans l'industrie automobile pour ne donner que quelques exemples.

Ce sont les formations de structures tourbillonnaires *créées par des obstacles au sein d'un courant*.

Cette turbulence, ces tourbillons sont très souvent gênants par leur effet de freinage (jusqu'à 90% pour le TGV) et par la production de bruits indésirables. Nous en avons donné un exemple dans le tout premier dessin de Leonard de Vinci au début de ce chapitre.

Suivant que l'obstacle soit d'une forme cylindrique ou rectangulaire les structures tourbillonnaires prendront des *formes* extrêmement variées. De même la langue prend des *formes en mouvement* extrêmement variées qui provoquent aussi des tourbillons multiples dans le conduit vocal. La langue représente bien *un obstacle au sein d'un courant* aérien.



Figures n°11:L'eau courante rencontre une plaque. n°12 : Lignes de courant que l'eau a inscrites dans le ruisseau en contournant la plaque (l'amont est en haut)
(Schwenk, 1963 :57)

Sur le dessin de gauche l'eau courante rencontre une plaque, il se forme dans le courant une surface de démarcation. Cela pourrait est une pierre qui émerge d'un ruisseau.

« La pierre, dans le ruisseau, fait obstacle au courant. L'eau qui afflue s'incurve des deux côtés de l'obstacle et se divise ; puis elle se referme un peu en aval. En aval de la pierre, il existe une petite aire d'«eau morte », relativement stagnante, séparée du flux rapide qui continue sa course. Entre les deux eaux se forme une surface-limite. Cette surface est le résultat de la composition de deux forces : celle du courant, d'une part, et la force de résistance de la pierre, d'autre part. Il y a alors deux districts : l'extérieur, fait d'un courant plus rapide, et l'intérieur, contenant une eau moins rapide ; il s'y ajoute des courants de va-et-vient et des trajectoires circulaires. » (Schwenk, 1963 : 56-57)

4.6. Un type de tourbillons de « contournement » : la turbulence de sillage.

Par le profil et l'angle d'attaque de ses ailes un avion agit sur l'air qui l'entoure en le propulsant vers le bas. L'air ainsi déplacé imprime sur l'avion une force de réaction dirigée vers le haut : c'est la portance. (L'explication populaire expliquant par l'effet de Bernoulli des différences de pression dues au seul profil des ailes ne suffit pas, comme le démontrent des ingénieurs en aéronautique.)

Si l'avion se déplace horizontalement, sa force de portance équilibre son poids ; donc, pour voler, l'avion propulse vers le bas une masse d'air considérable avec une force équivalente à

son poids. (On peut avoir des brassages d'air de 300 à 400 tonnes par seconde en atterrissage par exemple).

Sans entrer dans les détails aérodynamiques qui mènent à la formation de ces phénomènes, ces énormes masses d'air commencent à prendre des mouvements vorticaux, giratoires, comme le montre la figure ci-dessous :

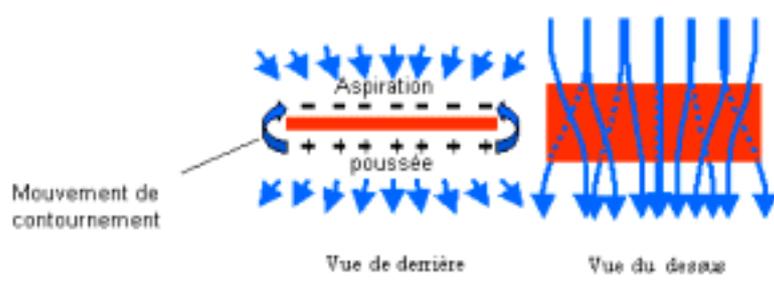


Figure n°13 : *Mouvement de l'air autour d'une aile portante* (Jacquin, 2003)

Cela aboutit à la formation d'une paire de tourbillons parallèles très intenses, de sens de rotation opposés (voir figures). Ces tourbillons brassent la masse d'air déplacée par le poids de l'avion.



Figure n° 14: *Entrelacement de ces tourbillons.* (Source : voir ci-dessous)

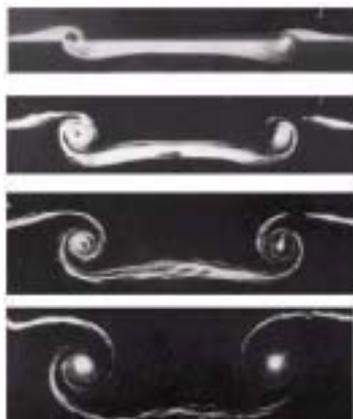


Figure n°15 : Visualisation par bulles d'hydrogène de l'enroulement de la nappe d'air qu'impacte une aile. Vue par l'arrière. (Source: An album of Fluid Motion, Van Dyke, Parabolic Press, in Jacquin: 2003-2007)

En fait, derrière une aile d'avion à l'atterrissage ou au décollage, on trouve plusieurs tourbillons qui résultent du contournement par le fluide des diverses extrémités de la voilure : extrémités des ailes, des volets hypersustentateurs, des ailerons ...

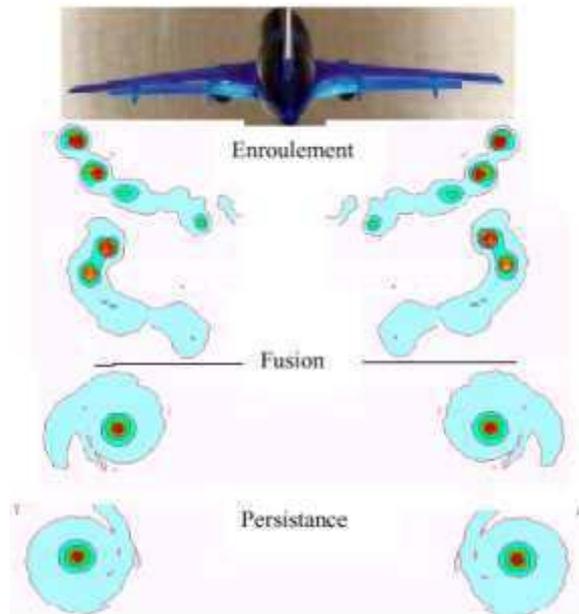


Figure n°16 : Sillage tourbillonnaire d'une maquette d'avion munie de volets. Mesure du taux de rotation des particules fluides par une technique Laser. Dans la phase d'enroulement, on distingue les tourbillons de bout d'ailes et les tourbillons de bout de volets. Ces tourbillons fusionnent pour former les tourbillons finaux du sillage qui sont très persistants (Source : Jacquin ; Onera, 2003-2007)

Si derrière une automobile ou un avion on voit apparaître *deux* grands tourbillons de sillage contrarotatifs, il existe une autre situation où l'on voit apparaître *quatre* tourbillons de sillage contrarotatifs : c'est juste derrière la coque d'un bateau.

Au nez du bateau l'eau est entaillée de telle manière qu'elle s'enfonce d'abord, ce qui crée, comme pour un avion, des tourbillons de sillage contrarotatifs, et à la poupe du bateau - c'est-à-dire à l'arrière - l'eau s'élève et crée *deux autres* tourbillons de sillage contrarotatifs.

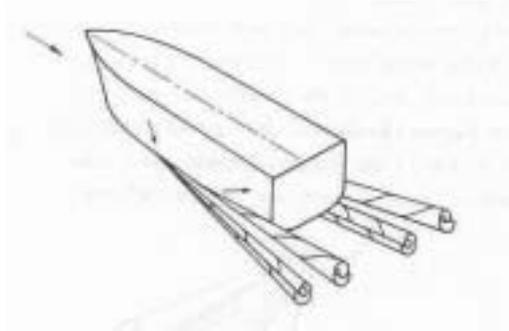


Figure n°17 : Quatre tourbillons de sillage contrarotatifs à la poupe d'un bateau (Lugt, 1979 :148)

Si le bateau était la langue dans la bouche on peut se représenter les tourbillons qui en ressortiraient, l'arrière du bateau étant la sortie de bouche.

4.7. Les allées ou chaînes tourbillonnaires

La plupart du temps des tourbillons se forment de manière répétitive, rythmique : on les appelle des allées ou des chaînes tourbillonnaires.



Figure n°18 : « Chaîne de tourbillons bien développée » (Schwenk, 1963,36)

Le point à gauche pourrait être la tige d'un jonc, un obstacle circulaire en tout cas : l'eau s'écoulant de la gauche vers la droite, on peut suivre l'évolution de l'entrelacement subtil de ces tourbillons. Si on se représente être à l'intérieur de l'eau où tout est alors en volumes, c'est une véritable forêt de tourbillons qui se déplacent en interaction et régénèrent l'eau en l'aérant, la renforçant dans la formation de clusters colloïdaux, lui donnant ainsi sa structure vivante, de potabilité .

5. Une notion de physique : le nombre de Reynolds et la turbulence

« La turbulence est devenue une science expérimentale vers la fin du XIX^e siècle quand l'anglais Osborne Reynolds a pu observer la transition du régime laminaire au régime turbulent. (...) dans un tuyau, si l'eau passe lentement, on aura des filets bien réguliers, c'est-à-dire un écoulement laminaire. Si elle va trop vite, il apparaît un très grand nombre de tourbillons et les pertes de charges dans le tuyau vont être très différentes. Reynolds put mettre en évidence des lois assez simples relatives à n'importe quel tuyau pour cette transition vers la turbulence ; il introduisit un nombre, appelé depuis **nombre de Reynolds**, qui n'est autre que le produit du diamètre du tuyau D et de la vitesse moyenne de l'écoulement dans le tuyau V , le tout divisé par la viscosité du fluide ν (viscosité de l'air environ $0,1 \text{ cm}^2/\text{s}$, viscosité de l'eau $0,01 \text{ cm}^2/\text{s}$) soit

$$R = DV/\nu.$$

Reynolds a montré que lorsque ce nombre dépasse une certaine valeur critique, de l'ordre de quelques milliers, alors tout d'un coup, l'écoulement devient turbulent. Des transitions analogues mais plus spectaculaires s'observent dans des écoulements ouverts derrière un cylindre [figure 4]. Léonard avait déjà vu le phénomène d'allée tourbillonnaire et l'avait représenté de façon presque correcte [figure 5] » (Frisch, 2000).



Figure n°19 :

L'allée tourbillonnaire de von Kármán (Frisch, 2000)

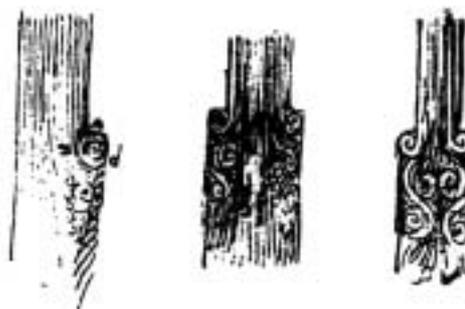


Figure n°20 : *Recirculations à l'aval d'un élargissement brusque par Léonard de Vinci. (Frisch, 2000)*

« On distingue trois principaux régimes.

Aux faibles valeurs du Reynolds (inférieures à 1), les forces de viscosité sont prépondérantes. On parle d'écoulement de Stokes. L'écoulement est laminaire (des éléments de fluide voisins demeurent voisins). De plus, comme l'inertie est négligeable, l'écoulement du fluide est réversible. Cela donne lieu à des comportements surprenants : si les forces extérieures sont soudainement stoppées, le fluide s'arrête immédiatement. Qui plus est, si les forces extérieures sont inversées, le fluide repart en sens inverse: dans une célèbre expérience de G.I.Taylor, une goutte d'encre, initialement mélangée dans un fluide visqueux, se reconstitue lorsqu'on a inversé le mouvement.

Aux valeurs intermédiaires du Reynolds (entre 1 et 2000 environ), les forces d'inertie sont prépondérantes, mais l'écoulement reste laminaire. Cependant, il n'est plus réversible: si l'on stoppe les forces extérieures, le fluide continue partiellement sur sa lancée ».

Aux fortes valeurs du Reynolds (au-delà d'environ 2000, -S.M. : dans d'autres ouvrages nous avons trouvé au-delà de 1700-), les forces d'inertie sont si importantes que l'écoulement devient turbulent. Entre les régimes laminaire et turbulent, on parle de régime transitoire. » (Wikipedia, 2007: Nombre de Reynolds)

6. Le chaos et la turbulence

« Deux dangers ne cessent de menacer le monde : l'ordre et le désordre ».

(Paul Valéry : *La crise de l'esprit. Variétés III.*)

Quelques remarques sur le caractère **chaotique** des turbulences car les formes aériennes des sons du langage sont des structures aérodynamiques hautement chaotiques.

« Une caractéristique très importante de ces écoulements turbulents, qui apparaît dès la transition, est leur caractère **chaotique**. De façon plus précise, les écoulements turbulents apparaissent comme **non prédictibles**. Qu'est-ce que cela veut dire, non prédictibles ?

Supposons que l'on connaisse de façon détaillée la configuration de l'écoulement à un instant donné. Alors, bien que cet écoulement soit régi par des équations bien déterminées,

déterministes comme on dit, dans la pratique, il n'est pas possible de prédire l'évolution ultérieure pour des temps longs. Cette **théorie du chaos**, qui doit beaucoup à Henri Poincaré, à David Ruelle, à Edward Lorenz et à l'École russe de Kolmogorov et de ses élèves Vladimir Arnold et Yacov Sinai, a des implications très importantes en météorologie. Imaginons que, pour prévoir le temps, on mesure, à un instant donné, le vent, la pression, la température en tous les points de la planète et que l'on essaie de prédire l'évolution ultérieure du temps par un calcul à l'ordinateur. En fait, au bout d'un temps relativement court, vous ne pourrez plus prédire de façon détaillée dans quel état se trouve l'atmosphère, et cela quelle que soit la puissance des ordinateurs. On dit que la turbulence atmosphérique est non prédictible, elle finit par être sensible au moindre éternuement ou à un battement d'aile d'un papillon, comme l'a suggéré le météorologue américain E. Lorenz. (...) Un point très intéressant est que, lorsqu'on augmente le nombre de Reynolds, ce qui peut se faire par exemple en diminuant sa viscosité, il apparaît de plus en plus de tourbillons de petite taille comme vous le voyez sur la figure 7 qui présente un jet turbulent. Chaque tourbillon est un peu comme une espèce de molécule. C'est ce que l'on appelle des "degrés de liberté". Donc un grand nombre de Reynolds, cela veut dire qu'il y a beaucoup de degrés de liberté; c'est ce que l'on appelle le régime de turbulence développée. Il est facile d'observer ce régime dans une soufflerie de grande taille comme celles où l'on teste les maquettes d'autos et d'avions » (Frisch, 2000).



Figure n°21 : Jet d'eau turbulent, d'après Dimotakis, Lye et Papantoniou, 1981 in : Frisch, 2000)

« Une propriété fondamentale d'un écoulement turbulent réside dans un processus appelé cascade d'énergie: **la division des grands tourbillons en tourbillons plus petits permet un**

transfert d'énergie des grandes échelles vers les petites échelles. Ce processus est limité par l'effet de la dissipation moléculaire, qui empêche les variations de vitesse trop importantes ». (Wikipedia, 2007: Turbulence)

On retrouvera cette caractérisation des cascades d'énergie dans le chapitre IV.

7. Les tourbillons et la turbulence comme moyen de locomotion

Les dauphins, les chauves-souris, les pigeons, les truites, les serpents, les colibris, les moustiques, les abeilles, tous utilisent à leur manière *les forces que libèrent les tourbillons pour se déplacer*.

On étudie avec des moyens technologiques très sophistiqués de nombreuses espèces animales, comme l'abeille ou bien la libellule par exemple, afin de pouvoir reproduire, en micro robotique militaire ou civile, le génie biomécanique inscrit dans leurs structures fonctionnelles.

*« Des études récentes démontrent que certains insectes tirent de l'énergie **des vortex** qui se forment autour de leurs ailes en vol. Habituellement, un vortex ne peut créer que de la traînée (S.M. : force qui tire, freine à l'arrière et augmente avec la vitesse de déplacement de l'objet volant). Ces insectes peuvent recapturer de cette énergie pour améliorer leur vitesse et leur manoeuvrabilité. Ils effectuent une rotation avec leurs ailes avant le battement de retour pour que leurs ailes soient levées par le tourbillon (eddy ou vortex, en anglais) d'air créé par le battement vers le bas »* (Wikipedia, 2007: Allée de tourbillons de Karman).

On est ainsi arrivé à résoudre depuis peu l'énigme du vol de l'abeille.

8. Une autre énigme, encore : le son

Il est une autre énigme, encore non résolue et liée directement au phénomène des tourbillons et de la turbulence de l'air : celle de la formation du son pendant : la phonation. Cela peut surprendre, car la majorité des linguistes sont convaincus que nous connaissons *parfaitement* la génération du son dans le larynx. Mais les phonéticiens et les ingénieurs spécialisés en

modélisation de l'appareil vocal en sont arrivés à certaines limites. Les voix et les sons synthétiques que nous produisons sont encore loin des qualités de la voix humaine.

Et c'est justement grâce à la collaboration avec des mécaniciens des fluides et des ingénieurs en aérodynamique et aéroacoustique que l'on aborde depuis peu les phénomènes aérodynamiques sous-jacents à la production du son avec un autre regard et d'autres questions.

On avance ici sur un terrain encore à peine défriché mais qui doit être intégré dans les recherches sur la voix, la parole comme le constate un des plus grands spécialistes de la voix, Ingo Titze, même s'il ne fait allusion à ces processus aérodynamiques qu'une seule fois et sur une seule page dans son ouvrage fondamental « *Principles of voice production* », ouvrage élargi et réédité en 2002. Nous y reviendrons plus longuement dans le chapitre II suivant.

Les phénomènes tourbillonnaires dans le larynx, le pharynx et la cavité buccale, sont parmi les plus complexes qui existent dans la nature car ce sont des phénomènes tourbillonnaires *phonatoires* et qui relèvent donc des interactions encore peu comprises aujourd'hui entre les phénomènes ondulatoires acoustiques et les phénomènes aérodynamiques, interactions qu'étudie la jeune branche qu'est l'aéroacoustique.

Cette nouvelle branche a été réellement fondée en 1952 à la suite des deux articles du mathématicien anglais M. J. Lighthill « *On Sound Generated Aerodynamically* » (1952, 1954). Puis d'année en année des chercheurs ont agrandi la brèche que Lighthill avait ouverte.

Nous abordons les problèmes qui se posent dans ce nouveau champ de recherche en rapport avec la phonation dans le chapitre II qui suit.

Chapitre II

La phonation, le larynx et les turbulences

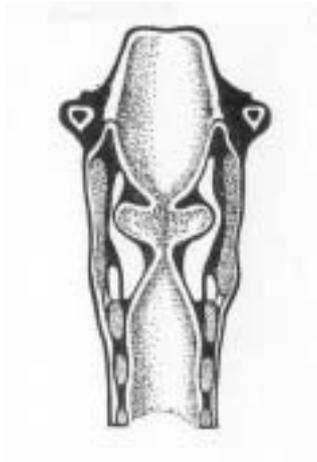
« (...) plus le son baisse dans son nombre de vibrations et plus l'air qui traverse la glotte diminue : le son se laisse comparer ici avec des gouttes séparées d'un jet d'eau entrecoupé car l'air ne peut passer entre les parois de la glotte se fermant régulièrement que sous forme de **bulles** » (Merkel, 1863 in Smith, 1953).

«... la respiration fournit le souffle d'air et crée le son par la génération de **tourbillons** au niveau du rétrécissement laryngé... » (Lafon, 1961: 83).

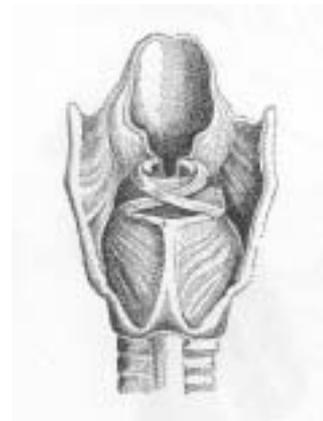
« La puissance vocale est le souffle. Cette force expiratoire du souffle permet la puissance de la voix et la vibration elle-même. (...) Ainsi, ce n'est donc pas la vibration de la muqueuse vocale d'un seul côté qui crée directement la vibration dans l'air mais l'accolement des deux qui crée la formation de **puffs** successifs, des microbouffées d'air qui passent dans l'édifice glottique. Ces **puffs** entraînent une succession régulière de « vagues d'air transglottique » jusqu'aux lèvres » (Abitbol, 2005: 171-172).



« De l'eau mouvante entre dans de l'eau immobile » (Schwenk, 1963).



« Un larynx plus simple que celui des singes. (...) Une forme aérodynamique plus efficace.» (Lenneberg, 1967)



Les mouvements tourbillonnaires ordonnent la matière et génèrent les formes.

Figures n° 22, 23,24 (Schwenk, 1963:n°54 et p:126-127)

Table du deuxième chapitre

1. L'énigme des « puffs » glottiques	50
1.1. Le cycle glottique et la vibration des cordes vocales	50
1.2. Le rôle des récepteurs baro-sensibles au sein du larynx	57
1.3. Les oscillations auto-entretenues de la glotte : l'effet de Bernoulli ne suffit pas.	62
1.4. La génération du bruit et la turbulence	65
1.5. L'énigme des « puffs » glottiques et les tourbillons : leur actualité	66
1.6. Lafon : La phonation et les tourbillons	70
1.6.1. Les tourbillons et le son	70
1.6.2. La « forme acoustique » de la voix : « pouffs » et tourbillons	71
1.6.3. Impulsion et larynx	73
1.6.4. Impulsion et cavités supra-laryngées	73
1.6.5. Impulsion et phonème	74
2. Modélisations actuelles de la glotte en aérodynamique et aéroacoustique	76
2.1. Pelorson et les phénomènes tourbillonnaires au sein de la glotte	76
2.2. Un autre exemple de recherche sur des modélisations physiques des cordes vocales	80
3. Les tourbillons et la génération du son dans l'air	81
4. Les tuyaux d'orgue	85
4.1. Les tourbillons générateurs de son dans les tuyaux d'orgue	85
4. 2. Études récentes au laser sur les structures tourbillonnaires de la lame d'air dans la production sonore des tuyaux d'orgue	87
5. La théorie acoustique requestionnée : les Teager ouvrent une brèche sur les tourbillons	90
6. Phénomènes pulsatoires et tourbillonnaires à la sortie d'un résonateur	93

1. L'énigme des « puffs » glottiques

1.1. Le cycle glottique et la vibration des cordes vocales

Le schéma classique de la phonation humaine définit la cage thoracique et les poumons comme une *soufflerie*, la glotte comme l'élément *vibrateur*, le conduit vocal et la cavité buccale avec ses différentes parties comme des *résonateurs*.

Nous nous concentrons dans ce chapitre principalement sur la glotte en n'abordant que les éléments physiologiques et fonctionnels qui mènent aux aspects aérodynamiques et tourbillonnaires dans la phonation.

La génération du son de la voix ou phonation se passe dans, au travers et juste au-dessus de la glotte. Pour la voix normale, c'est-à-dire sans aucune pathologie, tout comme la voix chantée, le son est produit par les cycles d'ouverture et de fermeture de la glotte, cycles à caractère ondulant ou oscillatoire.

On parle habituellement de vibrations glottiques ou de vibrations des cordes vocales ou plus exactement des plis vocaux. On nomme l'espace minime entre les cordes vocales la glotte ou la « lumière » laryngée. Nous emploierons ces termes tout au long de cette thèse.

La dénomination « cordes vocales » provient du fait que pendant longtemps on a observé ce mouvement d'ouverture et de fermeture seulement par en haut et de l'extérieur à l'aide d'un laryngoscope. Dans ces projections on ne voit que l'élément cinétique horizontal, c'est-à-dire le va-et-vient des deux bordures des ligaments des plis vocaux qui ont pu faire penser à des cordes de violon car ce mouvement présente extérieurement une certaine similitude avec une corde qui vibre. Mais en réalité ce mouvement est tridimensionnel. Et comme la génération du son vocal ne peut être saisie par le laryngoscope que de manière indirecte on préférera dire cycle d'ouverture et de fermeture de la glotte ou plus brièvement : cycle glottique. On parle aussi de fréquence laryngienne.

Certains ouvrages de phonétique ou d'éducation de la voix commencent fort justement non pas par des considérations physiques acoustiques sur les ondes mais d'abord sur la réalité physiologique, aérodynamique, biophysique et biomécanique des phénomènes ventilatoires et respiratoires.

Première phase : fermeture de la glotte par une action musculaire intentionnelle. Dans la région sous glottique, là où la trachée prend la forme d'un cône (le *conus elasticus* en anatomie), la pression aérienne augmente, renforcée par l'activité des muscles expiratoires de la cage thoracique.

Deuxième phase : quand cette pression aérienne statique sous glottique est assez importante, la constriction, la fermeture glottique peut être forcée.

D'après certaines lois de la mécanique des fluides - qui valent pour l'élément liquide comme l'élément gazeux - une dépression apparaît alors, d'après le principe de la compensation des courants de Bernoulli.

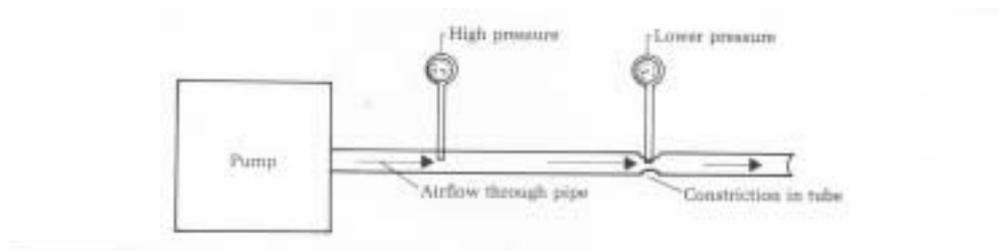


Figure n° 25 : *L'effet de Bernoulli* (Mackay 1987 : 220)

Troisième phase :

Le courant aérien traverse la glotte, un phénomène de succion apparaît dû à cette dépression et attire les plis vocaux l'un vers l'autre. On parle « d'effet « rétro aspiratoire » de Bernoulli ou d'effet de rappel ». (Cornut, 1983 : 22)

Ce phénomène de base pour l'ouverture comme la fermeture de la glotte est donc provoqué par la surpression sous glottique engendrée par les muscles respiratoires et tout ce qui participe au mécanisme et à la dynamique de l'expiration. Et parce que les forces qui proviennent de la même source d'énergie s'inversent mutuellement dans le sens de leur action, on dit de ce processus d'ouverture et de fermeture qu'il est un système oscillatoire ou auto entretenu.

(Nous verrons un peu plus bas que cette explication qui sévit aujourd'hui dans la plupart des ouvrages de phonétique et de phoniatry est fort à propos remise en question par les *aérodynamiciens* qui travaillent sur des modélisations de la glotte.)

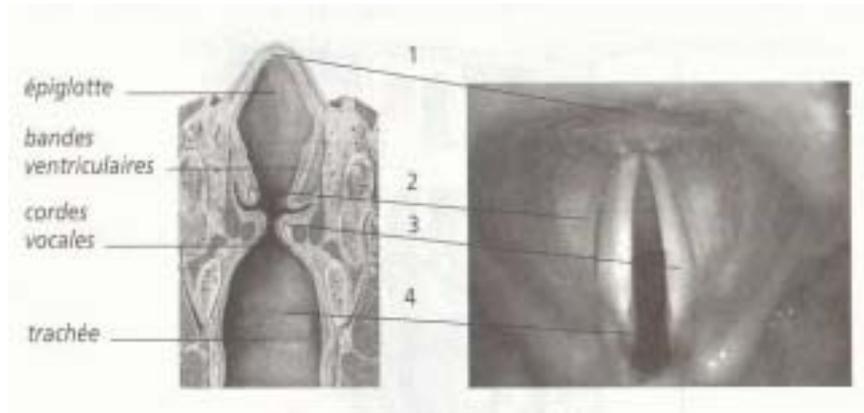


Figure n° 26 :

Le larynx vu d'en haut

(Ormezzano, 2000 : 90)

Il faut préciser que ce phénomène de succion n'apparaît pas d'abord en haut de la glotte mais plus bas, juste sous les cordes vocales, au début du rétrécissement de la trachée en forme de cône (*conus elasticus*, sur lequel nous reviendrons plusieurs fois).

Cela paraît surprenant d'abord car les parois de cette région sont beaucoup plus épaisses que les cordes vocales. Et pourtant c'est là que commence le processus de fermeture dans le cycle glottique. Effectivement les muqueuses supérieures sont très élastiques et se séparent des couches plus profondes.

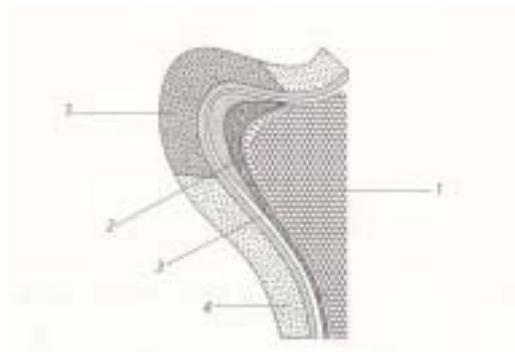


Figure n°27 : 1 : muscle en profondeur, 2 : ligament qui borde ce muscle, 3 : « espace de Reinke », un espace libre qui permet à la muqueuse extérieure de type respiratoire (4) de glisser sans aucune contrainte, 5 : la bordure saillante de la corde vocale est à cet endroit encore de nature différente dépourvue de glandes lubrifiantes, elle ressemble plus à l'épiderme mais sans kératine. (Ormezzano, 2000 :100)

« La corde vocale n'a pas une structure homogène et est essentiellement composée de trois éléments : un muscle (le muscle vocal ou muscle thyro-aryténoïdien), une couche moyenne (la lamina propria) et une muqueuse recouvrant le tout.

La muqueuse qui recouvre la corde vocale ressemble à celle qui recouvre la face interne des joues, alors qu'ailleurs, dans le reste du larynx, elle s'apparente plus à celle qui tapisse les fosses nasales (c'est une muqueuse de type respiratoire avec des glandes pour lubrifier le passage de l'air). Plus en profondeur, il existe une zone, dite « espace de Reinke », qui permet à la muqueuse de glisser par rapport aux plans profonds. Au-dessous, la lamina propria contient des fibres élastiques, du collagène, qui s'épaississent en un véritable ligament donnant à la corde vocale son allure rectiligne. Enfin, le muscle vocal présente des fibres allongées selon le grand axe de la corde vocale, bien qu'on ait décrit également quelques fibres musculaires en forme d'éventail entre l'arythénoïde et le ligament vocal » (Ormezzano, 2000 : 99-100).

Ceci permet un élan élastique très puissant qui crée une ouverture et une fermeture relativement importantes pour la lumière glottale. Ce mouvement d'ouverture et de fermeture commence donc toujours dans la partie inférieure des cordes vocales. Vu dans sa réalité tridimensionnelle nous avons en fait *un mouvement de rotation* des cordes vocales. C'est ce que Smith avait mis en évidence. Ceci a été ensuite exactement étudié, entre autres par Flanagan (1972), et plus tard par Hirano (1974, 1977, 1985).

Nous ne ferons pas ici l'historique des investigations sur le système du larynx et des cordes vocales. Pour plus de détails on peut étudier Moore (1991).

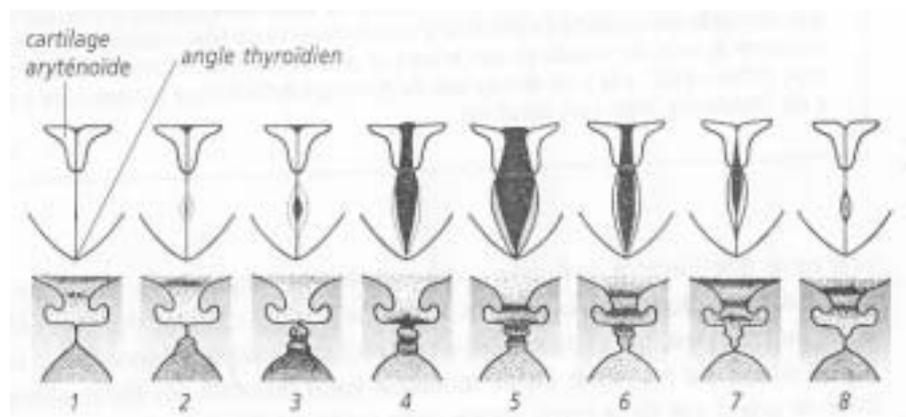


Figure n°28 : Un cycle complet du passage de l'air entre les cordes vocales. (Ormezzano, 2000 :103)

Les zones de pulsations d'air, dans un rythme surpression-dépression, au travers de la glotte, sont représentées par le dessin ci-dessus, chose qu'on ne voit pas toujours dans les ouvrages de phonétique. Ces pulsations aériennes ont été nommées des « puffs » et nous avons observé que peu de phonéticiens savent l'origine de cette dénomination et surtout peuvent expliquer la nature intrinsèque de ces « puffs » que nous essayons de cerner un peu plus bas (paragraphe 3.5.)

La figure n°28 représente ce qu'on appelle en phoniatry le mécanisme « lourd » de vibrations des cordes vocales parce qu'elles s'accrochent l'une vers l'autre dans mouvement rotatif elliptique.

Il existe un autre mode de vibration qu'on appelle le mécanisme « léger », plus simple, et où les cordes vocales ne se touchent que par leur bord le plus fin (le ligament). Pour les sons très aigus il n'y a apparemment plus aucun contact entre les cordes vocales, seule la fine structure de la muqueuse humide intervient encore.

À l'intérieur des plis vocaux eux-mêmes nous avons de grandes masses musculaires et cette musculature a son propre tonus qui peut être varié sans changer sa longueur, c'est-à-dire qu'elle est de nature isomorphe. Nous avons ici par ces masses musculaires des forces élastiques en retour et ce sont celles qui donnent la partie myo-élastique (musculaire-élastique) de tout ce processus. On peut intentionnellement agir sur cette musculature et donc influencer la durée des fréquences périodiques de tout le cycle des cordes vocales et ainsi la hauteur du son émis. Pour les hommes la fréquence moyenne est de 110 Hz, pour les femmes de 220 Hz et pour les jeunes enfants de 300 à 400 Hz.

Le docteur Jean Abitbol, chirurgien, phoniatry O.R.L. et inventeur de la vidéofibroscopie naso-pharyngo-laryngée, dans son ouvrage substantiel *L'odyssée de la voix* (2005) remarque :

« mais toutes les structures des cordes vocales ne vibrent pas, seules les surfaces en contact appelées les bords libres des cordes où se situent les muqueuses respectives entrent en pulsations contrôlées. Elles vont périodiquement se coller, se fermer, puis s'ouvrir. Si elles ne se touchent pas, il n'y a pas de vibration. (...) Ce que vous commandez, c'est le muscle vocal, et non la muqueuse.

La puissance vocale est le souffle. Cette force expiratoire du souffle permet la puissance de la voix et la vibration elle-même. (...) Ainsi, ce n'est donc pas la vibration de la muqueuse vocale d'un seul côté qui crée directement la vibration dans l'air mais l'accolement des deux qui crée la formation de puffs successifs, des microbouffées d'air qui passe dans l'édifice glottique. Ces puffs entraînent une succession régulière de « vagues d'air transglottiques » jusqu'aux lèvres » (Abitbol, 2005: 171-172)

On remarquera que ce spécialiste apporte une caractérisation nouvelle de la nature de ces « puffs » dénommés ici « microbouffées d'air » qui, par leur impact, provoqueraient des

« *vagues d'air transglottiques jusqu'aux lèvres* ». Mais là encore ces « *vagues d'air* » restent énigmatiques. Elles laissent supposer en tout cas *des processus aérodynamiques*.

La « fréquence laryngienne » périodique - la vibration des cordes vocales - peut-être donc, en plus des processus myoélastiques, influencée par *l'aérodynamique*, à savoir par la pression sous glottique. Il y a même une pression de déclenchement ou *pression seuil* pour que la glotte s'ouvre, pression qui n'est plus entièrement à la disposition des personnes souffrant d'emphysème ou de certains types d'asthme, chose que l'on entend aussi à la voix faible, comme enrouée ou chuchotée.

Dans l'ouvrage collectif « *Calliope* », bien connu des linguistes et spécialement des phonéticiens, nous trouvons, pour résumer, les remarques suivantes :

«... contrairement à un système oscillant dont la période de vibration reste la même quelque soit les conditions d'excitation, il s'agit pour les cordes vocales d'un mode de vibration dit de relaxation car l'oscillateur ainsi décrit n'a pas de fréquence propre, elle dépend comme nous l'avons vu de :

- *la pression intraglottique ;*
- *la longueur des cordes vocales, leur masse et sa répartition ;*
- *la tension et la compression latérale et la disposition ;*
- *l'effet de couplage avec les cavités sub- et supraglottiques ;*
- *l'interaction entre les cordes vocales »* (Calliope, 1989 :28).

Cette description du fonctionnement des cordes vocales et de la génération du son qui a commencé à s'imposer dans tous les milieux linguistiques à partir de 1958 :c'est la *théorie aérodynamique myo-élastique* de la phonation de Van Den Berg. Elle a été depuis légèrement complétée par d'autres chercheurs.

L'expiration périodique de l'air et des particules d'air relativement lente de la région sous glottique vers la glotte crée une surpression. Simultanément il se crée une dépression au niveau de la lumière laryngée, c'est-à-dire au travers de la glotte. Des changements périodiques très importants de la vitesse ventilatoire - et donc des particules d'air - sont produits par les ouvertures et fermetures des cordes vocales : on a donc périodiquement des

pressions et des dépressions. Celles-ci excitent les molécules d'air dans le pharynx et provoquent chez elles un mouvement extrêmement rapide de va-et-vient. Ces oscillations se déplacent de molécule en molécule et créent ainsi *les ondes acoustiques*. Il est bien connu que l'énergie ondulatoire se déplace par un transport alterné de différences cinétiques en différences pressionnelles au travers du médium de l'air. Ainsi donc le son fondamental, qu'on appelle de manière simplifiée la voix (bien que celle-ci ne soit réellement formée qu'à la sortie des lèvres), est généré principalement par *des différences de pression* : c'est un phénomène « atmosphérique », aérodynamique qui devient acoustique. La fréquence de ce cycle glottique en une seconde donne la hauteur de la voix, comme décrit plus haut.

Vu que ces changements extrêmement rapides de pressions sont quasi périodiques, ils se présentent à notre perception comme *un son unique mais complexe, très riche en harmoniques* (le « timbre » des musiciens), harmoniques provenant des propriétés différemment élastiques des muqueuses et tissus musculaires des cordes vocales. En fait, ces oscillations, qui se produisent avec des différences pressionnelles relativement fortes dans des temps d'ouverture relativement courts créent *une forme* qui est loin d'être *une forme sinusoïdale* unique, un son pur, comme dans les vibrations d'un diapason, qui lui n'est en rien constitué d'un tissu vivant.

Mais on dit -d'un point de vue mécaniste ou réductionniste- que la glotte produit la voix comme un générateur de bruit.

Deux choses sont encore à considérer pour comprendre la génération de la voix :

- le haut niveau acoustique de la voix humaine ne peut-être expliqué que comme n'étant qu'un son fondamental produit par des différences pressionnelles.
- une oscillation périodique avec de tels changements énergétiques dans le temps (les impulsions) ne peut-être totalement saisie et analysée spectrographiquement ni comprise que comme n'étant composée que par la fusion de plusieurs ondes partielles harmoniques.

Ce deuxième point touche un aspect très important, mais encore irrésolu, sur lequel insistait par exemple J.C. Lafon et aussi, par un autre raisonnement, B. Rybak. Nous le retrouvons un peu plus loin. (Paragraphe 1.6.)

Dans le cas de la voix, en tant que fondamental jailli de la glotte, une composition faite que

de différentes ondes sinusoïdales n'a jamais lieu. C'est un filtrage que l'on fait *après* la production phonique à des fins de mesures et que l'on peut utiliser pour imiter ou approcher la nature. A cause du déroulement périodique et surtout à cause des fortes différences énergétiques dans le temps, tout appareillage d'analyse doit constater un son qui semble produit par une onde constituée de beaucoup d'ondes partielles harmoniques. Ceci vaut pour un appareil d'analyse comme le Sona Graph, nom d'une marque américaine à l'origine: le premier sonographe.

L'oreille humaine quant à elle nous permet très rarement d'entendre des ondes partielles. Son fonctionnement est hautement plus complexe et nous n'avons pas encore résolu toutes ses énigmes. Il y a trente ans à peine par exemple on ne connaissait même pas l'existence *des otoémissions acoustiques* par exemple.

Chez l'être humain ces sons de très faible intensité (25dB entre 1000 et 4000 Herz), émis depuis l'organe de Corti –par les cellules ciliées *externes** exactement -, sont aussi individuels que les empreintes digitales d'une personne. Depuis 1995 on utilise ce phénomène pour les diagnostics de l'audition chez le nouveau-né.

(*cellules *innervées de manière efférente*, donc comme l'innervation des muscles par les nerfs dits « moteurs » ! Alors que les rangées de *cellules ciliées internes* sont innervées par des *nerfs afférents*, donc liés à la *perception*. Notre vision d'il y a trente ans d'un organe des sens purement passif et réceptif doit être révisée. L'ouïe n'est pas que réception passive, mais intentionnalité et *participation* « motrice » à l'environnement. On sent bien en écoutant de la musique par exemple que nous sommes brassés dans des vagues de « mouvements retenus » et la « synchronie interactionnelle » dans les situations langagières en est une preuve tangible.)

1.2. Le rôle des récepteurs baro-sensibles au sein du larynx

Dans la *théorie aérodynamique myo-élastique* on explique aussi les réglages de l'ensemble du système vibratoire par la présence de *capteurs sensoriels* spécialisés, localisés dans la muqueuse : *les mécano-récepteurs* qui nous renseignent sur le niveau de tension des tissus musculaires, et **les baro-récepteurs**, *qui nous permettent de ressentir la force de la pression aérienne exercée sous la glotte*. Ces informations vont au système nerveux et nous pouvons ainsi de manière réflexe adapter les caractéristiques biomécaniques de nos cordes vocales :

tension, contraction, forme et valeur de la masse musculaire vibrante, *en fonction des processus pressionnels d'expiration variant suivant nos intentions et productions phonatoires.*

Le docteur Yves Ormezzano, O.R.L.- phoniatre, insiste aussi sur ce facteur des *perceptions pressionnelles* au sein de la muqueuse laryngée.

« Au niveau de la sous- glotte, il existe très nombreux **capteurs baro-sensibles** (sensibles à la pression) qui réagissent très rapidement à toute variation de la pression d'air expiratoire, déclenchant des phénomènes réflexes pour contrôler la force de contraction des muscles laryngés. Les mécano- récepteurs tendineux et articulaires laryngés (en particulier l'articulation crico-arythénoïdienne) entraînent aussi des réponses réflexes très rapides au niveau des muscles laryngés. La muqueuse laryngée est richement innervée, en particulier pour la sensibilité tactile et douloureuse, mais aussi **pressionnelle** » (Ormezzano, 2000 : 171).

Le chirurgien O.R.L. Antoine Giovanni, de Marseille, dans une communication personnelle, nous a confirmé qu'on trouve « des récepteurs baro-sensibles dans la corde vocale et particulièrement au niveau de la sous glotte (S.M. : conus elasticus)».

Ces détails physiologiques, neurofonctionnels, sont très importants, car ils viennent renforcer notre compréhension des phénomènes aériens, pressionnels donc *aérodynamiques* dans la formation et la modulation de la voix et de la parole. C'est-à-dire **qu'en plus des différentes « boucles audio phonatoires »**, qui nous permettent de contrôler et de « doser » les caractéristiques acoustiques de notre voix et de notre parole, il faut aussi tenir compte de cette participation, de ce « suivi pressionnel » quasi réflexe, qui devient d'ailleurs conscient et très différencié dans le travail professionnel de la voix et de la parole, artistique ou thérapeutique.

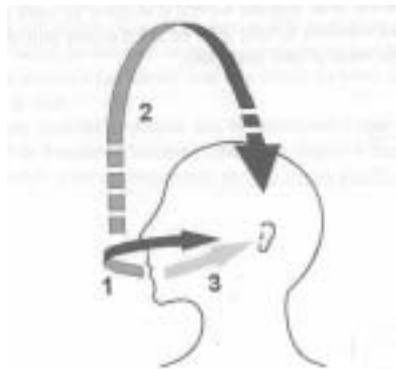


Figure n°29 : Les différentes boucles audio phonatoires. (Ormezzano, 2000 :123)

« La voix que l'on émet soi-même parvient à nos oreilles selon trois chemins :1) par une voix courte

depuis la bouche, 2) après modification par l'acoustique extérieure, 3) en traversant le crâne directement vers l'oreille interne.» (Ormezzano, 2000 :123).

Il existe une quatrième voie dans laquelle nous percevons d'une certaine manière notre propre voix : c'est *le chemin pneumatique* des trompes d'Eustache qui va directement à l'oreille moyenne.

La présence de ces *capteurs baro-sensibles* - qu'on trouve à des endroits rares mais très significatifs dans l'organisme humain : aorte, **oreille moyenne**... - sont pour nous un indice tangible, car neurophysiologique, du rôle fondamental des processus aérodynamiques dans la génération, la production de la voix et de la parole humaine. En fait c'est une interaction très subtile qui est à l'œuvre ici et, en sciences du langage comme en phoniatrie, nous n'en connaissons pas encore toutes les connexions et interactions neurofonctionnelles.

On parle « *d'effet de couplage avec les cavités sub- et supraglottiques* » pour les plis vocaux.

Effectivement on a constaté que « *la variation de la fréquence laryngée se fait en fonction des voyelles et des consonnes prononcées* ». (Cornut 1996 : 37). Le bord des cordes vocales change de forme avec les voyelles émises. Ceci est dû entre autres à un « phénomène d'impédance ramenée sur le larynx » dû à la « forme de pavillon » créé par la cavité buccale.

De par notre expérience de formateur de la voix parlée et de récitant il nous semble pouvoir même affirmer que *les différences de pression aérienne* créées au sein du tract vocal par l'activité articulaire de la langue et des lèvres provoquent de fines *rétroactions pressionnelles* dans la sous glotte et de là, dans la trachée, les bronches, le diaphragme et la cage thoracique dans son ensemble. (Nous n'avons pas trouvé d'études sur les mouvements du diaphragme en fonction des mouvements des lèvres et de la langue.)

Il y a même un impact sur la circulation sanguine veineuse, spécifique pour chaque son prononcé et observable en échographie Doppler, comme nous y faisons allusion à la fin de notre thèse.

Par l'oreille nous vivons déjà **à l'intérieur** des lois qui régissent l'air et l'atmosphère mais aussi nous entrons en résonance avec les structures de cohésion intrinsèque des objets et des êtres qui nous entourent. Le monde de la vision nous laisse à *la surface* des choses, par l'audition nous saisissons dans les vibrations et les sons *l'intérieur*. En lavant la vaisselle c'est

un bruit spécial qui nous révèle une fêlure bien avant que l'oeil l'ait identifiée.

Notre oreille moyenne est dépendante des différences pressionnelles. En mangeant, mais aussi par la déglutition fonctionnelle régulière, même la nuit, nous avalons de l'air qui, par le biais des trompes d'Eustache, vient aérer, « ventiler » régulièrement notre oreille moyenne pour la maintenir dans un équilibre pressionnel avec la pression atmosphérique extérieure, condition essentielle pour que la membrane tympanique puisse assumer ses fonctions. Il suffit aussi de prendre connaissance d'un fait neurophysiologique peu connu pour prendre conscience que par l'audition - tout comme par la parole « oralisée » avec laquelle *elle forme une unité fonctionnelle* - nous vivons **à l'intérieur des forces, des qualités aériennes**.

Il ne s'agit pas ici pour nous de donner une description complète des processus de l'audition, mais de mettre en relation des éléments significatifs de la physiologie humaine pour faire apparaître une synergie fonctionnelle de « l'homme pneumatique ou aérodynamique » *.

*Par l'homme *pneumatique ou aérodynamique* nous entendons ici tous les processus dans l'organisme humain où les forces aériennes, aérodynamiques sont à l'oeuvre. On trouve même des bulles d'air dans le liquide synovial qui permettent de nous donner cet effet de coussin élastique.

Les planches d'anatomie nous montrent « l'homme minéral », squelettique, puis l'arbre et ses ramifications de « l'homme nerveux », puis le « corps de mouvements » et les chaînes musculaires, puis les réseaux des vaisseaux sanguins et lymphatiques, puis les organes internes... Ces planches sont en soi des abstractions dès qu'on aborde les mouvements, les relations dynamiques entre ces différentes « couches », entre les différents organes. On peut très bien parler d'un « corps de mouvements » en considérant les chaînes musculaires et leurs mouvements ; ou encore d'un « corps de chaleur » que l'on connaît en partie en médecine avec les déplacements du noyau thermique dans l'organisme pendant la journée etc.

Au sein de la cochlée se trouve l'organe de Corti avec ses cellules ciliées (des rangées de bâtonnets microscopiques) sensibles aux différentes micro-vagues des liquides péri-et endolymphatiques. Ces micro-vagues sont provoquées par les fines vibrations pressionnelles de l'étrier, le troisième des osselets de l'oreille moyenne transportant les sons, contre la fenêtre ovale du vestibule.

Le fin tapis des cellules ciliées microscopiques, réparties en de véritables plates-bandes très régulières sous la *membrana tectoria* du conduit cochléaire, est finement caressé par ces

vagues pressionnelles. Et c'est là qu'apparaît ce fait physiologique qui peut nous rendre attentif à cette réalité de « l'homme pressionnel, aérien » dans la nature humaine.

L'inclinaison des bâtonnets de ces cellules ciliées est « *d'une mesure géométrique inférieure à $0,01^\circ$ ou $0,4 \text{ \AA}$* », ce qui signifie « *en dessous de la dimension d'un atome d'hydrogène* ». (Zenner, H.P., 1994 : 81-259).

C'est une dimension moléculaire, là où la nature oscillatoire des sons se réalise! On ne peut plus parler ici de mouvement spatial. C'est pour cette raison que nous écrivons juste un peu plus haut que par l'oreille nous vivons à l'intérieur du monde qui nous entoure, à « l'intérieur des sons » et à l'intérieur de l'air et des processus aérodynamiques puisque notre audition est fondée sur des processus physiologiques et physiques (il s'agit des bâtonnets des cellules ciliées) de « dimension géométrique inférieure à un atome d'hydrogène » et reliés de plus, comme nous l'avons rappelé un peu plus haut, à une innervation afférente et efférente.

On comprend ainsi pourquoi l'oreille interne est un organe hautement plus complexe encore que le larynx. Elle a aussi un passé phylogénétique bien plus ancien que l'oreille moyenne et que le larynx, d'où sa plus grande perfection. Le larynx est en ce sens un organe encore « jeune ». C'est aussi de tous les larynx dans le règne animal le plus simple quand à ses formes aérodynamiques, comme l'a mis en évidence Negus dans son traité d'anatomie comparée du larynx. (Negus, 1949)

C'est donc le fait que les oreilles et le larynx forment *une unité fonctionnelle* qui nous paraît le plus important et cela justement en rapport avec les turbulences phonatoires externes que nous étudions. Et nous sommes souvent étonnés que des ouvrages de phoniatrie ou de travail sur la voix ne consacrent aucun chapitre à l'organe de l'oreille et son fonctionnement *en rapport* avec la voix et la parole.

La parole humaine « oralisée » se réalise dans *les processus aérodynamiques de l'air* et de la respiration modulée par la gestualité articulatoire, elle-même métamorphose de la gestualité humaine dans son ensemble. (Voir annexe I : *La longue marche vers la manifestation de la parole... oralisée.*)

1-3 Les oscillations auto-entretenues de la glotte : l'effet de Bernoulli ne suffit pas. Le regard des mécaniciens des fluides.

Titze, dans son ouvrage fondamental « *Principles of Voive Production* », fait la remarque - sans vraiment la développer - que les descriptions classiques du phénomène de rappel, de succion, par effet de Bernoulli « *ne suffisent pas pour expliquer les oscillations autoentretenues* ». (Titze, 2000 : 89) Pour lui de « *nouvelles observations sont encore nécessaires* » à fin d'éclaircir cet aspect encore mal compris. (Titze, 2000 : 89)

Il nous faut écouter des spécialistes de l'aérodynamique pour trouver des remarques pertinentes montrant que l'effet de Bernoulli est loin de tout expliquer.

L'aéroacousticien Pelorson, chercheur de Grenoble, que nous citons longuement dans le chapitre suivant, explique en quoi **cette force de Bernoulli n'est pas suffisante** pour expliquer le phénomène d'oscillation auto-entretenu des cordes vocales :

« Les cordes vocales sont constituées de tissus essentiellement élastiques. La force de pression de l'air va s'opposer à une force de rappel élastique ce qui va tendre à écarter ou rapprocher les cordes vocales à leur position d'origine.

*La littérature fait principalement référence à ces deux forces de pression et de rappel élastique pour expliquer le phénomène d'oscillation des cordes vocales. Du point de vue physique on peut montrer que ces deux forces ne sont pas suffisantes pour expliquer le phénomène d'auto-oscillation des cordes vocales. Il faut y rajouter une troisième force appelée **force de Bernoulli** ou **force d'aspiration**.*

La première équation de l'effet Bernoulli exprime une relation entre la pression locale au niveau de la glotte et la vitesse locale de l'écoulement au même point : $Pression + \frac{1}{2} \cdot r \cdot vitesse^2 = constante$, où r est la densité volumique de l'air supposé constante. La deuxième équation traduit la conservation de la matière. En n'importe quel point de la glotte, le produit entre la vitesse locale de l'écoulement et la section de la glotte doit être une constante.

Cela a comme conséquence qu'entre la région sous-glottique, la trachée et la glotte, on a une réduction considérable du calibre (l'aire du larynx diminue fortement). Du fait de la deuxième équation, si l'aire diminue, la vitesse va augmenter localement. On va donc avoir des vitesses importantes au niveau des cordes vocales (col). Or si la vitesse localement augmente, alors la pression va diminuer, avec le carré de la vitesse. Au niveau des cordes vocales, on s'attend donc à observer des pressions négatives, ce qui correspond à une force d'aspiration qui va tendre à

accoler les cordes vocales l'une vers l'autre.

Pour aller plus loin dans les détails, cette description est valable au premier ordre mais complètement fautive de plus près. Un exemple qui contredit cette première description est le phénomène de décollement tourbillonnaire. En effet, si on tient un même raisonnement et qu'on continue à utiliser les équations de Bernoulli, cette fois au delà des cordes vocales, l'aire de la trachée étant sensiblement la même que celle du pharynx, d'après la deuxième équation, les vitesses en ces points doivent être également égales, et les pressions également, d'après la première équation. Or on aurait ce résultat dans le cas d'un tuyau uniforme sans cordes vocales. Une théorie qui prédit que les cordes vocales n'ont aucune influence sur l'écoulement a très peu de chance d'avoir un intérêt quelconque en parole. Il y a donc une approximation qui n'est pas correcte, reliée à ce qu'on appelle le Paradoxe de d'Alembert.

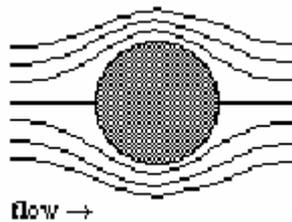


Figure n°30 : *Écoulement d'un fluide sur un cylindre en approximation potentielle (Pelorson)*

Ce paradoxe concerne un écoulement avec un obstacle placé en son sein, par exemple une sphère ou un cylindre. D'Alembert arrivait à la conclusion, avec un raisonnement proche de la description présentée plus haut, que quelques soient les caractéristiques de l'écoulement, l'obstacle n'exerçait aucune force sur l'écoulement. Réciproquement cela revient au même que démontrer que la force exercée par l'écoulement sur le cylindre est nulle. Ce résultat est bien entendu contre intuitif et contraire à toutes les expériences menées dans ce domaine. La réponse à ce paradoxe est le phénomène de **décollement tourbillonnaire**.*

(Pelorson, Une approche intuitive de la phonation,, sans date ,apparemment mis sur Internet en 2000)

*Et ceci nous renvoie à notre chapitre sur les différentes formes de tourbillons et particulièrement sur les « *tourbillons de contournement* » d'obstacles au sein d'un fluide.

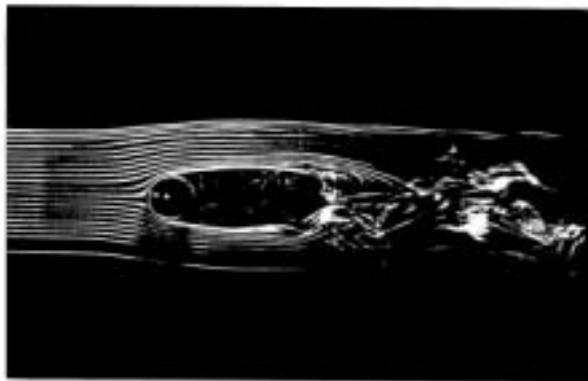


Figure n° 31: « fig.2 : Visualisation de l'écoulement réel d'un fluide sur un cylindre (Marais 1899) » Pelorson

Sur la figure 2 (S.M. : n°31, ci-dessus) est représentée une illustration obtenue par Etienne Jules Marey en 1899, qui visualise les flux de fluide à l'aide de pinceaux de fumée le long d'un cylindre placé dans l'écoulement. En amont, on observe effectivement un comportement qui ressemble à la description de l'écoulement potentiel, l'écoulement suit notamment assez bien les parois du cylindre. Par contre en aval, on observe un phénomène très différent. Le fluide se sépare des parois du cylindre. On observe également des structures beaucoup plus compliquées, chaotiques, liées à l'apparition de la turbulence » (Pelorson, 2000).

On comprend après cette démonstration pertinente que seul un travail interdisciplinaire peut élargir notre savoir et compréhension des phénomènes sous jacents à la phonation.

Pelorson ajoute ensuite que « le même genre de phénomène peut être observé sur une maquette de cordes vocales ».

Nous présentons les visualisations de Pelorson sur modèles in vitro et ses explications juste un peu plus loin (2.1).

On les retrouvera *en animation* dans le DVD (5^e partie).

1.4. La génération du bruit et la turbulence

En mécanique des fluides, et ici plus spécialement en aérodynamique, on différencie, comme nous l'avons esquissé dans le chapitre précédent, les *courants laminaires* et les *courants turbulents*.

Dans un courant laminaire, régulier, les molécules d'air gardent leurs relations de voisinage entre elles : un profil aérodynamique régulier se forme le long de la surface traversée.

Dans un courant turbulent au contraire, des tourbillons irréguliers apparaissent. Ces perturbations qui déstabilisent et détruisent les relations de voisinage entre les molécules d'air, conduisant ainsi un profil aérodynamique non calculable, non calculable de manière linéaire devrait-on dire.

On considère habituellement que le courant laminaire est la base de la *respiration normale* et de la *production des voyelles*. Ce qui n'est pas entièrement sûr non plus pour les voyelles.

C'est le courant turbulent, de par la forte constriction du tractus vocal et l'augmentation simultanée du courant aérien, qui produit de majorité des consonnes, en particulier les fricatives. Des turbulences annulaires, des tourbillons apparaissant dans le courant turbulent, produisent des bruits qui sont perçus comme des frictions. Ces frictions sont dues aux vibrations non périodiques qui se forment aux différents lieux de constriction dans la cavité buccale.

Comme rappel, en mécanique des fluides le passage d'un courant laminaire à un courant turbulent est calculé d'après le nombre de Reynolds Re qui est défini pour un courant en forme de tuyau :

$$Re = \rho \cdot v \cdot d / \eta$$

ρ représente la densité du médium fluide, v la vitesse moyenne de déplacement du courant dans le tuyau, d le diamètre du conduit, du tuyau et η la viscosité du courant.

Dans le cas où le nombre de Reynolds est petit, l'écoulement est laminaire ($Re \leq 1700$).

Avec l'augmentation du nombre de Reynolds le courant laminaire passe peu à peu à une forme d'écoulement turbulent. Dans tous les cas d'un grand nombre de Reynolds les courants

sont toujours turbulents.

En ce qui concerne le conduit vocal la résistance que crée une constriction est souvent suffisamment importante pour obtenir des nombres de Reynolds d'une valeur supérieure à 1700, créant ainsi de la turbulence, du bruit dû à de la turbulence.

1-5 L'énigme des « puffs » glottiques et les tourbillons : leur actualité

Déjà en 1863, Merkel faisait la remarque suivante : « *plus le son baisse dans son nombre de vibrations et plus l'air qui traverse la glotte diminue : le son se laisse comparer ici à des gouttes séparées d'un jet d'eau entrecoupé car l'air ne peut passer entre les parois de la glotte ne se fermant régulièrement que sous forme de bulles* » (Smith, 1953 : 166).

Cette remarque de Merkel était à l'époque, en 1863, bien judicieuse, car ce n'est qu'en 1940 que les laboratoires Bell réussirent avec une caméra de 4000 images/s à filmer le mouvement rotatoire, le « *rolling movement* » des plis vocaux.

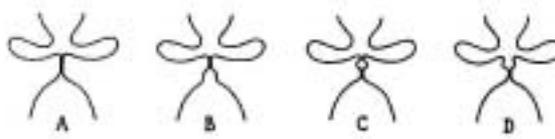


Figure n°32 : D'après les films des laboratoires Bell (Smith, 1953:167)

Et Svend Smith, le phonéticien danois, de mettre en valeur cette observation pertinente confirmée par ses propres travaux au moyen de la technologie cinématographique moderne. Il observe le mouvement rotatif très particulier des cordes vocales ou plis vocaux, qui d'après lui doit répartir l'air phonatoire en minuscules portions, comme des gouttelettes d'air, qu'il qualifie du terme de : « **puffs** ». Il ne donne d'ailleurs pas l'origine de cette image acoustique qu'il emploie ; peut-être vient-elle de ce qu'on connaît du bateau à vapeur, Smith étant danois !

C'est depuis cet article de Smith qu'on retrouve, dans de nombreux ouvrages de phonétique et sur la culture de la voix, les fameux « puffs ».

Pour Smith, Merkel était très proche de la réalité avec ses « bulles » et c'est en ce sens qu'il le cite tout au début de son article. Merkel partant d'une impression acoustique essayait de se

faire une image de la réalité *aérodynamique sous-jacente*. Smith partait, quant à lui, *d'une observation visuelle* exacte du mouvement de roulement des cordes vocales pour en venir à *la même image explicative* du comportement *aérodynamique* de l'air phonatoire, celle de « puffs » ou de « bulles ».

Mais Smith n'a pas pu non plus saisir ces bulles d'air, ces « puffs » en tant que tels par un procédé de visualisation.

Jusqu'à nos jours, à notre connaissance, personne n'a encore pu les visualiser *in vivo*.

Effectivement l'air expiré n'est pas assez humide et *dense*, comme le sang ou les tissus musculaires par exemple, et ne contient donc pas assez de molécules d'hydrogène (vu le faible taux d'H₂O) pour que celles-ci puissent être mises en évidence par l'imagerie par résonance magnétique (IRM), technique basée sur la résonance magnétique *des molécules d'hydrogène* en mouvement. L'énigme de ces tourbillons qui se forment au travers de la glotte serait ainsi en partie résolue par leur visualisation.

Plus près de nous dans le temps, Guy Cornut, un spécialiste de la respiration et de la phonation, dans un ouvrage sur la voix, fait ces remarques :

« À chaque ouverture, l'air rejaillit sous pression ; **le son laryngé est ainsi constitué d'une série de « puffs » d'air** qui sortent de la glotte d'une manière rythmique et peuvent être **assimilées à des impulsions acoustiques** (J.-C. Lafon) » (Cornut, 1983 : 22-23)

Mais Cornut ne caractérise pas non plus très précisément la nature de ces « puffs » d'air qu'il assimile d'ailleurs à *des impulsions acoustiques*, notion venant des travaux et des conceptions de Lafon, avec qui il avait collaboré.

Nous verrons dans le chapitre suivant que Lafon était un précurseur - courageux nous faut-il dire - quant à sa conception de la nature *tourbillonnaire* de ces impulsions.

(Notons en passant que Cornut en citant Lafon touche un aspect complexe de l'acoustique et de l'aéroacoustique : celui de *l'analyse fréquentielle*, la plus utilisée de nos jours pour des raisons de simplification et d'utilité pratique, et celle de *l'analyse impulsionnelle*, moins courante, mais plus proche de la réalité physiologique de la phonation. Nous reviendrons sur cette différence entre ces deux types d'analyse dans le chapitre consacré aux recherches de Rybak.)

Dans un ouvrage très récent sur l'entretien de la voix, « *Le guide de la voix* », écrit par l'O.R.L.- phoniatre Ormezzano, nous trouvons la remarque suivante : « *La pression sous-glottique de l'expiration va écarter les cordes vocales qui vont laisser passer un « puff » d'air avec un effet de tourbillon aérien* » (Ormezzano, 2000: 101).

Une telle remarque est encore assez rare dans des ouvrages sur la voix et nous la donnons ici pour montrer comment *la question de la nature exacte de ces « puffs »* entre peu à peu dans la conscience des spécialistes.

Mais on peut le constater la *structure, la consistance exacte* de ces « puffs » d'air reste donc encore une énigme.

Pour un fondamental, F_0 de 200 hertz par exemple, il nous faut vraiment nous représenter *une salve pressionnelle d'air humide* littéralement pulvérisée un peu comme dans un spray par le fait que ce courant aérien est coupé par une suite de saccades rotatives des plis vocaux : 200 fois en l'espace d'une seconde, dans l'exemple choisi. (Les plis vocaux s'écartent latéralement de 1mm environ, et de 0,2 à 0,5 mm vers le haut.)

Ceci n'est pas sans nous rappeler, sur le plan acoustique, un des aspects fonctionnels de **la sirène à trous** où effectivement la fréquence du son est dépendante et de la vitesse de rotation de la plaque à trous et du nombre de trous perforés dans la plaque. Et la sirène produit un son extrêmement bruyant sans aucune caisse de résonance !

Ingo R. Titze, actuellement un des plus grand spécialistes de la voix, prend justement *la sirène à trous* comme l'exemple de phénomène *aérodynamique sonore le plus proche de la glotte*.

Nous résumons l'essentiel de ses explications.

Titze rappelle que le son est presque toujours produit par une interruption soudaine de courant aérien. Ce sont ces dérangements pressionnels transportés dans un milieu élastique qu'on appelle la propagation du son.

Quand *on frappe des mains*, l'air est soudainement écrasé et doit s'échapper par les petits espaces libres en produisant un bruit caractéristique. On peut y ajouter un effet de caisse de résonance en mettant les mains légèrement en creux quand on les frappe l'une contre l'autre.

Quand on projette un jet d'air sous pression sur un disque percé de trous réguliers et mis en

rotation, on obtient des sons très intenses : c'est *le principe de la sirène à trous*. La sirène de Seebeck est la plus connue en acoustique.

Le passage *brusquement interrompu* du jet aérien crée des dérangements, des changements *pressionnels* très importants : *une grande énergie acoustique est alors générée, ou libérée*.

Plus le jet aérien est entrecoupé, donc freiné puis relâché, plus la fréquence du son, sa hauteur est élevée.

Pour Titze la sirène est une source acoustique très proche de la source du son glottique, base de la phonation pour cette raison : dans les deux cas nous avons affaire à un courant d'air forcé au travers d'un orifice à ouverture et fermeture régulière, périodique. Il ressort de ce système *une série de pulsations de courant ou une série de pulsations fluides (a serie of flow puls)*. (Titze, 2000 : 125)

Nous notons qu'une « *série de pulsations de courant* » n'est autre qu'un **processus aérodynamique**, dans le cas de la sirène à trous comme dans le cas du jet aérien qui traverse la lumière laryngée.

Pour Titze cette analogie est plus qu'intéressante si l'on compare la vibration des cordes vocales à *une forme combinée du frapper des mains et de la sirène à trous*. Il est possible alors de bien faire la différence entre *un déplacement d'écoulement* au travers de la glotte, où l'air est donc écrasé dans toutes les directions, et *un courant transglottique*, lequel est *forcé au travers d'un orifice*.

Titze fait allusion à des modèles de la glotte qu'il avait lui-même expérimentés en 1985 et dans lesquels les deux types de « *courants d'air* », d'écoulements de l'air, apparaissaient distinctement. Le courant transglottique, dont le fonctionnement est semblable à celui de la sirène à trous, est le type de courant *dominant* dans le fonctionnement de la glotte. Mais l'autre type, celui du déplacement d'écoulement, entre en ligne de compte au moment de la fermeture soudaine des cordes vocales.

Mais Titze ne développe pas plus loin *ces allusions à l'aérodynamique* du fonctionnement de la glotte. Il termine d'ailleurs ses remarques en s'étonnant que souvent, dans le monde animal et humain, les plus petites créatures produisent souvent des sons plus intenses que les grosses créatures.

« *Des petites sources acoustiques deviennent extrêmement intenses quand elles sont liées à des changements rapides de l'écoulement aérien* » (Titze, 2000 : 125).

Titze précise que ces « *changements rapides* » de *l'écoulement aérien doivent être non-sinusoïdaux pour créer des changements pressionnels tels que des sons intenses soient produits*. Ce n'est pas le cas par exemple avec des pistons que l'on fait bouger d'une manière régulière sinusoïdale. Titze ne développe pas non plus cette idée de *l'aspect non sinusoïdal*. C'est justement le cas par contre dans *des processus tourbillonnaires*, mais Titze considère encore, comme beaucoup de collègues, que les processus tourbillonnaires et de turbulence sont plutôt des facteurs de perte de force, d'énergie, au niveau du larynx, et aussi tout au plus des facteurs producteurs de certaines consonnes au niveau de la cavité buccale.

L'énigme des tourbillons dans la phonation reste donc encore entière chez les spécialistes de la voix.

C'est dans l'ouvrage du médecin, audiollogue et linguiste Lafon, ouvrage datant de 1961, que nous avons trouvé d'autres indices sur la réalité de ces « puffs » liés aux tourbillons.

1.6 Lafon : La phonation et les tourbillons

1.6.1 Les tourbillons et le son

A notre connaissance Lafon est un des premiers à avoir émis aussi concrètement l'idée de la nécessité de *processus tourbillonnaires* au travers de la glotte comme facteur producteur du son dans la phonation.

Nous faisons une lecture *détaillée* de son ouvrage « *Message et Phonétique* », qui d'après nous trouve son actualité justement de par les études et modélisations des aérodynamiciens qui travaillent entre-temps avec les linguistes. (Lafon, 1961)

Remarque : c'est nous qui soulignons et relevons en caractères gras les éléments qui sont pertinents pour notre sujet.

« *Deux facteurs sont nécessaires pour qu'il y ait phonation : un rétrécissement lentement variable servant de générateur sonore et un souffle qui fournit l'énergie nécessaire. La conjonction de ces deux facteurs engendre des sons modulés qui se propagent vers l'extérieur,*

offrant l'image acoustique des formes (S.M. : et des mouvements, nous faut-il préciser) qui leur ont donné naissance.

La phonation ne possède pas de système organisé propre ; elle se greffe sur l'appareil respiratoire pour emprunter ensuite, grâce au carrefour pharyngé, la voie digestive : la respiration fournit le souffle d'air et crée le son par la génération de tourbillons au niveau du rétrécissement laryngé. L'appareil digestif offre la mobilité fonctionnelle de la langue et la variabilité de forme de la bouche par le jeu des mâchoires pour former ou plus précisément moduler le matériel sonore expiratoire.

Il pourrait sembler possible de séparer l'étude de l'organe vibrant de celui des résonateurs. En réalité, la phonation présente une unité fonctionnelle : les impulsions acoustiques sortant de la bouche sont marquées du sceau laryngé, modelées par les résonateurs en vue d'une expression phonétique à laquelle tout concourt » (Lafon, 1961 : 83).

On trouve ici des remarques fondamentales sur le plan phénoménologique que l'on verra, quelques années plus tard, confirmées par les observations de Zinke et un peu plus tard par celles du biophysicien Rybak, qui lui aussi considère la parole comme étant premièrement ancrée dans *la modulation de la ventilation*. Cette modulation est réalisée en majeure partie par les mouvements articulatoires de la langue dans le conduit vocal et plus spécialement par de *fines circonvolutions de la surface de la langue* que l'on commence à ne prendre en considération que depuis peu de temps en phonétique et ce, grâce aux méthodes d'imagerie échographique et de résonance magnétique. (Voir des visualisations de Narayanan et Alwan (1995,1997) chapitre IV)

L'air phonatoire est *encodé dans la « boîte noire »* du conduit vocal, pour parler avec des termes de Rybak, en 1994, termes employés d'ailleurs par Lafon mais déjà en 1971, lors d'un colloque dont nous n'avons pas retrouvé le lieu. (Lafon, 1971)

1.6.2 La « forme acoustique » de la voix : « pouffs » et tourbillons

«Lorsqu'on a enregistré un son (S.M.: au sens acoustique ou musical) sur une bande magnétique, on peut, en ralentissant progressivement la vitesse de déroulement, entendre la baisse de hauteur du son proportionnelle à la décélération jusqu'à ce que le son grave ne possède plus les qualités physiques requises pour se trouver dans le champ auditif de la cochlée.

*Par contre, lorsqu'on a enregistré **une voix, de la parole** par exemple, on entend la baisse de hauteur jusqu'à une certaine fréquence où le son (S.M.: ici au sens d'un son du langage, un phon.) n'est plus audible comme précédemment, mais il est remplacé **par une suite d'explosions** dont l'écart va en augmentant au fur et à mesure du ralentissement. Ces bruits sont assez comparables à ce que font **des bulles qui crèvent la surface d'une masse pâteuse**.**

Nous entendons une suite de coups, parce que la cochlée n'est pas capable de les intégrer comme fréquence : l'ébranlement cochléaire est amorti avant que n'apparaisse un second coup.

*La voix est formée d'une série de «**pouffs**»* (S.M. : orthographe et prononciation gallicisées de Lafon) qui correspondent chacun à une ouverture laryngée et au passage d'une brusque bouffée d'air dans le pharynx. Chacun de ces à-coups représente **une impulsion** : et l'unité peut-être audible en tant que telle si l'on sort des limites d'intégration cochléaire. On peut retrouver **une structure impulsionnelle** avec un appareil enregistreur-analyseur, si l'on reste en dessous de la limite d'intégration de cet appareil. C'est ainsi qu'avec le « sona-graph » on enregistre des impulsions en dessous un rythme de 300 par seconde en déroulement normal avec large filtre, de 800 en enregistrement rapide.*

Les résonateurs, étalant une impulsion dans le temps, ont tendance à faire disparaître cet aspect périodique, mais lorsque le rythme laryngé est lent, chaque impulsion peut avoir une existence propre. Elle traverse les résonateurs, y est filtrée, mais en éveille l'écho de façon plus ou moins intense suivant sa qualité acoustique.

*Le larynx possède ce que l'on appelle **une fonction transitoire où la fréquence n'est qu'artifice de calcul, commodité mathématique de l'étude du tourbillon**. (S.M. : Sur le réductionnisme des appareils de mesure Rybak s'est exprimé de la même manière et insiste sur le caractère dynamique et physiologie de la parole.) L'analyse de Fourier montre pour une impulsion un spectre continu de fréquences, renforcées aux zones de résonance. Lorsque les impulsions se suivent, l'analyse montre une série régulière d'harmoniques. Plus les impulsions sont écartées, plus les harmoniques sont serrés pour devenir pratiquement continus pour un écart important. Inversement, lorsque les impulsions se rapprochent, leur décroissance exponentielle se superpose. À l'analyse, le son qui sort de la bouche possède la fréquence fondamentale laryngée et une série d'harmoniques plus ou moins renforcées suivant les résonateurs traversés. (...)» (Lafon, 1961 : 83-84)*

(*On se souvient ici de la même remarque de Merkel en 1863 et de Smith sur les fameux « pouffs » d'air, « puffs » en anglais. Nous verrons plus loin des observations d'après des prises de vue de Zinke

sur les gouttelettes constituant le jet ventilatoire-phonatoire. Ceci a été en partie confirmé par un film en strioscopie interférentielle, réalisé par Rybak en 1980, à l'ONERA, et dont nous présentons deux syllabes dans le DVD -5^e partie.)

Sur ce film, que Rybak nous avait présenté en 2002, on voyait par exemple la voyelle nasale [I] de manière particulièrement impressionnante: *un écoulement de bulles, pulsant rythmiquement* et rappelant de la glycérine (l'air phonatoire expiré étant assez visqueux comparé à l'air moins chaud du laboratoire), sortait de la bouche avec des contours bien définis.)

1.6.3 Impulsion et larynx

« En ce qui concerne la voix, c'est-à-dire les sons émis par le larynx et modulés par les qualités supra-laryngées, la modulation ne peut se faire qu'à partir de l'énergie donnée par le larynx. Le résonateur ne peut renforcer qu'une énergie sonore qui lui est transmise, ou bien il est obligé de forger le son en utilisant le souffle qui le traverse, donc avec un bruit d'écoulement turbulent qui enlève à la fois ses qualités de tonalité dans la différenciation des timbres. (...) » (Lafon, 1961 : 86)

Nous « suivons à la trace » le parcours de cette impulsion constituée de tourbillons.

1.6.4 Impulsion et cavités supra-laryngées

«L'impulsion qui sort du larynx se propage dans des cavités plus ou moins ouvertes, plus ou moins larges. Ces cavités jouent d'abord un rôle de filtre, atténuant considérablement les fréquences graves au profit relatif des zones aiguës. Plus les zones fréquentielles sont éloignées de la zone de timbre, plus le filtrage sera net : la cavité absorbe partiellement l'énergie sonore.

Elle a ensuite un rôle de résonance, les sons introduits sont renvoyés en écho à la suite de l'impulsion décroissance exponentielle. Elles sont plus ou moins bien mises en évidence suivant que le tourbillon d'air possède ou non les qualités nécessaires pour faire vibrer le résonateur correspondant.

La voix est le support acoustique, la parole, l'image des cavités de résonance, forme imposée au son laryngé » (Lafon, 1961 : 89).*

*Là encore il nous faut ici nuancer ou plutôt compléter les remarques de Lafon et préciser que la

parole n'est pas que « *l'image des cavités de résonance* » mais l'empreinte dynamique, aérodynamique des **mouvements** articulatoires nécessaires pour modeler et moduler « la pâte sonore », le jet phonatoire du fondamental.

Mais il faut dire aussi qu'au cours de son ouvrage Lafon reprécise une fois sa description et sa compréhension de la phonation : « *Le son laryngé traverse la cavité qui s'ouvre vers le point d'articulation suivant; il donne donc, à l'audition, l'image de la forme mouvante d'un point d'articulation à l'autre* » (Lafon, 1961 : 110).

C'est ce que Rybak mettra plus tard en évidence et qu'il nommera de manière précise : *le code lingual*.

1.6.5 Impulsion et phonème

« *En réalité, le larynx et les résonateurs ne sont pas indépendants, situés à la suite les uns des autres, ils sont tributaires de l'action acoustique des cavités voisines. En particulier, le régime du larynx dépend de l'état acoustique du pharynx et de ses ondes stationnaires.*

L'impulsion recueillie à la sortie de la bouche contient donc l'image acoustique des cavités de résonance, à partir de la forme acoustique que lui a donnée le larynx. (...)

Il ne peut pas être question de chercher dans l'impulsion originelle la structure fréquentielle qu'elle possédera à la sortie de la bouche. Le tourbillon laryngé, en analyse de Fourier, à une structure fréquentielle continue de la fréquence 0 à une fréquence plus ou moins élevée suivant les qualités de l'impulsion. Cette structure doit donc être modelée pour devenir significative : le larynx ne fournit pas d'élément fréquentiel formantique» (Lafon, 1961 : 106-107).

Dix ans plus tard, en 1971, dans un colloque dont nous n'avons pas retrouvé le lieu exact, Lafon, après avoir exposé *le fonctionnement par impulsions des voix oesophagiennes*, précisait son point de vue :

« *Cette impulsion se compose de tourbillons complexes que Smith avait essayé de mettre en évidence par stroboscopie avec un larynx artificiel. (...)* (S.M. : là nous retrouvons Smith étudié et cité plus haut comme étant à l'origine de cette notion des « puffs » et que Lafon n'a pas laissé inaperçue.)

Dans la voix laryngée de telles impulsions sont très difficiles à faire apparaître tant le larynx est

un bon oscillateur, mis en route il produit un train et non une impulsion isolée. Cependant dans des voix très graves 'on retrouve cette structure impulsionnelle que ce soit au sonograph, à l'oscillographe ou par tout autre moyen d'enregistrement graphique » (Lafon, 1971 : 20).

Lafon ne se lassait pas d'insister sur la différence entre *l'analyse fréquentielle et l'analyse impulsionnelle**. Pour lui elles devaient être complémentaires.

*De manière comparable à Lafon, Rybak insiste sur la différence entre *l'analyse quantitative* pratiquée habituellement avec les oscillogrammes et la spectrographie et la sienne, qui est *une analyse qualitative*.

On voit que Lafon, en tant que médecin, psychologue, audiollogue et linguiste, décrit de manière phénoménologique, donc très réaliste et concrète, les processus formateurs de la voix et de la parole. Il ne se lassait pas d'insister spécialement sur le phénomène des « *tourbillons complexes* », *de la turbulence de l'air phonatoire* pour caractériser la nature et le fonctionnement de ces impulsions laryngiennes. C'est pour cette dernière raison certainement qu'on cite de nouveau Lafon dans les congrès de linguistique. **

**Communication personnelle de notre ancien professeur, Madame Gabrielle Konopczynski , qui nous précisait aussi qu'on était arrivé en phonétique à certaines limites de l'aspect physique de la phonation et qu'on revenait à la « physio », c'est-à-dire la physiologie, pour pouvoir continuer à avancer.

Comme nous l'avons déjà exposé, et nous le rappelons ici, ces phénomènes tourbillonnaires, non linéaires, chaotiques, sont encore très mal compris. On ne les prend en compte dans les tentatives d'explication des processus générateurs des sons de la voix humaine que depuis quelques années.

Pour conclure on peut dire que cette salve de «puffs » constitués de gouttelettes d'air phonatoire humide et chaud sort très certainement de la glotte dans des structures aérodynamiques *tourbillonnaires* qui relèvent donc de la mécanique et de la dynamique des fluides.

Dans la partie suivante nous donnons un résumé de quelques études et de modélisations actuelles qui viennent confirmer les intuitions et les idées de Smith comme de Lafon et aussi soutenir notre étude sur les turbulences phonatoires externes.

2 Modélisations actuelles de la glotte en aérodynamique et aéroacoustique

2-1 Pelorson et les phénomènes tourbillonnaires au sein de la glotte

Pelorson, que nous avons présenté dans notre chapitre sur la turbulence en mécanique des fluides, travaille depuis 1994 avec des collaborateurs de différents pays - spécialement avec Hirschberg, de l'université d'Eindhoven - sur des modélisations des cordes vocales et aussi des lèvres.

Comme il le précise dans la présentation de ses recherches :

«Un modèle analytique d'écoulement au travers des cordes vocales ou des lèvres a été développé et validé. Cette description prend en compte en particulier le phénomène de décollement tourbillonnaire qui est en général négligé dans la plupart des études actuelles. Ce modèle d'écoulement a été couplé à un modèle simplifié des cordes vocales et du conduit vocal. Les effets de ce nouveau modèle d'écoulement sur les résultats de simulations de sons voisés sont particulièrement spectaculaires.» (Pelorson et al. , 1996 a)

Ces phénomènes aérodynamiques très subtils ne sont pas faciles à mettre en évidence et Pelorson d'ajouter :

« Cependant, si cette description apparaît tout à fait satisfaisante en ce qui concerne la modélisation des sons voisés, elle reste insuffisante en ce qui concerne les plosives (Pelorson et al., 1996b). Ceci s'explique par la nécessité d'une description très précise de l'écoulement durant le transitoire initial. Nous travaillons actuellement, en collaboration avec l'Université Technologique d'Eindhoven, au développement de modèles plus précis encore (modèles instationnaires de triple couche).»

Pelorson et ses collègues font même des études sur « l'interaction entre les écoulements aériens et les parois du tract vocal », études très rares encore aujourd'hui.

Pelorson a initié en 1993 « une étude sur l'influence des fausses cordes vocales sur la phonation. Des phénomènes de réattachement du jet supraglottique ont été déjà observés. » On voit apparaître dans ce phénomène des vorticités, des tourbillons naissants, dont l'évolution est pour l'instant négligée.

Pelorson travaille aussi avec ses collègues pour intégrer dans des modèles les phénomènes liés aux propriétés plastiques des tissus humains.

Mais c'est surtout jusque dans « *la description de la propagation et du rayonnement des ondes sonores* » que Pelorson porte son attention et il constate en passant « ***la sévère limitation des modèles actuels en ondes planes*** ». Nous rendons compte ici de la mise en évidence de *structures tourbillonnaires* au travers de la lumière de la glotte comme modèle in vitro :

Figure page suivante :

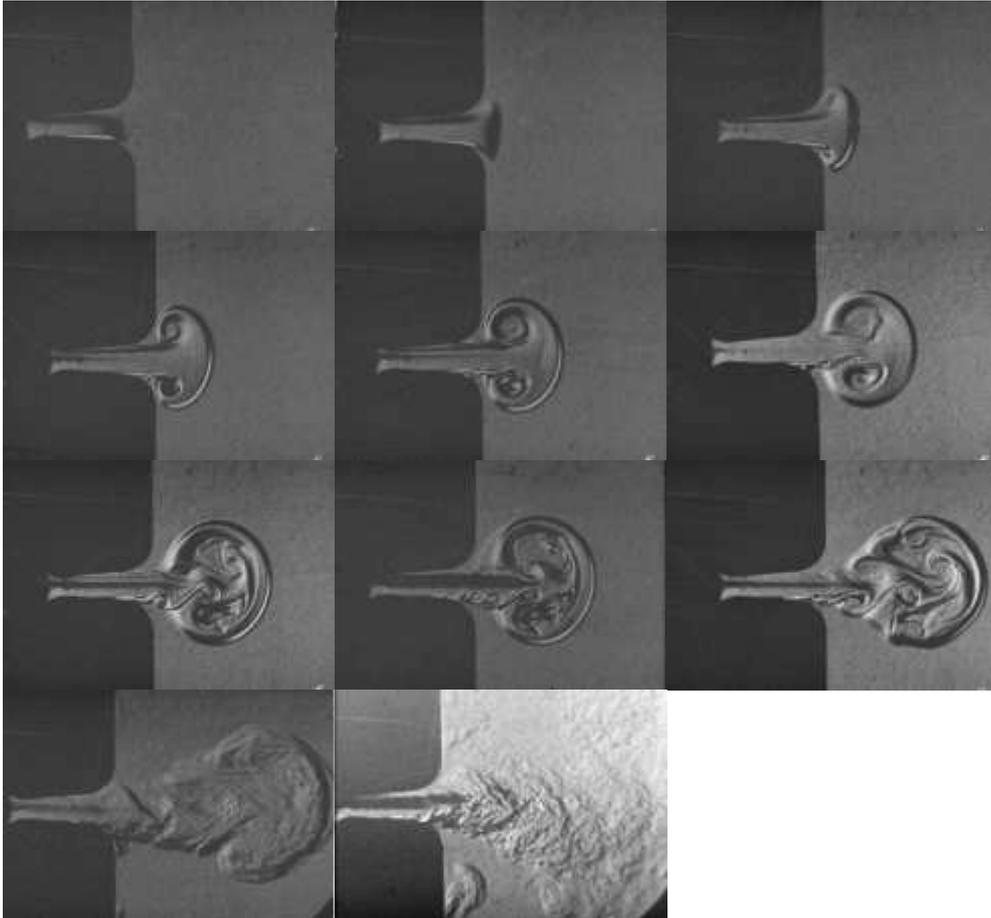


Figure n° :33 (Pelorson, 2000)

« Voici plusieurs photos (n°33) de l'écoulement prises sur une maquette des cordes vocales. L'écoulement se sépare des parois des cordes vocales en un point en général assez proche de du col. On observe aussi une désagrégation progressive du tourbillon en des structures de plus petites dimensions jusqu'à l'apparition de turbulence ».

Perlorson précise ailleurs (S.M.: ici nous traduisons de l'anglais.) :

« Les visualisations obtenues confirment que la séparation des flots n'a pas lieu à la fin du canal glottal mais à l'intérieur de celui-ci. (...) »

Il est intéressant de constater que la transition du flot de la forme laminaire à la forme turbulente peut-être clairement observée (comme dans la fig. 4, S.M. : la figure ci-dessus) comme ayant lieu à l'extérieur du canal glottal même pour un nombre de Reynold ($Re = O(10^4)$). Il est de plus évident que la turbulence (S.M. : ici turbulence au sens de forme dissipative, diffuse.) n'apparaît pas juste à la sortie du jet fluide mais après un délai temporel important. La visualisation du fluide montre premièrement la formation de structures **vorticales**

bi- dimensionnelles cohérentes avant qu'une structure de mouvement chaotique tridimensionnelle n'apparaisse (turbulence). Ce dernier point pourrait donner une explication rationnelle à la forte influence du délai temporel entre le bruit d'explosion et la pulsion glottale observée pendant les tests de perception utilisant des voyelles synthétiques (Pelorson citant : Hermès, 1991) » (Pelorson, 1995:200).

*« Ainsi selon la forme du conduit vocal, on va obtenir des sons très différents. **Il peut également exister un couplage important entre le résonateur acoustique et ce système auto-oscillant** » (Pelorson, 2000).*

Si nous reprenons l'exemple d'une sonorité émise sur un fondamental de 200 hertz , alors il nous faut nous représenter les vorticités et les turbulences comme se succédant au rythme de 200 fois en une seconde ! Il se forme alors ce qu'on appelle en mécanique des fluides un « **jet pulsé** », une suite de salves : c'est-à-dire *une véritable chaîne tourbillonnaire*. Nous insisterons plusieurs fois c'est cette représentation.

Dans le phénomène des turbulences phonatoires **externes**, que nous avons mises en évidence pour notre thèse, nous avons un phénomène de jet pulsé d'une bien plus grande complexité. Ce ne sont plus des courants laminaires qui viennent traverser une ouverture relativement ou apparemment simple comme la glotte, mais des courants de vorticités et de turbulences phonatoires constamment remodelés par les parois plastiques du conduit vocal et surtout par les circonvolutions de la surface extrêmement mobile de la langue puis passant au travers des lèvres ou de la bouche entrouverte, parfois se heurtant contre les dents, qui sortent de l'orifice buccal.

Pelorson a même fait une visualisation de *ces tourbillons à la sortie de la bouche*. Il constate alors dans son article :

«Ce même genre de phénomène (S.M.: tourbillons et turbulence) a été observé au niveau des lèvres (locuteur disant « Ba », plosives labiales) » (Pelorson, 2000).

Nous donnons dans notre DVD cet exemple de visualisation la syllabe [**ba**], publié comme vidéo sur Internet par Pelorson.

Il est regrettable que cette visualisation soit donnée *sans le son synchronisé* lui correspondant. L'enveloppe globale y est bien apparente, mais la structure morphodynamique y est assez

réduite et nous pouvons supposer que le locuteur n'a pas prononcé cette syllabe spécialement distinctement et dans l'espace. On ne peut pas vraiment y différencier l'émission de la consonne puis celle de la voyelle.

Une chose est certaine : il y a un rapport entre d'une part, le régime ventilatoire subglottique, l'apparition du son, sa formation, son « moulage ou modelage » ultrarapide dans le conduit vocal, et d'autre part, son mode d'apparition comme structures aérodynamiques (morphodynamique) du « son-résultat » comme nous le montrons dans le DVD. Certes les problèmes de couplage entre les modulations des ondes acoustiques stationnaires et ces écoulements aériens compressés sont très complexes et encore non résolus, mais la simple remarque de Pelorson par sa constatation que « *ce même genre de phénomène a été observé au niveau des lèvres...* » montre que ces *morphodynamiques tourbillonnaires phonatoires externes* doivent aussi être prises en considération et étudiées si l'on veut saisir le phénomène de la phonation humaine dans sa globalité.

2.2. Un autre exemple de recherche sur des modélisations physiques des cordes vocales

Nous ne donnons que quelques images d'une étude toute récente sur l'analyse du jet aérien au travers d'un modèle des cordes vocales réalisé par Thomson et Mongeau :

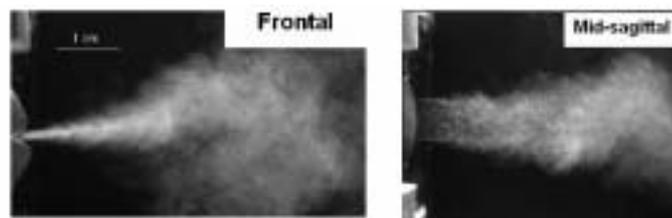


Fig. 5. Représentation de l'écoulement en vue frontale et mid-sagittale.

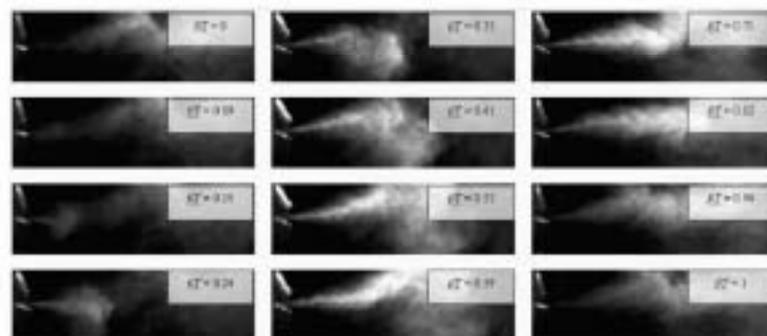


Fig. 6. Visualisation du filament tourbillonnaire ultrarapide.

Figure n°34 :

« Visualisation du flux »

(Thomson et Mongeau)

Les chercheurs font remarquer « *que l'écoulement est laminaire, avec des zones de turbulence* ». Le flux ayant une surface elliptique, ils ont observé une rotation de 90° de l'axe du jet dû à l'influence *des mouvements tourbillonnaires* aux encoignures qui tendent à s'attirer l'un vers l'autre. (Thomson et Mongeau, sans date, mis sur Internet)

Les phénomènes tourbillonnaires, chaotiques, au sein de l'appareil phonatoire ont encore beaucoup de choses à nous révéler et la modélisation de la glotte et des cordes vocales rencontrent de sérieux problèmes, entre autres de part l'extrême finesse et élasticité de leurs tissus.

Nous avons commencé ce chapitre par une remarque de Merkel en 1843 et nous commençons à peine à pouvoir les comprendre et les confirmer au XXI^e siècle.

En quête d'autres pistes venant étayer le fait qu'il y a un rapport entre l'acoustique et l'aérodynamique, nous avons trouvé quelques études récentes dans le domaine voisin de la recherche sur les instruments à vent, à savoir : sur les tourbillons dans les flûtes à bec et les tuyaux d'orgue.

Nous ne les donnons pas ici parce que nous penserions que la glotte ne fonctionne que de la même manière qu'un instrument à vent, mais parce que nous avons dans la flûte et dans le tuyau d'orgue tout comme dans la glotte **un phénomène acoustique d'écoulement**.

3. Les tourbillons et la génération du son dans l'air

En acoustique on distingue justement deux grands systèmes producteurs de son :

- *les sons de vibration* : sons qui résultent de la vibration d'un élément matériel solide autour de sa position d'équilibre, la vibration se transmettant à l'air environnant.
- *les sons d'écoulement* : sons qui résultent de la formation *de structures tourbillonnaires s'écoulant de façon irrégulière*, on parle alors d'aéroacoustique.

Un jet d'air quand il est poussé à une certaine vitesse devient « *sensible* » (c'est le terme employé en physique) et il commence à osciller : son oscillation devient audible si elle s'effectue à une fréquence qui s'y prête car il se subdivise en une infinité de minuscules

tourbillons, générateurs d'énergie acoustique.

Notons ici que le célèbre physicien anglais Tyndall, au XIXe siècle, avait fait de nombreuses expériences sur *la sensibilité* des jets d'air, *des flammes sensibles*, mais aussi sur l'extrême sensibilité de fins jets d'eau aux sons.

Entre les deux guerres, l'abbé Carrière, acousticien de l'institut de Toulouse, a longuement étudié le comportement des *flammes sensibles* et des jets.

Voici une illustration de ces expériences qui nous amène au coeur de la question des tourbillons en rapport avec la génération de son :



Figure n°35 : Chaînes tourbillonnaires engendrées par une hanche d'orgue ou le biseau d'une flûte à bec.

(Carrière, 1936, tiré de Schwenk, 1963:120)

Quand on introduit *un obstacle** dans « un jet sensible », celui-ci est divisé en deux parties inégales, suivant les angles et l'acuité des arrêtes qu'il rencontre. Des chaînes tourbillonnaires se forment alors avec des changements de vitesse si puissants qu'elles se mettent à résonner, à produire un son, ce qui provoque aussitôt des effets pressionnels en retour sur « le jet source ». *Une interférence s'installe entre les deux processus qui se renforcent alors mutuellement.*

*cas de figure que nous reconnaissons de notre chapitre I, 4.5.

Lugt, a publié en 1979, un ouvrage de référence sur la formation des tourbillons dans la nature et la technique. Il y fait, sur deux pages seulement, une remarque pour nous fondamentale **sur la production acoustique due à des tourbillons**. Il donne le schéma suivant :

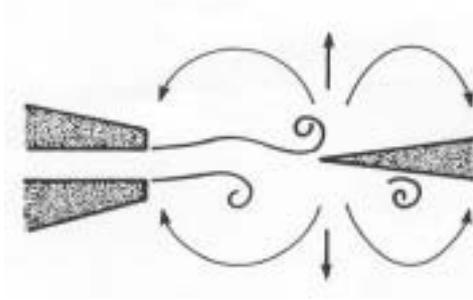


Figure n°36 : Renforcement acoustique par une arrête oscillante dans un jet aérien.

Le champ acoustique influence en retour l'instabilité à l'embouchure du jet (Lugt, 1979 :201-202)

« (...), **le rayonnement acoustique de tourbillons** ou de champs de vorticités, est dû à une **forte accélération au sein des courants tourbillonnaires**. (...) L'accélération maximum se produisant à la naissance du tourbillon et non pas dans sa phase finale de dissipation turbulente, on comprend que la **génération acoustique soit aussi à son maximum dans la phase d'apparition du tourbillon** » (Lugt, 1979: 202, S.M. : c'est nous qui traduisons et soulignons en gras).

Comment l'ingénieur allemand Lugt peut-il décrire avec tant de précision la génération du son à l'intérieur de ces processus tourbillonnaires quasi microscopiques en affirmant que *la génération acoustique est à son maximum dans la phase d'apparition du tourbillon* ? Il ne le précise pas dans son ouvrage. Est-ce une évidence pour un mécanicien des fluides ?

Dans un milieu gazeux, un tourbillon suppose un noyau de matière en rotation, donc des efforts centrifuges locaux, qui engendrent des gradients de pression statique. Puisqu'on a affaire à un gaz, toute variation temporelle de cette pression statique (donc toute variation d'inertie du mouvement tourbillonnaire) s'accompagne d'une variation de densité. C'est cette dernière qui est susceptible de se propager de proche en proche en tant qu'onde sonore. C'est donc la déformation ou plus généralement toute évolution du tourbillon qui est génératrice du bruit. Un tourbillon déjà produit qui glisse dans un écoulement sans être modifié ne fait pas de bruit. En revanche, un tourbillon déformé par un autre ou par un obstacle solide fait du bruit. De même quand un tourbillon se forme (apparaît), par définition il y a une forte variation temporelle de l'inertie associée et donc du bruit. Le son est une trace de la dynamique tourbillonnaire. Mais attention, toute variation tourbillonnaire ne produit pas un bruit notable. Il faut que la vitesse de variation des régimes tourbillonnaires soit suffisante. Quand sont-ils des turbulences produites au travers de la glotte et qui traverse le conduit buccal ? Peut-être que des simulations numériques donneront des éléments de réponse.

Lugt rend attentif au fait que *l'énergie acoustique* est en quelque sorte libérée, dissipée par « *la forte accélération au sein des courants tourbillonnaires* ». On doit apparemment comprendre que *l'énergie cinétique*, qui est ici renforcée par l'immense accélération provoquée par la *vorticité*, (*le tourbillon naissant*), que cette énergie cinétique se *transforme* en « *énergie acoustique* ».

Nous avons tous appris que le son est une oscillation sur place au niveau moléculaire mais pas un « déplacement de matière ».

Cela veut dire que cette transformation de l'énergie cinétique en énergie acoustique se passe aussi au niveau moléculaire. Les vorticités, les tourbillons provoquent des processus d'accélération tels que *des différences pressionnelles*, des impulsions pressionnelles sont générées et que celles-ci se transmettent à la structure interne moléculaire de l'air dans lequel elles agissent. Suivant la force, la nature de cette énergie cinétique, les mouvements qu'elle cause se propageront de différentes manières dans le milieu élastique ambiant mis en *oscillation*.

« *En partant de la source sonore, la propagation, au départ **sphérique**, va fortement être modifiée en fonction du milieu ambiant.*

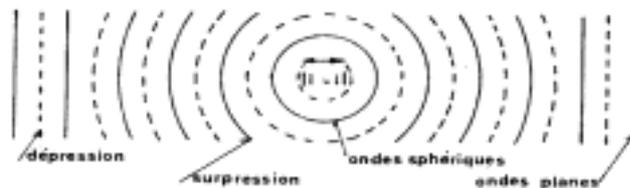


Figure n°37 : Rayonnement des ondes acoustiques. Leur forme sphérique.(source :ci-dessous)

« **A moins de 1m** de la source sonore nous parlons **d'ondes sphériques** et **au delà de 1m d'ondes planes**. A partir de cette distance de 1m, les mesures permettant de quantifier l'énergie sonore mise en jeu deviennent plus fiables » (www.episc.ch/Branches/electroniques :la nature du son.).

C'est dans *cette zone d'ondes sphériques* qu'apparaissent les jets tourbillonnaires des sons du langage, jusqu'à un mètre environ. Ceci nous semble extrêmement important mais nous ne saurions encore l'expliquer.

Plus nous approfondissons ces questions et plus nous nous rendons compte que *le son* reste encore assez mystérieux même pour les plus grands spécialistes. C'est apparemment la raison pour laquelle « *on évite* » de traiter la question de *la nature exacte de l'énergie acoustique* dans les ouvrages spécialisés, comme le fait remarquer Robert Miquel, ancien ingénieur acousticien, dans un ouvrage sur les « *formes sonores* ». (Miquel, 2002 : 63-64)

Les remarques de Lugt sont en tout cas pour nous une indication fondamentale pour prendre en compte le rôle « générateur » des phénomènes aérodynamiques tourbillonnaires dans la production du son au sein de la glotte.

Une étude assez récente sur les flûtes à bec et les tuyaux d'orgue faite à Freiburg, en Allemagne, va venir renforcer l'importance que l'on doit donner aux tourbillons dans la production du son. Quelques remarques sur les tuyaux d'orgue nous sont d'abord nécessaires.

4. Les tuyaux d'orgue

4.1. Les tourbillons générateurs de son dans les tuyaux d'orgue

Les études expérimentales des tuyaux à embouchure de flûtes présentent des difficultés presque insurmontables quand il s'agit de flûtes soufflées à *la bouche* par un musicien. Ces difficultés semblent être éliminées quand on étudie le tuyau d'orgue car celui-ci est alimenté en air de *manière stable et régulière*, et pourtant, encore aujourd'hui les techniciens ne sont pas arrivés à mettre en évidence tous les processus aérodynamiques qui contribuent à la formation du son.

Le principe de tout instrument de musique réunit un excitateur à un corps sonore ou résonateur. L'excitateur génère un mouvement vibratoire, le résonateur y ajoute sa fréquence propre et fournit un « timbre » au mouvement vibratoire. Le résonateur, ici le tuyau sonore, fonctionne selon plusieurs modes vibratoires correspondant à la répartition des noeuds et des ventres de pressions qu'il contient.

Ce fonctionnement rappelle celui de la glotte et du conduit vocal et cette analogie est souvent utilisée dans les ouvrages qui traitent de la phonation. On compare aussi le fonctionnement de la glotte et du conduit vocal à un violon aérien (l'archet étant la colonne d'air verticale traversant la trachée et jouant sur les *cordes* vocales), ou à une clarinette (au niveau de la

glotte) et un trombone à coulisse (au niveau de la cavité buccale), ou à une anche d'orgue, ou à une sirène...

Il y a un processus commun entre la bouche, des tuyaux d'orgue et la glotte : c'est que nous avons affaire à un jet aérien traversant « une lumière » très étroite et rencontrant un obstacle en son sein ce qui permet à ce jet d'entrer dans un état d'excitation, d'oscillation, générateur de « sons d'écoulement ».

Dans le cas des tuyaux d'orgue (ou de la flûte à bec) un jet aérien, qu'on appelle une « lame d'air », est projeté - donc avec une certaine célérité et pression - sur ou vers un obstacle constitué par une arrête biseautée. C'est la « lèvre supérieure » pour les facteurs d'orgue ou le « biseau » pour les flûtistes comme pour les physiciens.

La lame d'air bifurque brusquement et commence à osciller de part et d'autre du biseau. On constate aussitôt la formation d'enroulements, de tourbillons avec un halo ou un champ de turbulences.

Le point important ici c'est que ce système aérien oscillatoire est en lui-même générateur d'une *énergie acoustique* très riche.

L'association de ce système oscillatoire aérien (la lame d'air en interaction avec le biseau) à un système résonateur fait que ces deux systèmes interagissent de manière extrêmement complexe en se superposant et en interférant.

Voici un extrait d'une étude d'Aristide Cavaillé-Coll, étude encore de nos jours très appréciée dans le monde des facteurs d'orgue et qui date de 1895. Elle reflète l'expérience d'un homme de métier. Ces remarques très précises sur le comportement aérien de la lame d'air dans la « bouche » des tuyaux d'orgue se trouvent confirmées par des études au laser, cent ans plus tard, comme nous le montrons juste après.

« Maintenant examinons un phénomène assez singulier qui a lieu particulièrement dans les tuyaux de métal.

*Il arrive très souvent (même avec les meilleurs systèmes d'embouchure aujourd'hui en usage) que le son a une certaine âpreté ; ou un frissement désagréable. L'expérience a fait découvrir qu'en faisant de **petites incisions** (qu'on appelle **les dents**) de distance en distance sur la lèvre inférieure, on faisait disparaître cet inconvénient, et le son devient en effet plus pur. **II***

semblerait par là qu'on divise la lame d'air en autant de petites lames qu'il y a d'incisions sur la lèvre inférieure et que ces petites lames vibrent avec plus d'ensemble que lorsqu'elles ne forment qu'une seule et même lame d'air. Ce phénomène se fait remarquer dans presque tous les tuyaux de métal. Il y a cependant quelques exceptions : on trouve, dans une même série de tuyaux dont se compose un jeu de l'orgue, certains tuyaux auxquels on pourrait éviter de faire des dents, le son étant aussi pur sans cette opération.

Il est à remarquer que ce sont toujours les deux extrêmes, les plus grands et les plus petits d'un jeu, qui parlent le mieux sans qu'il soit nécessaire de leur faire les dents dont nous venons de parler, et que, d'un autre côté, les tuyaux intermédiaires donnent le plus de difficultés à bien emboucher. On est presque généralement contraint à faire des dents à ceux-ci ; cependant, comme il y a des cas particuliers qui montrent que deux tuyaux de même forme et de mêmes dimensions donnent des qualités de sons aussi pures l'un avec les dents, l'autre sans avoir recours à ce moyen, tout cela porte à croire que le principal inconvénient résulte de la difficulté qu'il y a à diriger la lame d'air de manière qu'elle rencontre parfaitement dans toute sa largeur le biseau qui lui est opposé, et qu'elle puisse vibrer en conservant sa forme toujours parallèlement à la ligne du biseau » (Cavaillé-Coll, 1895).

(S.M. : c'est nous qui faisant ressortir certains éléments en caractères gras, éléments qui vont réapparaître dans l'étude suivante.)

4. 2. Études récentes au laser sur les structures tourbillonnaires de la lame d'air dans la production sonore des tuyaux d'orgue

Nous donnons ici les résultats d'une étude de pointe interdisciplinaire, dirigée en 1997 par le facteur d'orgue Reiner Janke, de Freiburg.

Pour obtenir de bonnes visualisations au laser, on insuffle du dioxyde de carbone CO₂ dans le tuyau. Ce gaz étant plus lourd que l'air, la célérité comme la hauteur du son baissent. On vaporise aussi à l'intérieur du tuyau des gouttes d'eau pour utiliser l'Anémométrie Laser-Doppler (LDA).

La « bouche » d'un tuyau d'orgue est constituée d'une « lumière », c'est l'espace minime entre les deux lèvres (ou bordures de la « bouche »), au travers duquel l'air projeté passe et forme la *lame d'air*. La lèvre supérieure est taillée en biseau ; la lame d'air projetée s'en approche, bifurque avant son contact et commence aussitôt à osciller.

Pour des raisons techniques on travaille ici avec un maximum de 200 Hz.

Hauteur du tuyau fermé (à gauche): 183 Hz, (F 4'), hauteur du tuyau ouvert : 200 Hz, (G 4').



Abb. 13, gedackte Pfeife ohne Kerntische



Abb. 14, Kernspalte offene Pfeife ohne Stiche

Figures n°38 et 39 : « bouche » d'un tuyau fermé
Sans dentelures

« bouche » d'un tuyau ouvert
sans dentelures



Abb. 15, gedackte Pfeife mit Kerntischen

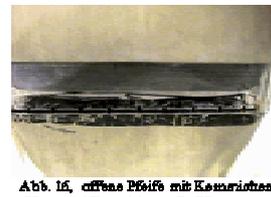


Abb. 16, offene Pfeife mit Kerntischen (Kerntisch und Unterlippe haben die Mündung geschlossen)

Figures n°40 et 41 : Avec incisions de dentelures
sur la lèvre inférieure

Avec incisions de dentelures
sur la lèvre inférieure (Janke, 1997)

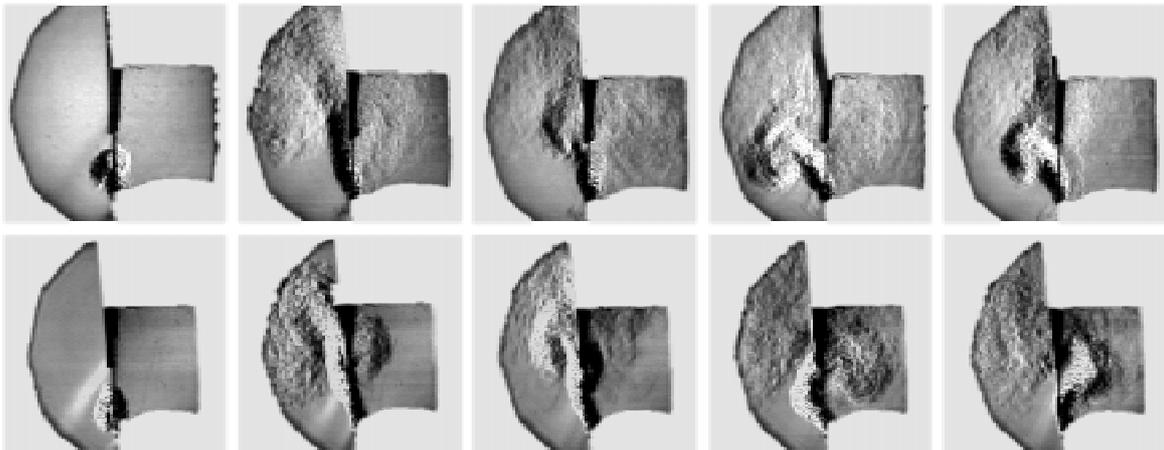


Abb. 18, Visualisierung eines Einschwingvorgangs der offenen Pfeife, oben ohne, unten mit Kerntischen (Pfeifeninneres rechts)

Figure n°42 : Visualisation de l'oscillation de la lame d'air. (L'intérieur du tuyau est à droite)

Série en haut : sans dentelures (évolution de gauche à droite) Série en bas : avec dentelures (Janke, 1997)

Le tourbillon qui apparaît au sein de la lame d'air dans la première série, en haut, est plus agité

et présente beaucoup de turbulences, ce qui ressort encore mieux dans la séquence vidéo présentée sur le site Internet, mais on peut le remarquer aussi sur les cinquième et sixième images. Le tourbillon se met en travers de la direction principale du jet et ne s'avance pas vraiment à l'intérieur du tuyau, à droite.

Le tourbillon de la deuxième série, en bas, oscille des deux côtés du biseau de manière plus contenue et il présente beaucoup moins de turbulences dissipatives dans son champ d'action.

L'analyse acoustique confirme aussi que le son produit par un deuxième tuyau avec des dentelures à sa bouche contient beaucoup moins de bruit de fond, dû à la turbulence, que le son produit par le premier tuyau sans dentelure. Dans le spectre acoustique du premier tuyau s'ajoutent encore des bruits dus à la vibration du corps métallique du tuyau, chose qui se produit toujours quand celui-ci est excité par un frottement quelconque, ce qui est le cas ici, vu la plus grande turbulence et agitation de la lame d'air de ce tuyau sans dentelure.

L'intensité des « partiels stationnaires » au sein du tuyau avec dentelures est de plus beaucoup plus régulière.

(Bien sûr nous ne pouvons pas, dans le cadre de cette thèse, reproduire tous les diagrammes de ces mesures comme preuve à l'appui. On peut les retrouver sur le site Internet. Voir notre bibliographie.)

Nous tenions à donner cet exemple, parmi les études encore assez rares sur les tourbillons dans les instruments à vent, parce qu'il montre *le rapport direct entre la qualité des structures tourbillonnaires et la qualité du son produit*. Ceci est important pour approfondir notre compréhension de la production sonore par des processus aérodynamiques au sein de la glotte et très certainement aussi dans le pharynx et la cavité buccale.

5. La théorie acoustique requestionnée : les Teager ouvrent une brèche sur les tourbillons

Remarque : Nous avons profité pour ce passage sur les découvertes des Teager de l'exposé d'un collègue allemand Heinz Stolze et d'une discussion sur son « blog » : <http://www.forum-stimme.de/web-content/>

En 1990 H.M. et S.M. Teager commençaient un article sur le conduit vocal avec ces mots :

« As background, there is substantial evidence that the operation of the vocal tract is neither linear nor passive, nor even acoustic ».

D'affirmer que « *le fonctionnement du tract vocal ne soit ni linéaire, ni passif, ni purement ou seulement acoustique dans la production de la parole.* » était à l'époque assez provocateur. La majorité des phonéticiens travaillaient sur la parole synthétique ou le traitement automatique de la parole et l'on se contentait de la théorie source-filtres de Fant pour expliquer la formation des sons dans le tract vocal.

H.M. Teager et S.M. Teager, qui travaillaient tous deux au célèbre MIT (USA), avaient eu, dès les années 60, des doutes *sur une fonctionnalité du tract vocal exclusivement acoustique*. D'habitude on considère le tract vocal, le conduit vocal, comme un espace aérien, *une caisse de résonance*, dans lequel se propagent les ondes acoustiques venues du son glottique (le « *fondamental* », F_0 , des phonéticiens). Les conditions physiques de cette *caisse de résonance* sont données par les parois et les surfaces de réflexion qu'offrent les joues, le palais, la langue, les dents, les lèvres. Ceci crée des renforcements acoustiques dus à la résonance, l'impédance etc. que l'on peut calculer : ce sont les *formants*, ou *zones formantiques* plus exactement.

Les Teager en sont venus à une nouvelle compréhension des phénomènes de la production de la voix de par les nombreuses mesures très précises qu'ils avaient faites *sur les différences de célérité de l'air à différents endroits du conduit vocal*. Les résultats obtenus n'étaient pas explicables acoustiquement.

Normalement dans une onde acoustique un courant aérien s'installe mais comme une oscillation, un va-et-vient ultrarapide de l'air au niveau moléculaire : c'est la propagation de ce mouvement de l'on nomme *la vitesse du son*. Cette conception élémentaire de l'onde acoustique est comprise généralement de telle sorte que ce sont les différences pressionnelles de l'onde acoustique qui entretiennent la vibration oscillatoire de va-et-vient. Mais les Teager

faisaient remarquer que leurs mesures de variations de pression comparées avec leurs mesures de variations de propagation du son ne correspondaient pas à la définition habituelle de l'onde acoustique. Les variations de pression ne semblaient pas expliquer ici les variations de propagation du son. Il y avait donc d'autres mouvements, *d'autres déplacements d'air* pour provoquer de telles différences. Les Teager ont proposé comme alternative que **des vorticités, des tourbillons aériens**, étaient générés dans le conduit vocal, plus exactement *dans les plis ventriculaires**, et participaient à la création des « formants ». (*voir aussi Annexe II)

Des éléments de réponse ont été donnés ensuite dans des études publiées par Barney, Shadle and Davies en 1998. C'est surtout autour du professeur émérite australien Peter Davies, spécialiste en mécanique des fluides et en acoustique, qu'ont été faites ces études.

Pour ces chercheurs le tract vocal réuni et une fonction acoustique et une fonction non acoustique qui participent à la production sonore. Partant d'un modèle in vitro des plis vocaux et du tract vocal ils ont pris des mesures sur la vitesse du son, la pression et le rayonnement acoustiques. Le niveau acoustique montrait, à 60 cm du modèle in vitro, au-delà du sixième partiel, des variations, des irrégularités d'avec les mesures qu'on attendait d'après la théorie acoustique classique. En rajoutant dans leurs mesures du son qui *aurait été créé par des vorticités*, des tourbillons, ces variations étaient alors tout à fait normales.

Certes les études de cette époque ont été faites avec une fréquence fondamentale de 80 Herz mais elles mettaient en évidence que considérer le tract vocal comme une caisse de résonance complexe et déformable mais *sans prendre en considération les phénomènes d'écoulements tourbillonnaires comme facteur coproducteur du son ne suffisait pas*.

Depuis les idées nouvelles des Teager de plus en plus de publications de recherches dans ce domaine de l'aérodynamique et l'aéroacoustique de la phonation sont éditées chaque année.

Pour les recherches en France dans ce domaine nous nommons ici en particulier les études de Pelorson de l'ICP de Grenoble et celles de D'Alessandro *et al*, du LIMSI d'Orsay.

En 1994 Douglas Cairns et John Hansen reprenaient les observations des Teager et faisaient le point sur les études en aérodynamique et aéroacoustique liées au couplage des vorticités, des tourbillons et de la production acoustique. Ces chercheurs supposaient comme Teager que la propagation du flot glottique au travers du conduit vocal créait **des vortex d'air dans la région des fausses cordes ou plis ventriculaires**.

Ils ne pensaient donc pas encore que ces tourbillons puissent se former déjà au travers de la glotte. Ils faisaient aussi remarquer, en citant quelques noms que nous redonnons, qu'il y avait peu d'études détaillées sur l'aérodynamique de jets tourbillonnaires ouverts (Schlichting, 1957) et stationnaires (So et al. ,1987). Les études sur les jets pulsés ou pulsants - comme c'est le cas dans le larynx - étaient, quant à elles, beaucoup plus rares. Par contre des études sur les flûtes et les tuyaux d'orgue pulsants « *nous en apprennent un peu plus quant au comportement de ces écoulements tourbillonnaires* » faisaient-ils remarquer (Gundogdu & Carpinlioglu 1999).

On comprend pourquoi nous nous sommes mis aussi à la recherche de travaux semblables et récents sur les tourbillons dans les tuyaux d'orgue.

Ces auteurs insistaient sur le fait que pendant un cycle glottique les cordes vocales changent de forme d'abord en créant un passage convergent puis ensuite un passage divergent vers la fin, juste avant de se fermer. C'est pendant cette dernière étape que des phénomènes liés à l'écoulement visqueux tels que *séparation de l'écoulement, turbulence* et possibilité d'effet de Coanda prennent de l'importance (Hirschberg et al, 1996).

Par des modélisations de la glotte, Pelorson qui collabore justement avec Hirschberg, a visualisé ces phénomènes de *séparation aérodynamique* au sein des plis vocaux. Nous y revenons un peu plus loin.

Il y a de toute évidence un couplage important entre les phénomènes de turbulence, de séparation, et ceux de l'acoustique, mais il nous manque des études sur *des modèles aéroacoustiques*, donc pas seulement *aérodynamiques*, comme le faisaient remarquer Cairns et Hansen, pour en comprendre les interactions exactes.

Le point de vue naïf du phonéticien, du linguiste, qui n'est pas spécialiste de l'aérodynamique, peut-être fort utile et éveiller des questions élémentaires chez ses collègues de la mécanique des fluides quand ils abordent ensemble les processus tourbillonnaires intervenant dans la phonation.

On peut effectivement essayer de comprendre le comportement de ces vorticités, de ces tourbillons, de la manière suivante :

En traversant la glotte il se forme dans l'air expiré de la vorticité, des tourbillons, ce qu'on nomme généralement de la turbulence. Pour chaque cycle glottique un tourbillon se forme qui

se déplace dans le pharynx à la vitesse de l'écoulement aérien phonatoire, vitesse qu'on peut aussi essayer de calculer. Cela veut dire 125 à 250 tourbillons par seconde suivant que nous ayons un locuteur masculin ou féminin. Il faut donc se représenter « une chaîne tourbillonnaire », une salve de tourbillons dans ce « jet pulsant ».

D'après les expériences qui ont été faites par Barney, Shadle et Davies, les mesures de la fréquence fondamentale et de la célérité du courant aérien font ressortir une longueur d'environ

1 cm pour chaque tourbillon. Plus l'air va vite et plus le vortex, le tourbillon est allongé. Plus la fréquence d'oscillation des plis vocaux est haute et plus le tourbillon est raccourci. Il faut tenir compte qu'un tourbillon isolé, en lui-même, ne produit aucun son. Mais quand le tourbillon rencontre sur son parcours un obstacle qui fait changer brusquement sa section (par exemple les bandes ventriculaires, les parois du pharynx, et aussi la langue), alors une grande partie de son énergie cinétique se transforme en énergie acoustique. En ce sens on peut dire que le conduit vocal, la cavité buccale, ne constitue pas une caisse de résonance *passive*.

6. Phénomènes pulsatoires et tourbillonnaires à la sortie d'un résonateur

Il nous a fallu étudier des ouvrages d'Henri Bouasse sur l'acoustique générale, les tourbillons, les instruments à vent, afin de trouver des expériences de physique élémentaire et donc fondamentale pour aborder l'interaction entre les forces acoustiques et les forces cinétiques tourbillonnaires.

Bouasse a publié, en 1931, un ouvrage en deux volumes sur les tourbillons. Ces ouvrages magistraux sont encore aujourd'hui des références quand on s'entretient avec des spécialistes de mécanique des fluides. Il est toujours donné en référence sur les sites anglophones dédiés aux instruments à vent.

Voici l'exemple d'une expérience simple qu'avait réalisé Dvorak dans les années 1880 et que Bouasse avait lui-même refaite et élargie.

On place un diapason à 10 cm de l'ouverture d'un résonateur sphérique en verre (diamètre 5 cm) « dont l'ouverture plane est couverte d'une lame mince percée d'un trou (diamètre de 3,5 mm).

Au phénomène pulsatoire se superpose un phénomène vibratoire ; l'écoulement pulsatoire hors du résonateur crée à distance une onde régulière comme le fait l'écoulement discontinu de l'air

à travers *les trous d'une sirène de Seebeck* » (Bouasse, 1931: 284).

On observe alors à la sortie du résonateur des anneaux tourbillonnaires, comme une chaîne « d'anneaux de fumeurs ».

Si le diapason vibre à une fréquence voisine par exemple 196 hertz - 256 hertz dans l'expérience suivante - alors « au système des anneaux sortants correspond, à l'intervalle d'une demi période, un système d'anneaux rentrants ».

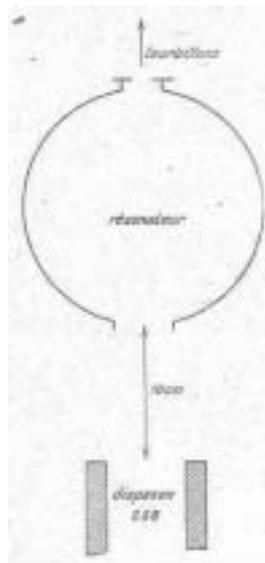


Figure n°43: Formation de tourbillons à la sortie d'un résonateur (Bouasse, 1931:284)
Les proportions du schéma ne sont pas réalistes.

Puis Bouasse décrit une expérience de l'abbé Carrière, physicien que nous avons déjà cité (voir Chap.2.3) pour son travail sur les flammes sensibles et ses visualisations des tourbillons aériens se formant en contact d'un biseau :

« Un résonateur sphérique est excité par un diapason placé devant le gros trou. (Voir ci-dessus) sur le petit trou est une plaque percée d'un trou ; on en mouille le bord avec une solution de phosphore dans le sulfure de carbone qui s'est d'abord : les courants d'air donnent de l'acide phosphorique qui rend les enroulements visibles. On les observe longtemps, alors qu'avec la fumée de tabac le résonateur est bientôt vide. On regarde avec une loupe à travers les trous d'un disque stroboscopique (...)

Les enroulements apparaissent à quelque distance du trou ; comme d'habitude (S.M. : nous l'avons expliqué dans le chapitre sur la turbulence) leur diamètre est plus grand que celui du trou. Ils stratifient un jet dont la partie axiale conserve son individualité assez loin »

(Bouasse, 1931: 284-285).

Bouasse précise « *que le nombre de ces enroulements simultanément visibles se chiffre par dizaine* ». Malheureusement il n'y a aucune remarque *sur le rapport entre le nombre de ces tourbillons et la fréquence du diapason* qui était, dans le cas de l'expérience de Carrière, d'un *ut₃*, c'est-à-dire de 256 hertz.

La dernière remarque de Bouasse : que ces « *enroulements (tourbillons) ... stratifient un jet dont la partie axiale conserve son individualité assez loin.* » est pour nous importante puisque nous retrouvons un comportement aérodynamique semblable dans les jets qui correspondent aux projections des sons du langage. Ils conservent leur « individualité » à bordure globale jusqu'à un mètre devant la bouche.

Voici une reproduction photomécanique de l'époque, tirée de l'ouvrage de Bouasse :



Figure n° 44: *Tourbillons annulaires à la sortie du résonateur sphérique* (Bouasse, 1931:285)

Une dernière remarque de Bouasse sur cette expérience et qui semble toucher un problème de couplage d'aéroacoustique encore inexplicée de nos jours et qui joue très certainement un rôle dans les turbulences phonatoires externes que nous présenterons dans notre troisième partie.

« *Le régime pulsatoire crée une circulation (qui peut être intense), par suite des actions mécaniques inexplicables par le régime vibratoire, le seul admis par l'Acoustique classique* ».

Personnellement cela nous rappelle étrangement les découvertes des Teager citées plus haut où tout ne s'expliquait pas par l'acoustique classique.

Après avoir montré tout le long de ce deuxième chapitre que des phénomènes non linéaires, chaotiques, tourbillonnaires, apparaissent au sein de la glotte et que ces processus sont aussi de nature aéroacoustique, nous pouvons aborder dans une deuxième partie le phénomène des formes aériennes des sons de langage *à la sortie de la bouche*, ainsi que des considérations plus théoriques des deux chercheurs, précurseurs dans ce domaine. Il ne nous a pas été possible, vu l'ampleur de ce travail quasi solitaire, de trouver des éléments pour comprendre les transformations que pourraient subir ces tourbillons au sein de la « caisse de résonance », sous l'influence principalement des micromouvements de la langue.

Mais comme nous l'annoncions dans notre introduction, l'objectif principal de cette étude phénoménologique descriptive n'est pas encore l'explication de ces formes aériennes des sons du langage.

Voir Annexe II : Les bandes ventriculaires, les glandes de Morgagni et la phonation. (Les trois types d'attaque dans la phonation).

Deuxième partie

**Rares recherches
sur les formes aériennes
des sons du langage
à la sortie de bouche
et
aspects théoriques**

Chapitre III

Les recherches de la pionnière

Johanna Zinke

Les formes aériennes des sons du langage

Table du troisième chapitre

1. La découverte des « formes aériennes des sons du langage ».....	103
2. Confirmation par la méthode strioscopique	108
3. Un choix de sons isolés du corpus de Zinke	110
4. Directions du souffle et morphodynamiques	116
5. La bonne articulation et son empreinte dans l'aérodynamique.....	117
6. La constitution psychosomatique du locuteur.....	118
7. L'impact émotionnel dans les formes aériennes : les genres littéraires	119
8. La voix parlée et la voix chantée.....	120
9. Les visualisations cinématographiques et la morphodynamique	123
10. La méthode interférométrique et une étrange découverte	128

1. La découverte des « formes aériennes des sons du langage »

Nous avons présenté les principes de la recherche de Zinke dans notre mémoire de D.E.A. (2000)

Entre-temps une publication plus fournie du travail de cette pionnière a été publiée en Allemagne. On y trouve principalement un catalogue d'une cinquantaine de photographies réalisées par Zinke entre les années 1962 et 1978 environ.

Malheureusement les quelques films (36 mm) que Zinke réalisa avec l'aide de spécialistes ne sont plus utilisables car leur matériau, la cellulose, craque de part en part.

Nous avons eu l'opportunité de rencontrer encore sa fille, une dame déjà âgée, qui vit à Berlin. Elle nous a offert trois dossiers remplis de photographies originales qui recouvrent presque tout l'alphabet. Tout ceci nous a permis de reprendre avec plus de matériel photographique et de détails biographiques l'historicité de cette recherche et d'en présenter les résultats et ceux que nous avons pu confirmer par notre recherche pour cette thèse.

Zinke, qui par sa profession venait des arts plastiques, a toujours cherché à saisir par le dessin les structures des formes fluctuantes qu'elle voyait dans la nature. C'est ce qu'elle essayera aussi de faire quand elle entra dans ce monde des formes créées par l'acte de la parole.

Il est regrettable qu'elle n'ait pas fait parallèlement à ses prises de vue une étude acoustique des sons qui leur correspondaient ou au moins des enregistrements. C'est une chose qu'elle n'entreprit que vers la fin de sa vie, comme nous le montrons plus loin.

Née en 1901, Zinke put commencer et se donner tout entière à ce travail en 1962, dès la première année de sa retraite. Elle vivait à Dresde, dans l'ancienne République Démocratique Allemande communiste, et ses moyens matériels étaient plus que modestes.

« Mon expédition de découverte dans un pays inconnu commença en automne 1962. À cette époque à la fin août 1962 j'ai quitté mon métier d'enseignante d'art. Un mois plus tard que je commençais le travail sur les formes aériennes des sons du langage. (...) »

En hiver 1962 il y eut une température extrême de -15°C. Je tendis une bâche si un fil d'étendage, et me plaçais devant et commençais à prononcer à voix haute les voyelles [a, e, i, o, u] dans la lumière du soleil. De cette manière l'air expiré était éclairé par la lumière solaire. Pour chacune de ces

voyelles on fit des photographies prises 1,2, ou 3 secondes après l'énonciation. C'est avec étonnement alors que nous avons pu regarder les premiers tirages de ces « *prises de vue de l'haleine* » (Zinke, 2001 : 57).

Voici deux exemples de ces voyelles parlées avec l'haleine naturelle dans l'air extérieur froid : voyelle [a] et voyelle [e] en profil.

La voyelle [a] a une forme à bordures arrondies et la voyelle [e] a une forme triangulaire caractéristique.

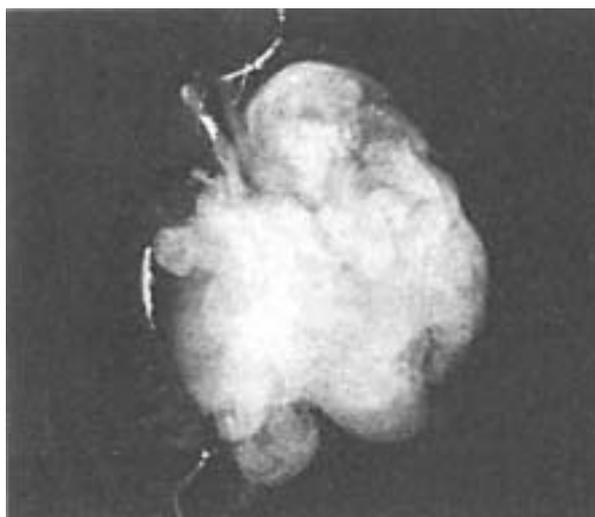


Figure n° 45

[a]

(Zinke, 1965)



Figure n° 46

[e] haleine dans le froid

(Zinke, 1962, coll. Maintier)

C'est d'abord avec *la propriété de condensation de l'humidité naturelle* dans l'haleine phonatoire de l'être humain que Zinke a mis les formes aériennes des sons du langage en évidence.

Ceci n'est pas sans nous rappeler l'anecdote des « *paroles gelées* » souvent citée dans des livres de phonétique et que nous devons, grâce à son imagination - imagination quelque peu « exacte » - à François Rabelais (*Le Quart Livre, chapitre 56*), sauf que pour Pantagruel et ses compagnons les « *paroles gelées* » d'un passé reculé se « *dégèlent* » à leur chaleur et se font à nouveau entendre !

Le taux d'humidité dans l'air expiré est certes important mais pas assez pour justement être rendu visible par une méthode très utilisée aujourd'hui : l'imagerie à résonance magnétique (I.R.M.).

Cette méthode fonctionnant sur la base des déplacements des molécules d'hydrogène contenues dans l'élément liquide aqueux a rendu par exemple possible la première visualisation *des courants tourbillonnaires* qui circulent dans les veines et les artères ainsi que leur rencontre au sein du cœur. (On trouvera une documentation avec ces visualisations sur Internet sous le nom : « *Fluent Heart* », nous en donnons un exemple dans les annexes notre CD-ROM)

Ensuite Zinke fit prendre en photographie les voyelles de face et de côté par un professionnel qui, au cours de cette première séance, dut s'arrêter car ses doigts étaient gelés. Ils retournèrent dans le salon où une femme fumait. On mit alors une couverture foncée devant la fenêtre. Le soleil entrainé de côté dans la pièce. La fumeuse assise confortablement dans un fauteuil commença à parler, à prononcer des voyelles dans la fumée expirée simultanément. Une fois prononcée la voyelle [e] présenta devant la bouche une forme triangulaire tout comme auparavant dans l'air froid, sur le balcon. Cette fois-ci le photographe avait fait sa prise de vue trois secondes après la prononciation de cette voyelle. Ainsi la forme avait grandi en longueur comparée à celle qui avait été prise une seconde après son émission dont l'air froid à l'extérieur.

« *Je priais la fumeuse d'inhaler encore de la fumée de cigarette et de prononcer cette fois-ci la voyelle [a]* » (Zinke, 2001 : 57).

Zinke continua ce jour là l'expérience dans le salon avec les autres voyelles. Les formes aériennes obtenues étaient tout à fait similaires à celles obtenues dans l'air froid.

La première publication de Zinke date de 1965. Elle y présentait déjà trente-six prises de vue

selon deux méthodes :

- celle avec l'haleine naturelle de la parole prononcée dans un espace froid.
- celle avec l'ensemencement de l'air pulmonaire par de la fumée de cigarette avant la phonation

Sa recherche s'étala sur une vingtaine d'années et elle étudia surtout des voyelles et des consonnes isolées, mais aussi quelques syllabes.

Zinke, en travaillant avec plusieurs récitants professionnels, constata que la forme de l'espace buccal, des mâchoires et des lèvres avait certes une légère incidence sur la direction du souffle phonatoire mais que l'on retrouvait **une morphologie globale semblable pour chaque son prononcé par différents locuteurs.**

Si le maxillaire supérieur domine alors les turbulences phonatoires ont toutes la tendance à s'écouler plus vers le bas.

Si par contre les formes ont tendance à s'écouler un peu plus à l'horizontale ou vers le haut alors c'est que la mâchoire inférieure est plus proéminente. La position des lèvres joue un rôle semblable.

Mais, à part ces différences de direction, la forme globale, *l'enveloppe, présente des caractéristiques morphologiques constantes.*

Une fois ces facteurs de variations déterminés la recherche des formes, des morphologies globales correspondant à la production des sons n'est plus un problème.

Zinke mit très tôt en évidence la morphologie typique des cinq voyelles de base : **[a, e, i, o, u]**.

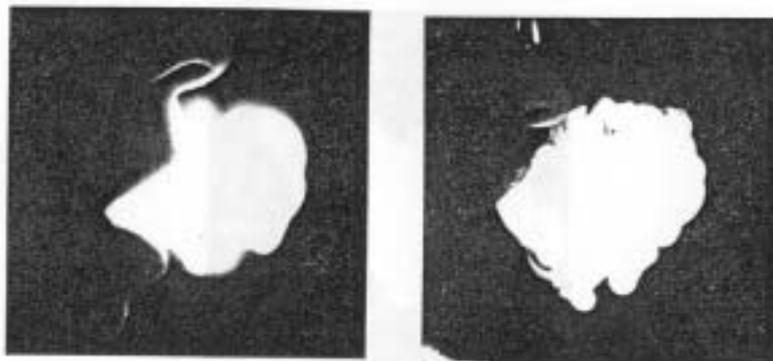
Ce n'est que vers la fin de sa vie que Zinke, sur la suggestion d'un ami médecin et chercheur, entreprit de photographier ces formes *de face et d'en haut* pour essayer de les saisir dans les *trois axes spatiaux*, c'est-à-dire en tant que **volumes**.

On trouvera plus bas l'exemple de la consonne latérale [l] prise sous des angles différents.

Nous avons nous-mêmes fait la même chose et filmé un nombre important de syllabes de

profil, de face et d'en bas - que nous avons toutes archivées - et avons pu ainsi vérifier la plus grande partie des observations et remarques de Zinke. (Voir la liste de notre corpus)

Les cinq voyelles : (Les photos sont prises avec un temps d'éclairage de 1/1000 s.)



[a]

[a]



[e]

[i]

Figures n°47,48,49,50 (Zinke,1965)



Figure n°51 : [o] début (Zinke, 2001)

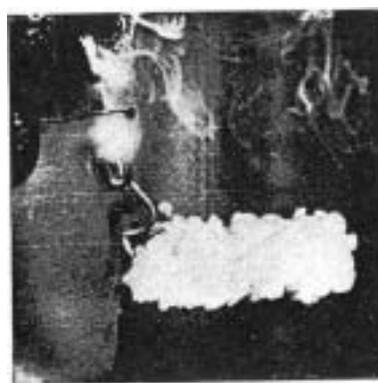


Figure n°52 : [o] (Zinke, 1965)

La mauvaise qualité de ces premiers clichés est due à l'ancienneté de ce premier article que nous avons eu à notre disposition.



Figure n°53 : [u] (Zinke ,coll.Maintier)

Dans ce premier article Zinke annonçait une prochaine étude plus large et aussi l'utilisation de *la strioscopie* pour étudier ces « **formes aériennes des sons du langage** » comme elle les dénomma à cette époque.

2. Confirmation par la méthode strioscopique

En 1970 elle publia dans le «*Bulletin des Nouvelles de la maison d'appareils optiques Zeiss* », appareils d'optique d'une renommée internationale, une étude des formes aériennes des sons du langage par *la méthode strioscopique* (qu'on appelle aussi en français *ombroscopie*). Le numéro de la revue Zeiss était entièrement consacré aux visualisations par appareils d'optique strioscopique dans différents domaines techniques.

Nous avons présenté en esquisse cette méthode dans notre D.E.A.: c'est la parole dans l'haleine naturelle, sans utilisation d'un porteur ou d'un ensemencement quelconque, qui est visualisée. En allemand on nomme cette méthode «*Schlieren* », terme repris aussi en mécanique des fluides en français. Quand des rayons de soleil éclairent dans une pièce un

radiateur ou voit contre le mur une fluctuation de vaguelettes d'ombre et de luminosité : c'est le même principe (« ombroscopie »). La lumière traverse différemment les fines couches d'air suivant leur température, donc leur épaisseur. Ainsi en est-il pour *les fines différences intrinsèques thermiques* au sein de ces « nuages phonatoires ».

Après avoir décrit *l'appareil d'optique Toepler300*, Zinke présente les morphologies des sons : [a, b, g, n, r,ε].

Nous ne présentons que la voyelle [a] et la semi-voyelle [ε].

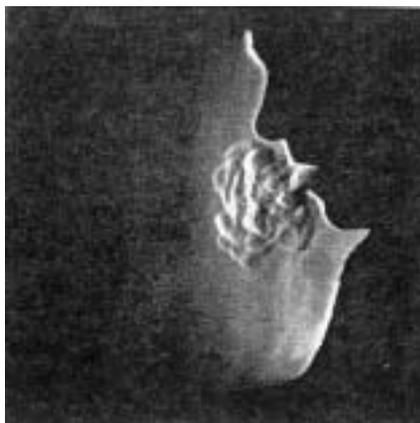


Figure n° 54: [a] (Zinke, 1952) Figure n° 55: [ε] (Zinke, 1952)

En 1972, dans la revue « *Phonétique, Sciences du Langage et Recherche de la Communication* » Zinke rédigea un article de fond : « *Les sons du langage rendus visibles* » où elle présente les trois méthodes utilisées jusqu'alors et les cinq points de vue selon lesquels elle compare ces formes aériennes ou morphologies spécifiques des sons.

Ces points de vue sont les suivants :

1. la direction du jet.
2. la forme globale, l'enveloppe.
3. la structure intrinsèque : fine, ciselée, avec des spirales, des vortex, des vagues, des boucles etc.
4. le type d'écoulement et sa vitesse.
5. le caractère spécifique

Pour cette raison Zinke étudia d'abord des sonorités isolées vue que dans le flot de la parole celles-ci ont tendance à s'influencer mutuellement, à très vite s'interpénétrer, donc à être difficilement différenciables. Ceci est en partie dû à ce qu'on connaît en phonétique comme étant le phénomène de la coarticulation. Zinke n'avait pas de formation de phonéticienne et ignorait cet aspect du langage.

Les douze exemples que donna Zinke étaient alors tirés d'une collection, d'une sorte d'atlas des formes aériennes des sons du langage de la langue allemande visualisées pendant les sept années précédentes.

Quand nous avons nous-mêmes entrepris de vérifier le phénomène des formes aériennes des sons du langage tel que Zinke l'avait mis en évidence, nous avons pris une grande partie des sons étudiés par cette dernière. Nous avons pu ainsi constater que les observations de Zinke étaient pour la plupart toutes exactes. (On trouvera des prises de vues de Zinke tout le long de du DVD)

3. Un choix de sons isolés du corpus de Zinke

Remarque : Sauf indication, toutes ces formes ont été ensemencées par la fumée de cigarette

Voici la liste et les reproductions photographiques des consonnes, des voyelles et de quelques syllabes observées par Zinke que nous avons aussi pu confirmer. Nous laissons les autres de côté : Voyelles : [a, e, i, o, u, ε, a] ; consonnes : [b, p, d, t, g, k, l, m, n, v] et la syllabe : [be]

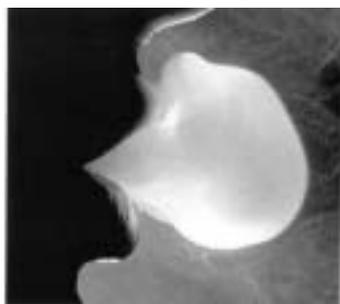


Figures n° 56 et 57 : [a] Strioscopie (Zinke, coll. Maintier) [e] Haleine dans le froid

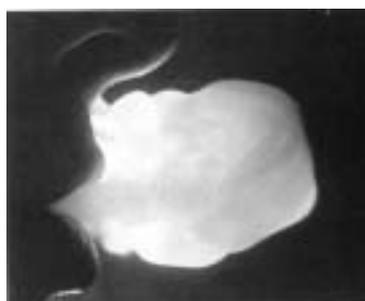


Figures n° 58 : [i] (Zinke, 1965)

La voyelle [o] quatre étapes :



[o]



[o]



[o]



[o]

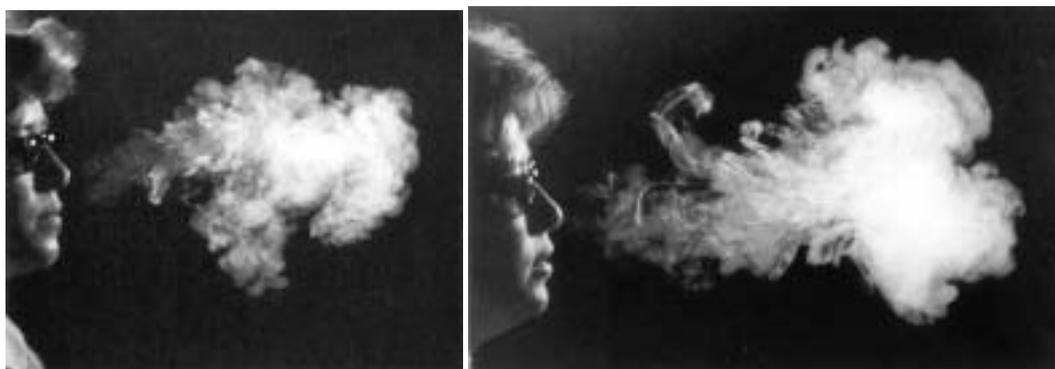
Figures n°59 ,60,61,62: (Zinke,2001)



Figure n°63 [u] (Zinke, coll.Maintier)



Figure n°64 [a] (Zinke, coll.Maintier)



Figures n°65 et 66 : [b] phase finale [p] phase finale (Zinke, 2001)

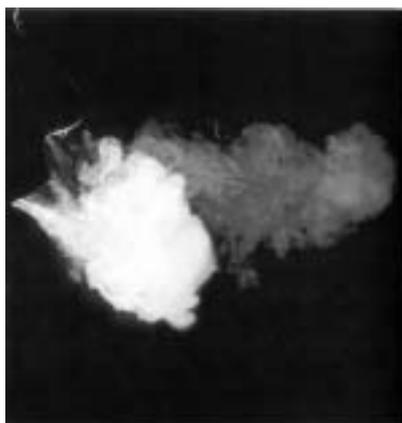


Figure n°67 : [be] (Zinke, 2001)

[b] à droite, diaphane - [e] à gauche, plus dense, qui sort de la bouche.



[d] début (1^e en haut - haleine dans le froid)

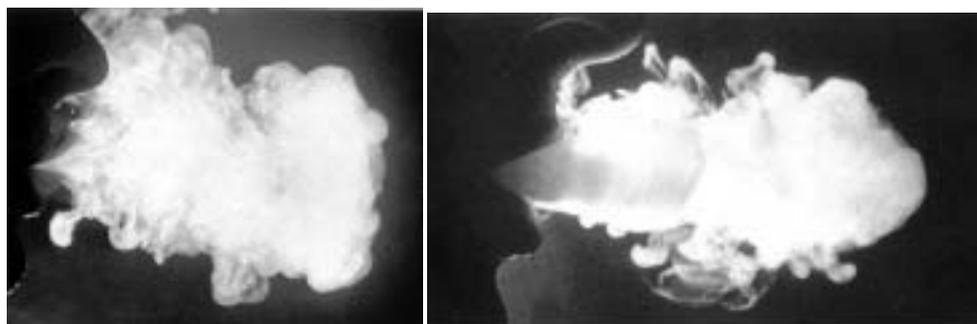
[d] phase finale (2^e en bas)

Figures n°68 et 69 : (Zinke, coll.Maintier)



Figure n°70 : [t] ici : aspiré (Zinke, coll Maintier)

L'aspiration apparaît nettement sur nos films comme sur notre DVD

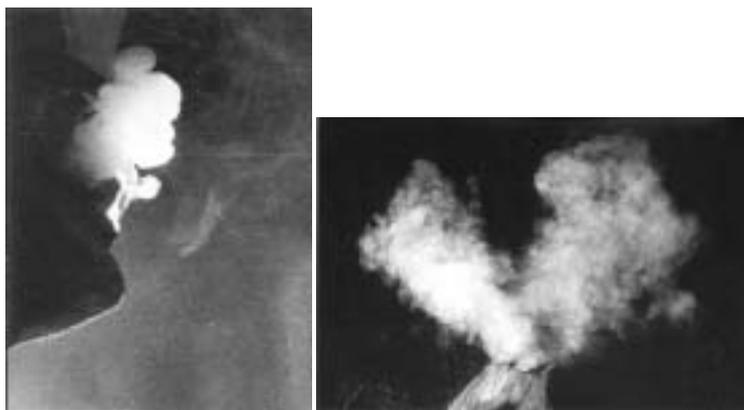


Figures n°71 et 72 : [g]

[k] aspiré, phase du début (Zinke, 1965)

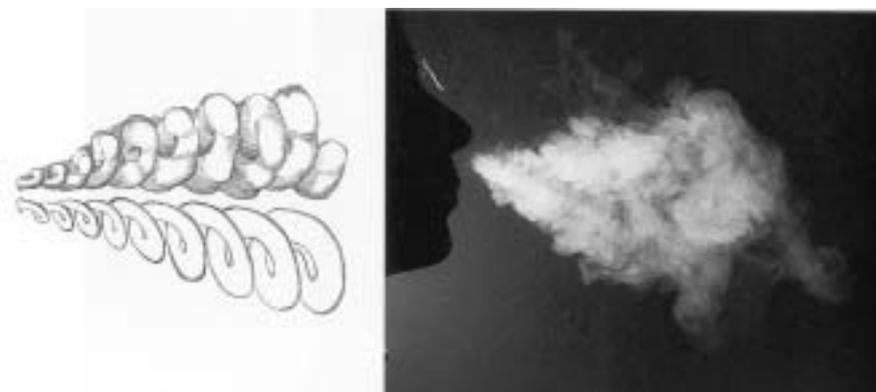


Figures n°73 : [k] aspiré, phase finale (Zinke, 2001)



Figures n°74 et 75 : [l] de dessous le menton [l] début (vu d'en haut) (Zinke, 1965)

On voit les deux jets latéraux



Figures n°76 et 77 : [m] deux spirales contrarotatives, très régulières + dessin de Zinke (coll. Maintier)

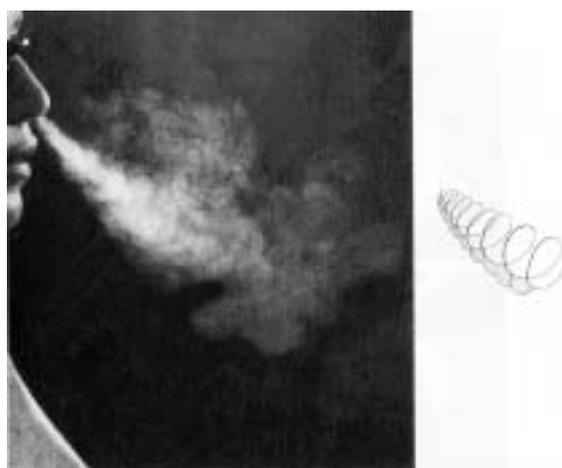


Figure n°78 : [n] semblable à [m] avec une autre
dynamique et moins de densité ventilatoire + dessin de Zinke (coll. Maintier)



Figure n°78 : [v] phase finale (Zinke, coll.Maintier)

4. Directions du souffle et morphodynamiques

Zinke donne aussi un tableau exhaustif (voir ci-dessous) des différentes directions du souffle phonatoire de 5 voyelles et de 10 consonnes. Nous avons pu de notre côté observer la même morphologie et la même topographie ventilatoire de la plupart des sons mais avec des exceptions, comme la consonne occlusive dentale [d].

Ce tableau récapitulatif veut montrer un ordre : les formes aériennes s'élevant, en passant par celles qui sont franchement horizontales, pour aller jusqu'aux formes aériennes des sonorités qui sont toujours dirigées vers le bas. Il y a quelques variations chez certains sujets, suivant anatomie buccale et leur dentition.

Zinke a placé au milieu de cette palette la sonorité [a] qui effectivement représente la forme la plus médiane, qui se trouve comme un archétype de la parole et qu'on connaît de tous les bébés du monde : c'est la projection de l'espace buccal le plus neutre et le plus détendu, le plus ouvert.

Mais si Zinke avait systématisé son travail sur le plan phonétique en tenant compte de la coarticulation avec les cinq voyelles de base [a,e,i,o,u] elle aurait été fort surprise de voir son tableau synoptique s'enrichir de mille variantes. Nous avons pu le constater dans nos visualisations par exemple avec la consonne finale [k] dans les syllabes C₁VC₂. (DVD 3^e partie). La consonne [k] ne va pas toujours vers le bas et sa structure peut varier.

Nous avons trouvé une petite erreur dans ce tableau : à savoir pour la première consonne

[l], en haut à gauche, où le petit angle dessiné en gris - qui indique le profil des lèvres - devrait être dessiné *en bas*, à gauche de cette forme du [l] et non pas *en haut*, car la consonne liquide latérale [l] s'élève toujours quand elle est émise seule, sans voyelle. De plus, dans la logique de ce tableau synoptique, Zinke a placé justement [l] comme la sonorité la plus en haut des sonorités dirigées vers le haut. Nos propres prises de vue nous ont permis de vérifier pour [l] que ce sont bien *deux courants latéraux*, que l'on devine *spiralés*, qui s'élèvent (voir le DVD). Certaines personnes parlent plus ou du côté droit ou du côté gauche de la langue ce qui se manifeste alors dans un écoulement tourbillonnaire asymétrique.

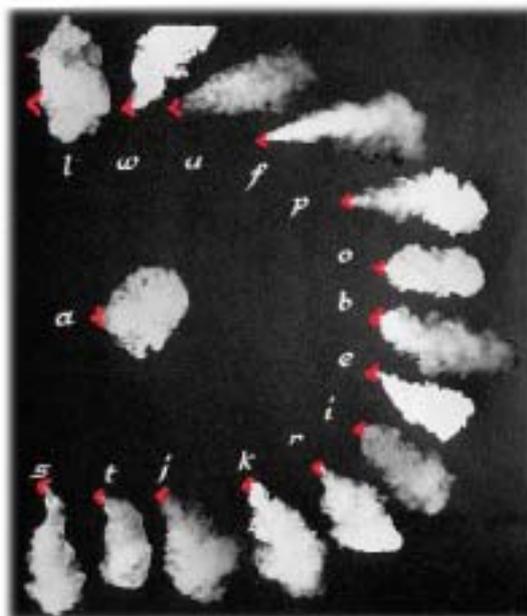


Figure n° 79 : Tableau synoptique de Zinke (Zinke, 1976)

Zinke étudia ces formes aériennes des sons du langage pendant une vingtaine d'années avec une trentaine de locuteurs environ. La plupart du temps elle travailla avec des récitants professionnels mais aussi avec des personnes non formées à l'art vocal ou à la diction.

5. La bonne articulation et son empreinte dans l'aérodynamique

Comme nous l'avons constaté nous-mêmes lors de nos nombreuses séances de prises de vue, dès que les locuteurs ont une articulation correcte les formes ressortent avec *des contours précis* de la bordure globale, de « l'enveloppe ». Par contre une articulation insuffisante, «

délavée », comme c'est le cas chez beaucoup de personnes de nos jours, donne *des formes floues*, présentant plus *de turbulences dissipatives* et moins de *tourbillons*.

Ces remarques sont importantes pour le travail de l'éducation de la voix tout comme en pédagogie et en thérapie. Un vieil adage du métier dit : « *On donne toujours trop de voix et pas assez d'articulation.* » On peut comprendre qu'un enseignant en art de la parole, en diction ou en art lyrique perçoivent ces formes par son écoute exercée. C'est plus qu'un phénomène de synesthésie.

Ainsi à l'école on entend encore très souvent un enseignant dire à un enfant : « Plus fort ! ». Très souvent en fait, il aurait mieux fallu dire à cet élève : « Parle plus clairement ! » ou « Parle plus distinctement ! » ou bien même : « Moins vite ! ». Car c'est beaucoup plus *l'articulation* qui rend la parole audible et compréhensible que *l'intonation*, la force de la voix.

Nous donnons plus loin, dans la 3^e partie, chapitre VI, consacré à notre propre corpus en film DVD, un exemple du rapport *voix-voyelles* et *articulation-consonnes* avec les syllabes [an] (CV) et [na] (VC) prononcées par une locutrice et qui exemplifie entièrement nos propos.

6. La constitution psychosomatique du locuteur

Même si Zinke n'a pas pu ou su à l'époque fixer toutes ses observations sur le plan de l'analyse acoustique, son expérience sur le terrain qui était immense lui fit entrevoir que dans ces formes aériennes des images caractéristiques de la constitution de ses différentes locutrices et locuteurs s'y trouvaient imprimées.

Par exemple, quand les formes étaient grandes, bien marquées et aux contours clairs, elles provenaient de personnes à la santé psychique et physique « robuste »; les formes petites, délicates et évanescents correspondaient à des personnes souvent graciles et de caractère plus délicat.

Ces remarques de Zinke correspondent d'après nous à des aspects respiratoire, ventilatoire et phonatoire dans l'approche d'une compréhension de la constitution d'une personne. Certains de ces aspects sont utilisés en pneumologie mais, à notre connaissance, aucune étude n'a été faite sur la constitution de la personne en rapport avec sa respiration parlée, sauf peut-être

dans le domaine pathologique du bégaiement. Là des études longitudinales statistiques seraient nécessaires.

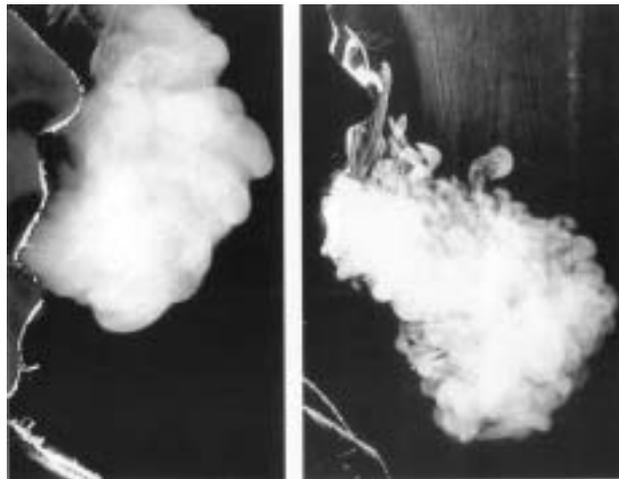
7. L'impact émotionnel dans les formes aériennes : les genres littéraires

Du fait que Zinke venait du domaine artistique et était entourée d'acteurs comme récitants, elle s'intéressa aussi à l'impact du *style* dans le souffle de la parole.

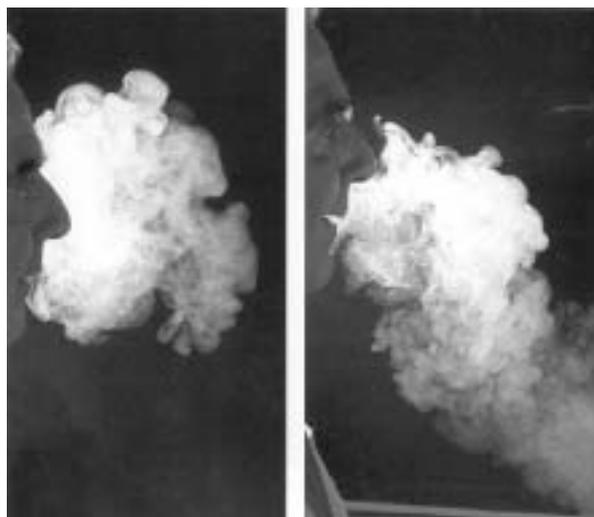
Elle demanda aux locuteurs-acteurs ou récitants professionnels- de prononcer des voyelles et des consonnes dans différents genres littéraires - épique, dramatique et lyrique - ou bien en exprimant la joie ou la colère.

Elle put effectivement constater une différence de direction, de densité et de forme générale.

Nous en donnons ici quelques exemples :



Figures n° 80 et 81 : [a]-lyrique [a]-dramatique (Zinke, 2001)



Figures n° 82 et 83 : [a]-joyeux [a]-volontaire (Zinke, 2001)

Que pour l'expression de la joie la forme aérienne s'élève ne nous surprend pas car cela correspond bien à la détente de la cage thoracique, de la glotte et des organes du tract vocal. La dynamique du souffle est plus douce, détendue et la voix chantante : le souffle relâché s'élève. A l'opposé le reproche, le rejet, l'expression volontaire manifestent un tonus musculaire renforcé, une pression de la cage thoracique et des muscles, des organes de l'articulation, ce qui s'exprime dans la forme et la direction du souffle parlé, vers le bas.

On trouve des éléments sur l'influence du psychisme et des émotions dans les « gestes » des organes de la parole dans l'ouvrage de Fonagy « *La Vive Voix : Essais de psychophonétique* » (1983,1991), que nous trouvons un peu trop psychanalytique, ou chez Félix Trojan avec ses « akuèmes » et ses recherches sur la physiologie des expressions qui nous semblent plus phénoménologiques (1948).

Il est intéressant de constater que par les travaux de recherche sur la communication homme-machine on en vient - ou revient - aujourd'hui à l'étude acoustique des émotions humaines. Car toute cette part suprasegmentale, prosodique est indispensable pour obtenir une « voix synthétique » proche de la réalité. Le sens, le contenu des représentations est lui-même en grande partie porté par la prosodie.

8. La voix parlée et la voix chantée

Zinke fit quelques expériences avec des chanteurs professionnels. Elle prit pour cela les voyelles [a] et [o] qui furent chantées sur la gamme musicale.

Nous donnons deux exemples avec la voyelle [a].



Figures n°84 et 85 : [a] chanté sur un do

[a] chanté sur un la (Zinke, 1976)

On peut constater que la forme à enveloppe spécifique, la morphodynamique correspondant à la voyelle [a] (que l'on reconnaît à sa densité lumineuse) est comme « diluée », déformée dans sa bordure globale, par le souffle, qui lui, semble être lâché et s'élève en fines volutes.

Zinke n'a apparemment trouvé *aucune structure itérative* qui serait l'empreinte d'une note de musique, bien que ces volutes apparaissent et déforment les enveloppes globales que l'on connaît de la voix parlée à chaque fois de manière différente.

Ceci montre la grande différence entre la voix parlée et la voix chantée quant à la gestion de la ventilation, de la respiration : la parole est bien une *gestualité métamorphosée* qui s'exprime jusque dans la morphodynamique des enveloppes correspondant à *la formation des sonorités du langage*.

Dans la voix chantée nous *n'imprimons pas les formes caractéristiques* de la parole, du langage, puisque celles-ci sont au service des *sons musicaux*, qui eux sont modulés, allongés, raccourcis dans mille variantes. Le chanteur *étire ou raccourcit dans le temps* son articulation, son intonation. Dans la voix chantée, nous économisons le souffle pour « tenir les notes ». Il suffit de chanter une gamme musicale sur une voyelle puis de s'arrêter et de passer à la voix parlée avec cette même voyelle pour observer que le souffle est entièrement détendu, relâché, fluide dans le chant et comme rendu plastique, concentré, condensé dans la parole.

Ceci explique entre autre pourquoi les personnes souffrant de bégaiement ne présentent plus ces symptômes *lorsqu'ils chantent* : dans la voix chantée la détente au niveau respiratoire est favorisée, ces personnes surmontent ou « oublient » alors leurs problèmes de respiration et de peur, manifestés dans une contraction de la cage thoracique et du diaphragme. Leur problème d'élocution n'est souvent que secondaire. Le bégaiement est dans beaucoup de cas une peur devenue « attitude physiologisée », pas physiologique.

Des textes poétiques appris *rythmiquement* et prononcés aussi de manière rythmique ont sur les bègues un effet semblable au chant, ou même des textes simplement appris par coeur. Nous avons un jeune étudiant en art dramatique, un des meilleurs sur scène qui, redescendu des planches, face à un groupe de personnes *qu'il ne connaissait pas*, contractait tous les muscles du cou et de la mâchoire et bleussait, étant alors en apnée. Dans le travail thérapeutique, la voix parlée et la voix chantée sont utilisées de manière complémentaire.

9. Les visualisations cinématographiques et la morphodynamique

Tant que les moyens cinématographiques à grande vitesse n'étaient pas à la disposition de la recherche phonétique on a dû se contenter pendant des décennies des fameuses coupes en profil du conduit vocal avec des positions de la langue et des organes phonateurs bien déterminées et statiques.

Nous avons nous-mêmes encore eu des professeurs de phonétique qui ont raconté avoir eux-mêmes, il y a quelques décennies seulement, employé la pâte de chocolat pour prendre les empreintes des positions de la langue contre le palais pendant la phonation !

Remarque : Dommage qu'on ne puisse pas fumer de chocolat, cela eut été plus agréable pour nos locuteurs, à moins qu'ils n'en aient eu des crises de foie : « *Rien n'est parfait !* » dit le renard déçu dans *Le Petit Prince*.

Il faut dire aussi qu'une pensée mécaniste venant du XIXe siècle espérait trouver dans ces « positions » l'origine exacte des phoniques. Entre-temps il y a eu à l'Institut Phonétique de Strasbourg cet immense travail cinéradiographique sur l'articulation *en mouvement* des voyelles et consonnes du français à partir de courtes phrases. Ce travail a été archivé et catalogué puis publié sous forme d'un atlas en 1986 seulement. Ces archives sont encore aujourd'hui une source de renseignements précieux pour beaucoup de phonéticiens de différents laboratoires. (L'utilisation des rayons X radioactifs sur des locuteurs n'est plus autorisée aujourd'hui.) (Bothorel, *et al.*, 1986)

Mais comment saisir, codifier le mouvement ? Est-ce une suite de positions ? Nous avons abordé ce sujet dans notre D.E.A. et montré comment on n'en est venu dans les dernières décennies à dépasser ce point de vue mécaniste. On reconnaît aujourd'hui le caractère fondamentalement *synergique* et *dynamique* des mouvements, *des gestes* en général et des « gestes articulatoires » dans la phonation. On parle en ce sens de « *gestural phonology* ».

Zinke était consciente de cette difficulté car pendant les prises de vue, à l'oeil nu, elle pouvait constater le caractère particulièrement mouvant et dynamique de l'apparition et du *développement* de ces formes aériennes.

Elle put enfin rencontrer des ingénieurs de la dynamique des fluides pour la soutenir dans cette nouvelle étape de son travail. Zinke commença ainsi à étudier *l'évolution de ces formes*

grâce à des prises de vue *cinématographiques* de 32 images/s sous un temps d'éclairage de 1/1450 s. Il s'agissait de films de 36 mm en celluloïde.

Nous donnons quelques exemples où l'on peut constater que ces formes ont bien un début, un épanouissement, une diffusion, et ceci en l'espace d'à peine une seconde c'est-à-dire *quasi simultanément avec la durée de la syllabe*, chose que nous avons mise en évidence pour cette thèse de doctorat en faisant une étude acoustique, un découpage phonétique en parallèle.

Zinke put découvrir des détails insaisissables jusqu'alors, par exemple dans l'apparition et la morphologie des plosives qui étaient trop rapides auparavant pour l'appareil photographique dont elle disposait à l'époque.

Les 32 images/s des prises de vue cinématographiques permirent à Zinke de réaliser des tableaux synoptiques visant les critères suivants :

- étudier l'évolution de l'écoulement pour chaque son en fonction de sa morphologie, de sa direction et de sa vitesse.
- comparer les sonorités entre elles sur le plan temporel.
- étudier des séquences choisies et isolées.
- observer exactement le passage d'une sonorité à une autre dans les syllabes ou dans un mot.
- mettre en évidence la reproductibilité des morphologies dynamiques d'une sonorité répétée plusieurs fois en créant un tableau synoptique de plusieurs séries de cette même sonorité.

Mais ceci représente des travaux qu'elle n'a pu poursuivre vu son grand âge.

Pour Zinke le plus important était l'exercice de suivre exactement *le mouvement d'une forme à une autre*. C'est la raison pour laquelle elle essaya de saisir par *le dessin* ces morphologies, ces morphodynamiques.

Notons bien qu'elle aurait dû pour cela étudier et visualiser *des syllabes*, mais il semble, à l'époque, et dans un pays où les déplacements vers « l'ouest » étaient très difficiles (RDA),

qu'elle n'ait pas pu trouver de phonéticien intéressé par ce genre de démarche et qui l'aurait alors conseillée et assistée en ce sens.

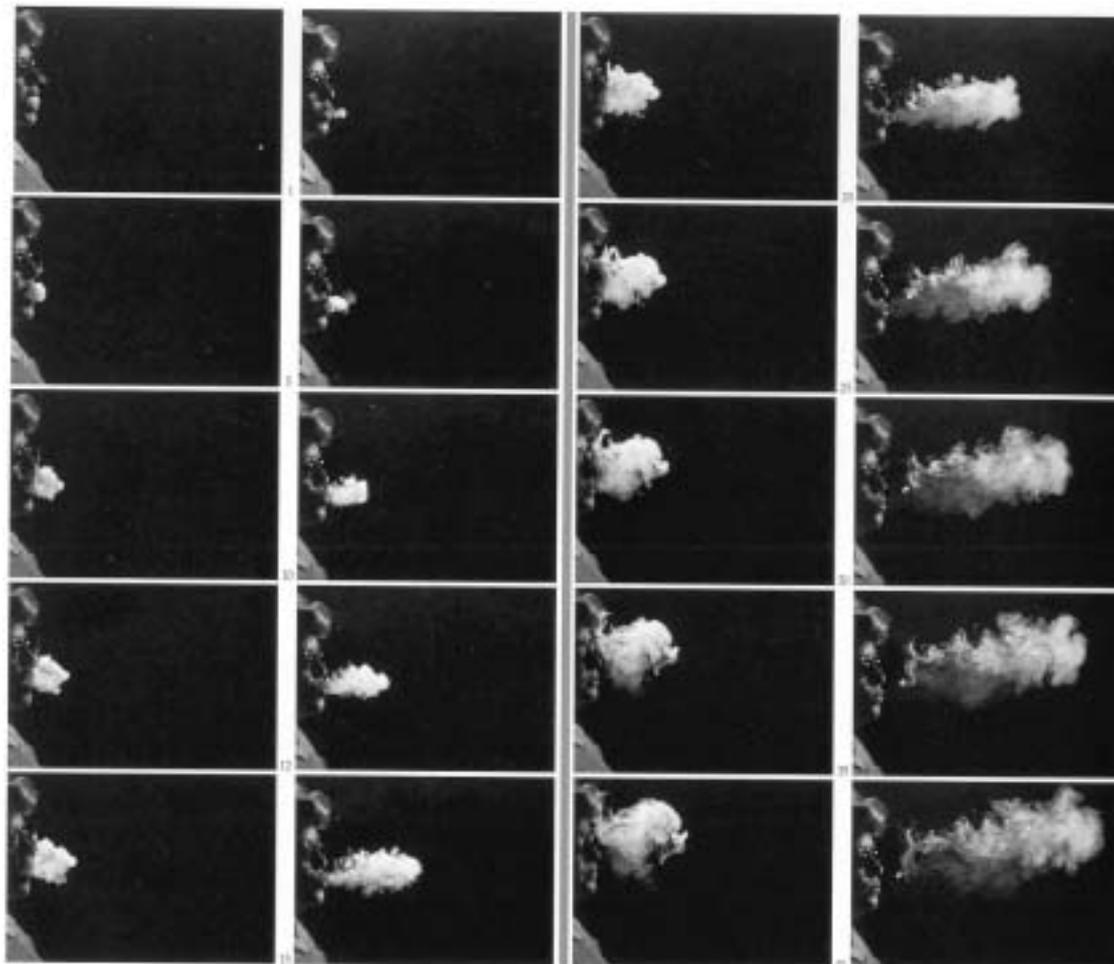
Sur le plan de la mécanique des fluides, ces morphologies aérodynamiques, donc ces *formes en mouvement mais à bordure globale bien délimitée*, avec une « enveloppe », semblent être la projection des conditions topologiques, biomécaniques, physiologiques et aérodynamiques qui les ont causées, dans leur interaction avec l'air extérieur bien sûr, ce qui est aussi le cas pour les ondes acoustiques.

Zinke, par sa démarche empirique et phénoménologique, touchait du doigt un vaste domaine à peine exploré à l'époque et que l'on appelle aujourd'hui *la science du chaos*.

Le météorologue E.N. Lorenz énonça *sa théorie du chaos* à la même époque où Zinke entreprit son travail sur ces formes qu'elle nomma simplement « *Luftlautformen* », *formes des sons aériennes*, que nous avons traduite par « formes aériennes des sons du langage », car dans le mot allemand *Laut*, qui nous manque en français, il ne s'agit que des sons, des sonorités *du langage* et non pas des *sons* musicaux, *Ton* en allemand.

Zinke ignorait bien sûr qu'elle ouvrait ainsi *une brèche dans un champ constitué de processus chaotiques, les tourbillons*, et que de plus cette notion venait à peine d'être conceptualisée par un contemporain, le météorologue Lorenz, qui fit ses calculs à l'aide des plus gros ordinateurs de l'époque. Zinke de son côté, modestement, étudiait ce qui peut être considéré un peu comme une « micro météorologie ».

Évolution morphodynamique de deux voyelles isolées : [a] et [u]



[a]

[u]

[a]

[u]

Figure n°85 : Films de 32 images/s : morphodynamiques comparées des voyelles [a] et [u] avec la même locutrice.

Les séquences choisies sont indiquées par des numéros entre les colonnes correspondant aux deux voyelles. (Zinke, 2001)

Avec la même technique Zinke étudia la *reproductibilité* du phénomène : la locutrice émet trois fois la consonne [h].

L'apparition de la forme aérienne pour chaque [h] doit être lue dans chaque colonne *de haut en bas*.

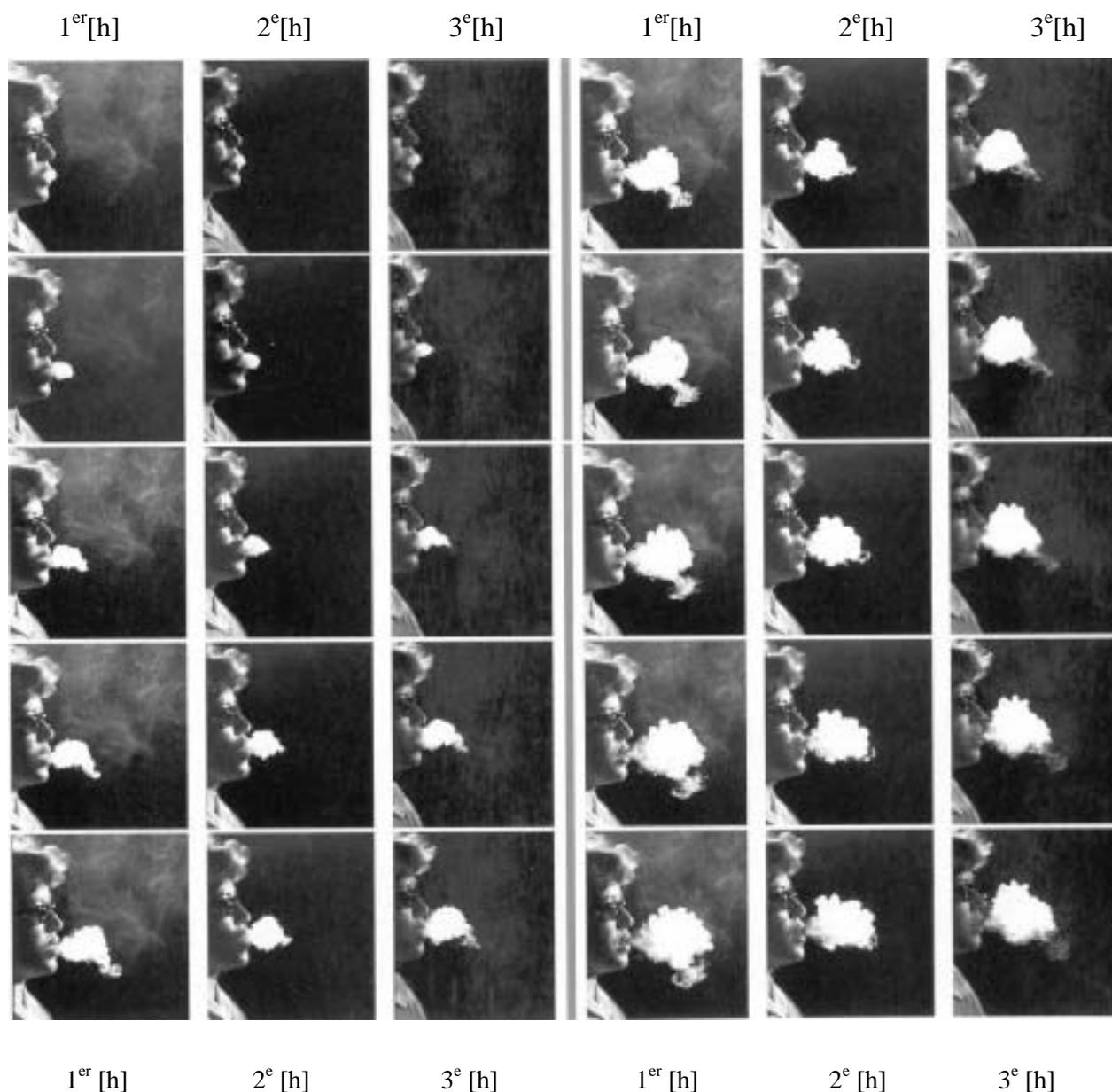


Figure n° 86 :Zinke,2001)

Malheureusement, comme nous l'avons déjà mentionné plus haut, les nombreux films 35 mm en celluloïd que Zinke avait réalisés avec l'aide de techniciens sont aujourd'hui inutilisables car ils s'effritent très rapidement. Nous espérons pourtant un jour faire un voyage à Berlin pour rencontrer sa fille, âgée aujourd'hui de plus de soixante-dix ans, car elle possède encore quelques vieux films et des vieux clichés dans des cartons empilés dans un débarras.

Que de « **perles** » reposent dans ces films en celluloïd desséchée ! Quand nous parlons ici de *perles* nous parlons de véritables « *perles d'humidité phonatoire* ». C'est une découverte de Zinke, apparemment encore inexplorée ou inexplicée, mais qui nous semble une piste pour une compréhension du phénomène acoustique très spécial qui apparaît dans la phonation humaine.

Nous n'en avons connaissance que par quelques photographies, une ébauche d'article et la copie d'une lettre d'un physicien avec lequel Zinke avait correspondu et que sa fille nous a donnée.

10. La méthode interférométrique et une étrange découverte

Zinke eu la possibilité de faire un film de 500/600 images/s (16 mm) avec une méthode de strioscopie particulière qu'on appelle l'interférométrie.

Grâce à cette méthode Zinke a pu mettre en évidence des structures d'écoulements rythmiques et même les saisir très précisément en « épiluchant » ces quelques films avec une loupe, séquence par séquence.

Zinke étudia de cette manière des voyelles isolées [a,e,i,o,u,ɥ,E,è] (mais aussi à l'intérieur de monosyllabes) et quelques consonnes [ch,m,r,k,t] isolées . Ces observations sont d'autant plus intéressantes : c'est une des rares fois où Zinke donne des références acoustiques pour ses prises de vue, malheureusement on ne laissant aucun enregistrement.

Nous rapportons ici la description exacte que Zinke donna dans l'ébauche d'un article pensé pour une publication qui n'a pu être réalisée avant la fin de sa vie (elle était presque octogénaire à cette époque).

*« La forme aérienne de la sonorité [E] a été filmée avec la méthode interférométrique. Avec une loupe (8x) nous avons remarqué sur une séquence une minuscule « **perle d'air** » entre les lèvres du locuteur. (...)*

*Dans cette expérience nous avons pris 585 images/seconde et nous avons compté **195 perles dans cette seconde**. La hauteur de la voix avec laquelle le locuteur avait parlé correspondait à la note sol, note qui possède 194 vibrations à la seconde. L'apparition d'une perle*

*correspond au début d'une vibration aérienne. Cette gouttelette, cette perle a donc une durée de 1/195s et correspond à une gouttelette de structure très concentrée et bien marquée. Dans les deux images suivantes **la forme de cette perle est étirée et se perd**. Comme la perle a donc d'abord une forme à bordure circulaire bien marquée, claire, qui ensuite dans les deux images suivantes se perd, devient molle, imprécise pour redevenir claire et ronde dans la perle suivante, il en ressort une impression « **optique** » d'un changement constant de l'obscur au clair puis à l'obscur comme « **une sorte d'ondulation** » constante ».*

Remarque : on retrouvera ce phénomène d'ondulation de « bulles » sur notre DVD en strioscopie interférentielle, avec la syllabe [pa], filmée par Rybak en 1980

« Ce phénomène a été observé aussi avec une voyelle [u] et deux diphtongues [u, E]. Le courant aérien dans l'émission de ces sonorités peut traverser sans aucun obstacle les organes articulatoires. Le tract vocal est formé de différentes manières suivant les sonorités émises, suivant l'angle de la maxillaire et la configuration des lèvres. C'est pour cela que les perles sont légèrement différentes dans leur taille et leur structure : sphériques pour [U], légèrement ovales pour [a] et [r]. Elles sont particulièrement grosses pour [a] où l'ouverture de la bouche est grande, moyennes pour /r/, petites pour [u] de par les lèvres tendues et très petites pour [t].

*Sur le film on voit dans les perles aériennes **l'état compressé puis l'état dilaté de l'air** qui ont été provoqués par les oscillations des cordes vocales ou à d'autres facteurs de la phonation. Ces états sont l'expression extrême de la capacité interne du son à avoir de la vitesse. (...) La comparaison du nombre de perles aériennes signifie par là même la comparaison des hauteurs avec lesquels ses sonorités ont été prononcées. **La quantité de perles aériennes correspond à la quantité de vibrations du son.** » (Zinke, 2000: 68-69 ; trad.S.M.).*

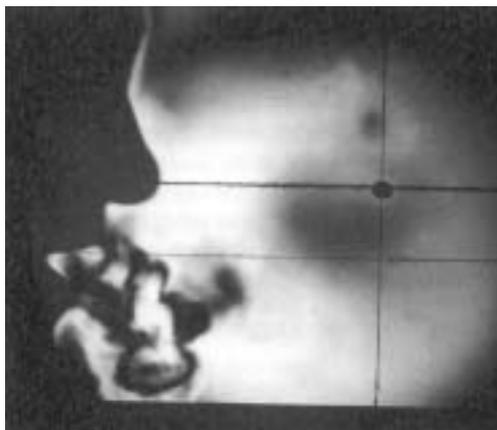


Figure n° 87 :

[è] interférométrie.

(Zinke 2001)



Figure n° 88 : [r] interférométrie + dessin de Zinke (2001)

Le cliché [E] dont parle Zinke dans son article inédit n'ayant pas été retrouvé dans sa succession, nous donnons ici deux clichés [è] et [r] et un dessin de Zinke.

Les prises de vue ont donc été faites entre 500 - 600 images/s donc à une vitesse plus rapide que les oscillations des plis vocaux, puisque la hauteur du fondamental auquel Zinke se réfère est de 195 Hz.

Cette découverte est plus qu'étonnante et il est tout à fait plausible et possible que Zinke ait pu effectivement, grâce à l'apport de l'interférométrie, observer des processus aérodynamiques intrinsèques qui trouvent leur origine dans les oscillations des cordes vocales.

Il se pourrait même qu'elle ait mis en évidence les fameux « puffs » dont on parle dans les bons traités de phonétique, mais qui restent *encore aujourd'hui une énigme* comme nous l'avons exposé dans le chapitre II, 1.5.. Cette dernière piste de recherche en interférométrie pourrait être vérifiable aujourd'hui, avec les moyens technologiques immenses que nous avons à disposition.

Pour cela il faudrait trouver et l'institut équipé - souvent un institut de l'armée ou d'aéronautique - et surtout la personnalité scientifique en mesure de soutenir une telle recherche... ainsi que le financement.

Le grand âge venant, Zinke dut laisser ses recherches.

Nous nous devons d'aller jusqu'à cette dernière étape étonnante de son travail.

Et comme il arrive parfois dans l'histoire et le devenir de la science, ce sont des gens non-spécialistes qui parfois mettent en évidence une dimension nouvelle ou émettent une idée

dans un domaine où les spécialistes s'opposent pendant des années à l'exactitude de ce nouveau fait ou de cette nouvelle conception.

Il en a été ainsi par exemple dans la théorie de la « dérive des continents », liée justement à des processus morphogénétiques, et qui a été émise par Alfred Wegener en 1912, améliorée jusqu'en 1930.

Alfred Wegener était un astronome et climatologue allemand qui eu l'intuition de la dérive des continents en voyant de blocs de banquise se séparer à la surface de l'eau. Il étaya sa théorie avec des arguments géographiques, géologiques, paléontologiques pour la présenter à la société géologique d'Allemagne en 1910, et la publier en 1912 et 1915. Bien sûr, il fut accueilli comme un original et ignoré par la communauté des géologues. Les thèses de Wegener apparaissaient comme un bouleversement radical des conceptions géologiques classiques qui considéraient la Terre comme une structure uniquement minérale et solide, soumise à des forces purement mécaniques.

La théorie de Wegener a été combattue jusqu'en 1954. C'est en 1960, par la découverte de l'expansion des fonds marins que la théorie « mobiliste » de la formation de la Terre, donc des conceptions clairement formulées par Wegener, purent être entièrement prises en compte dans la formulation de la théorie de « la tectonique des plaques » et de leurs mouvements, théorie que nous avons tous apprise à l'école.

Il faut attendre 1980 pour qu'un biophysicien, spécialiste du cœur et des poumons, et mathématicien, le professeur Boris Rybak, fasse aussi des visualisations des formes aériennes des sons du langage, en utilisant la strioscopie interférentielle. Il nomme ces formes: « *turbulences phonatoires externes* ». Les découvertes et visualisations de la pionnière Zinke se voient ainsi confirmées et en partie fondées scientifiquement, spécialement sur le plan physiologique. C'est l'objet du chapitre IV qui suit.

Chapitre IV

Les recherches de Boris Rybak et les « turbulences phonatoires externes »

Ἐν ἀρχῇ ἦν ὁ λόγος

ευαγγελιον κατα Ιωαννην

En mémoire de Boris Rybak, décédé en novembre 2003.

Heureuse croisée de chemins.

*« En terme de physique générale (et aussi de sociologie), il ressort de ces travaux que s'il existe des chaos ou turbulences pathologiques (c'est le sens vernaculaire), s'il existe (comme l'a fait remarqué Prirogine) des chaos-désordres générateurs d'ordres, nous mettons ici en évidence **un troisième type de chaos** : les chaos ordonnés spécifiques itérables à volonté, correspondant ici à une des plus hautes fonctions du vivant, l'énonciation verbale. »*

(Rybak, 1980 : 533-535)

Table du quatrième chapitre

1. Le capteur V.A.P et l'aérophonie	137
2 Les turbulences phonatoires externes et l'ordre chaotique	143
3. Le code lingual	149
4. La boîte noire phonatoire	163

1. Le capteur V.A.P et l'aérophonie

Remarque : dans toutes les citations, les mots et expressions en caractères **gras** sont de nous, les mots et expressions soulignés sont de Rybak. Nous avons dans les citations gardé les barres obliques qu'utilisait souvent Rybak ex. : /pa/ et non [pa].

En 1977 Boris Rybak, biophysicien, faisait part dans une lettre à la rédaction de la revue « *L'onde électrique* » de deux appareils inventés par lui-même. C'est la première de ses inventions qui nous intéresse ici. Avec elle c'est un peu la naissance ou la porte ouverte vers le fondement d'une nouvelle branche de la phonétique, plus exactement vers le fondement de « *l'aérophonie* », comme l'appellera plus tard Rybak, qui commence.

Ce premier appareil est un « *hygromètre électronique de faible inertie fonctionnant par variation de conductance* ». Il est constitué à cette époque d'un « *masque nasal et d'un capteur appendu au masque pour le flux oral* ». Il peut avoir et a eu des utilisations médicales (en prothèse maxillo-faciale) et pour les explorations fonctionnelles (en médecine scolaire, sportive etc.).

Mais ce qui est important ici pour le phénomène des formes aériennes des sons du langage c'est qu'avec « *ce ventiloscope nous avons aussi un appareil phonétique - donc linguistique - analogique* ». (Rybak, 1977 : 455)

Dans cette courte communication Rybak donnait à l'époque l'illustration, la figure suivante :

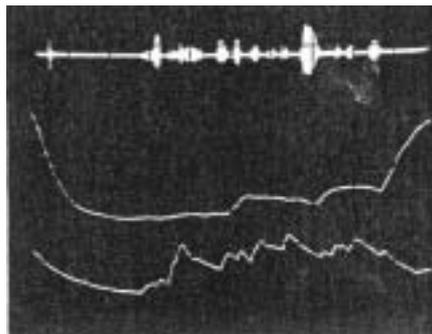


Fig.n° 89 : « Phrase dite : /j'ai pris une petite tasse de thé /

Tracé supérieur : oscillogramme microphonique -Tracé intermédiaire : voie analogique nasale

Tracé inférieur: voie analogique buccale (Rybak, 1977)

Une année plus tard, en 1978, Rybak présente son ventilomètre portatif lors d'un congrès « *Advanced Techno-biology* » à Paris et donne alors une description beaucoup plus détaillée du fonctionnement de cet hygromètre ampérométrique.

« Le ventilomètre original présenté repose sur le principe suivant : la PA H₂O vap est de 47 torr, ce qui correspond pour 38°C - température moyenne au niveau alvéolaire - à la saturation en vapeur d'eau (de sorte que si les mammifères ont une ventilation aérienne, elle n'en passe pas moins dans un milieu hydrique). Il en résulte que l'air exhalé des poumons véhicule une quantité définie - à 7-10% près selon nos calibrations - de vapeur d'eau. J'ai mis à profit cette propriété pour mesurer le volume et, par la dérivée, le débit d'air exhalé (air courant et capacité vitale surtout). A cet effet j'ai construit un hygromètre électronique alimenté par un dispositif du type décrit par la figure 1 et pouvant être réduit en volume et en poids de façon à ne pas gêner la ventilométrie en cours d'efforts physiques dont l'importance est si grande qu'on ne saurait faire un examen fonctionnel ventilatoire sans pratiquer des mesures comparatives avec un sujet donné au repos et dans des postures variables (debout, assis, en décubitus dorsal, ventral etc.) et, en parallèle, le sujet étant en cours d'exercices musculaires variés compatibles avec son état physiologique (marche, course, saut en longueur etc.) » (Rybak, 1979 : 276).

Puis dans un second exposé du même congrès « *Analogic Ventilatory Phonetics* », Rybak présente de nouvelles mesures dont voici deux exemples :

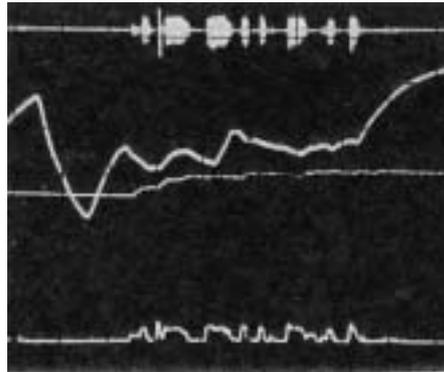


Figure n° 90 : « Fig. 2 / J'ai pris une petite tasse de thé / in DC » (Rybak, 1979)

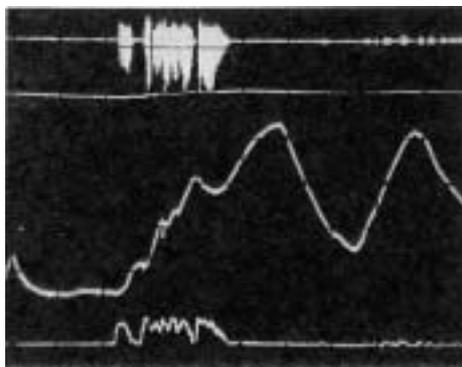


Figure n° 91 : « Fig.3 / Un pont dans la montagne / in DC »

«The demonstration is dealing with a four channels «Tektronix 5103 N » ($t= 500 \text{ ms/div}$) to show:

- 1) at the superior part of the scope, the microphonic oscilograms (1V/ div.),
- 2) immediatly below, the A.V.P. nasal (N) trace (generally 200 mV/div.) but in fig.3 N is the 3rd,
- 3) et immediatly below the A.V.P. oral (B) trace (generally 200 mV/div.), en ou de
- 4) at the inferior part (the intensity (20 dB/Vdiv.). » (Rybak, 1979).

Avec la conférence de 1978 : « *La phonétique, la dialectologie et la linguistique analogiques ventilatoires* » Rybak ouvre une brèche dans un champ de la phonétique dans lequel on avait fait, au début de cette science, quelques tâtonnements (Rousselot sur le régime du souffle) mais qu'on avait abandonné alors car on se consacrait avant tout aux *analyses acoustiques*, analyses favorisées par le développement des appareils de mesure électrique, d'enregistrement et par la radio. On y apprend de nouveaux détails sur le fonctionnement de ce ventilomètre. Rybak voit dans sa méthode un élargissement de l'aéroacoustique en « *une aérophonie* » : ainsi une nouvelle phonétique peut ou pourrait être fondée.

Ce ventilomètre est

« *fondé sur la mesure électronique du taux d'humidité de l'air pulmonaire exhalé avec turbulences sans aucune résistance au flux gaz-vapeur d'eau. L'appareil permet des mesures rectilinéaires couvrant la capacité vitale de l'homme, voire du cheval pendant une course par exemple. Mais le point remarquable est que ce ventilomètre est phonétique ; c'est à dire que chaque phonème isolé ou contextuel prononcé ou non (donc ouverture vers l'aide pédagogique aux sourds-muets, vers la pédagogie des langues, la reconnaissance de la parole, le sur-codage des messages, etc.) correspond à un flux gazeux pulmonaire, donc proportionnellement de vapeur d'eau ; or ce flux passant par voix orale et nasale simultanément - et plus ou moins selon les phonèmes - est spécifique en ce sens que la morphologie de chaque phonème isolée ou contextuelle correspond analogiquement au sens de l'informatique à chacun de ces phonèmes. On dit communément que les langues humaines sont des langages articulés ; en fait ce sont, à quelques exceptions près, des langues soufflées articulées, les exceptions correspondant aux articulations avec inspiration, voire à certains langages africains (par percussions et frictions linguales intra buccales). Mais de toute façon l'on peut dire que la phonétique microphonique est la phonétique énergétique, analogique au sens du physicien des vibrations, mais les tracés obtenus sont beaucoup plus complexes que ceux obtenus par la phonétique ventilatoire qui est phonématique per se et informationnellement analogique, ce, au sens du physiologiste » (Rybak, 1978 : 17).*

Rybak présente alors la nouvelle branche de la phonétique qu'il met en évidence :

*« La phonétique se pratique actuellement à l'aide de capteurs-transformateurs d'énergie qui sont les microphones à pression ou à célérité. Dans ces conditions la transduction phonème-oscillomorphème constitue un processus analogique d'un spectre d'énergie formant ce que je nommerais la **phonétique physique** qui correspond à la mise en oscillation forcée du capteur électro-acoustique (étant considérés les laryngophones qui fonctionnent par le truchement des vibrations des tissus et des organes de la sphère laryngo-pharyngée). Dans tous ces cas de figure, la captation des sons procède en utilisant l'oscillation longitudinale, transverse ou torsionnelle de l'**onde sonore** avec ses composantes de pression dites acoustiques et de vitesse de ses particules. Toute autre est la phonétique que j'introduis dans les champs épistémologique et mathématique.(...)Le point de départ est la suite logique de mes travaux dans le domaine de la bioénergétique viscéro-végétative et qui sont centrés sur le système pulmo-cardio circulatoire. C'est la coordination pneumo-phonique qui est utilisée... » (Rybak, 1978 : 18).*

Rybak donne ensuite de nouvelles précisions sur

*« ce ventilomètre, (qui est un hygromètre électronique quasiment dépourvu d'inertie - fonctionnant avantageusement en courant continu (« DC ») sous 9 -10 V par changements de conductance à partir de la résistance « infinie » d'un diélectrique-) c'est avéré phonétique en ce sens que chaque phonème, isolé ou contextuel, transporte par voix orale et nasale, variables selon le phonème, une certaine quantité spécifique de vapeur d'eau pulmonaire **en régime turbulent caractéristique** et donne ainsi, par enregistrement graphique, un **morphème analogique ventilatoire (M.A.V.)**. Il s'agit en conséquence beaucoup plus de **phonétique physiologique** (ou phonétique analogique ventilatoire : P.A.V.) que de phonétique physique ; en technique P.A.V., il n'y a pas à strictement parler de transduction mais une homéomorphie qui doit permettre de réaliser la synthèse de la parole, la prothèse verbale » (Rybak, 1978 : 19).*

A cette époque - 1978 ! - Rybak faisait la remarque que « nous ne savions encore rien sur ces turbulences » dans l'air expiré pendant la phonation et qu'il se réservait de les étudier dans un avenir prochain. Nous citerons quelques résultats de cette étude de Rybak.

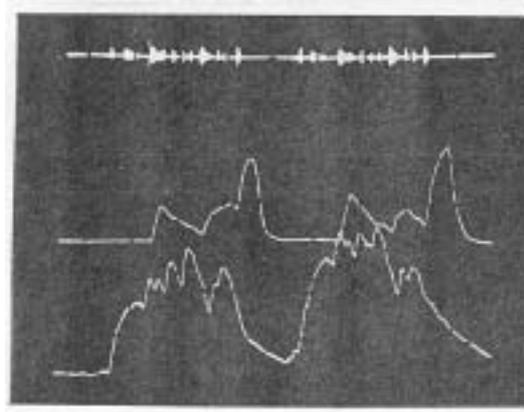


Fig. 10

Figure n° 92 : « Fig.10 :/j'ai pris une petite tasse de thé / prononcé 2 fois consécutivement par le même sujet.
Oscillographie, voie nasale, voix buccale. » (Rybak, 1978)

« On notera que la finesse des tracés et des détails montre une reproductibilité idiolectique liée à la variabilité qui attire toute mon attention non seulement entre individus mais pour un même individu, entre 2 prononcées identiques.» (Rybak, 1978: 22-25)

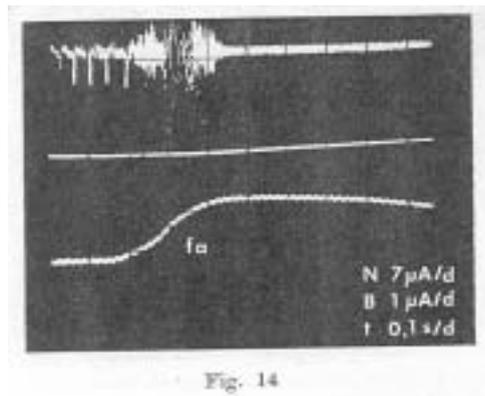


Fig. 14

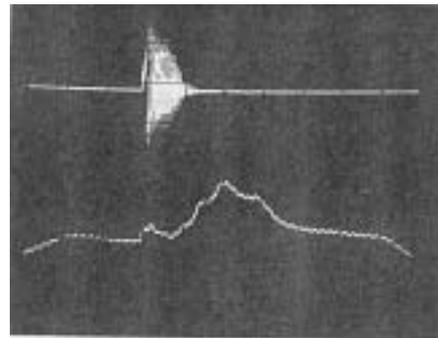


Fig. 16 /p a/

Figure n° 93: « fig.14 /fa/ » Figure n° 94: « Fig.16: /pa/ » (Rybak, 1978)

Rybak constate alors des différents temps de réponse entre la voix et les corrélations oscillogrammes- P.A.V.

« La figure 14 montre , en enregistrement tri voies « DC », la vitesse de réponse pour la syllabe constrictive [fa] : on note d'une part que la voix nasale est plate, ce qui est normal, mais on note aussi que le signal phonémique P.A.V. se déclenche environ 40- 45 ms **avant** le signal vocalique microphonique ; ceci est également normal si l'on conçoit **qu'avant d'être entendu (à partir d'un certain nombre de décibels) le souffle, correspondant au phonème en développement acoustique, est déjà en action.** » (Rybak, 1978 : 24)

Puis Rybak donne encore la figure 16 (voir ci-dessus *Figure n°16 de Rybak* : n°94 dans notre thèse) :

« (...) pour la monosyllabe occlusive /pa/, dans les mêmes conditions d'enregistrement que sont celles de la figure 15 pour/fa/(notamment AC) : on note cette fois-ci un front brusque de montée **simultanée** des signaux M (microphone) et N + B. On notera également que, alors que le son décroît (voie M), le souffle N+B se poursuit ; nous avons donc là le moyen de différencier la fraction énergétique de la fraction ventilatoire au cours de l'énonciation d'un phonème. Ce point sera également développé dans un travail à venir» (Rybak, 1978 : 26).

Rybak a utilisé la méthode V.A.P. pour mettre en évidence des variations phonétiques dans le langage berbère, par exemple, entre celui des montagnes et de la plaine, puis il fait la remarque suivante :

« (...) on ne saurait trop souligner que tous les tracés obtenus par la technique P.A.V. sont caractérisés par la simplicité de leurs constituants géométriques, simplicité qui facilite évidemment l'analyse mathématique de la phonation, beaucoup plus que ne peut le faire l'analyse par développement en série de Fourier et, ceci, tant pour la verbalisation que pour la vocalisation ainsi que l'indiquent des études en cours sur le chant » (Rybak, 1978 : 29-30).

(Malheureusement nous n'avons pas pu obtenir de sa part plus de renseignements sur ces « études en cours sur le chant » auxquelles Rybak faisait référence à l'époque.)

En 1979 lors d'un colloque sur : *Recherche et Pluridisciplinarité à la Sorbonne Nouvelle, Paris 3*, Rybak montre que les tracés obtenus par *phonétique analogique ventilatoire (VAP)* « sont d'une simplicité telle qu'ils autorisent une analyse statistique (...) qui permet de mettre en évidence des porteuses caractéristiques ou invariantes stochastiques de chaque son linguistique isolé ou contextuel en même temps que les singularités circonstancielle qui se trouvent détectées. Avec la technique VAP on saisit un aspect particulièrement subtil puisque la **voix-résultat** - ainsi que je nomme **l'enveloppe phonique manifestée** - est captée comme un flux gazeux turbulent» (Rybak, 1979 : 174).

Rybak conclue :

« On peut donc estimer : 1) que la VAP complète les techniques oscillogrammes microphoniques, des sonagrammes et des analyseurs de mélodie de telle façon que, sans cette technique, l'analyse de l'acte phonatoire serait restée déficiente, 2) que l'analyse des tracés VAP permet de s'approcher au mieux pour l'instant, par la simplicité de ses graphes, de la mise en évidence des

universaux corrélatifs, montrant d'ailleurs que ceux-ci s'avèrent seulement quasi universaux et, ce, non pour des causes instrumentales, extérieures à l'acte phonique, mais intrinsèques à cet acte, 3) que l'occurrence des régularités et singularités les mieux marquées (les élongations) paraît dépendre de la force articulatoire - d'ordre non seulement musculaire mais ventilatoire - toutes choses étant égales par ailleurs » (Rybak, 1979 : 174).

A cette étape de sa recherche il soupçonnait l'existence d'un « *codage cannulaire lingual* », c'est-à-dire que l'air phonatoire devait être modelé et modulé, devait passer comme à travers un moule qu'est l'organe articulatoire principal: *la langue*, l'étude classique de coupes sagittales de la langue n'apportant pas assez de renseignements sur cet encodage.

À l'époque où Rybak faisait ces remarques sur le « *codage... lingual* » la recherche phonétique était encore peu orientée sur *l'aspect tridimensionnel* des mouvements de la langue et ignorait encore presque tout de sa surface. Les méthodes de visualisation par systèmes d'ultrasons et de résonance magnétique (IRM) récentes étaient d'abord à la disposition de services médicaux puis peu à peu utilisées par des linguistes et phonéticiens - souvent en collaboration avec des médecins - permettant ainsi de faire des pas considérables dans ce sens. Effectivement ce n'est seulement qu'aux environs de 1995 que des reconstitutions tridimensionnelles du corps de la langue et de sa surface pendant la phonation ont été réalisées par Narayanan *et al.*, grâce à la méthode d'imagerie par résonance magnétique (I.R.M.) (Narayanan *et al*, 1995, 1997). Nous en donnons trois exemples assez impressionnants un peu plus bas, bien que les circonvolutions représentées ne soient pas encore aussi fines que celles que Rybak présumait et visualisait un peu plus tard. En 1996, Stone et Lundberg publiaient de leur côté des reconstitutions visualisées en trois dimensions des circonvolutions de la langue pour les voyelles de l'anglais. (Stone et Lundberg, 1996)

Mais Rybak entreprit l'année suivante de mettre en évidence *des structures phonatoires dans les processus ventilatoires de la parole* avant de continuer son étude sur les microstructures de l'organe la langue.

2 Les turbulences phonatoires externes et l'ordre chaotique

1980 : une communication à l'Académie des Sciences de Paris sur les « ***Turbulences phonatoires externes*** ».

« La strioscopie interférentielle cinématographique permet la mise en évidence d'écoulements turbulents spécifiques de l'air humide ventilatoire exhalé et présentant des invariants lors de l'articulation sonore ou muette de tout le phonème. (...) »

L'appareil phonatoire « est un « appareil à dynamique géométrico-topologique » qui doit mettre en coordination des vibrations phoniques et des turbulences aériennes créées au cours de l'exhalation des gaz pulmonaires dans le tractus aérophore. La force articulaire de phonation, de chant - et aussi de vocalisation - ne résulte donc pas de la seule activité musculaire mais d'actions conjuguées myo-ventilatoire. Le présent travail confirme en les visualisant l'existence **des turbulences** - que notre théorie amenait à prévoir - tout en précisant la technique originale de phonétique analogique ventilatoire, suite logique de nos recherches en bioénergétique pulmo-cardio- circulatoire.

(...)La technique utilisée est celle de la strioscopie interférentielle ». (Rybak, 1980 : 533)

La personne placée de profil devant un miroir concave de 5,60 m de rayon parle normalement, donc sans avoir besoin d'inhaler de la fumée de cigarette auparavant. Les écoulements gazeux qui forment le flux d'air phonatoire sont visualisés par l'éclairage d'une lumière polarisée. Rybak a pu, grâce à des enregistrements cinématographiques de 480 images/s, suivre avec précision « le développement morphologique des turbulences phonémiques ».

Il donne la liste des syllabes étudiées :

« [ba, ta, ka, pa da ga, fa, sa, cha, va, fa, za].La séquence [ba, ta, ka] a été prononcée puis simulée en articulation muette ; ensuite une séquence [ba, da, ga] a été prononcée, après quoi les syllabes [fa, sa, cha] ont été prononcées, et enfin une séquence [va, za, ja] a été prononcée et simulée en muet. » (Rybak, 1980 : 534)

Puis :

« L'étude s'est poursuivie par l'examen des nasales EN, UN et ON, et elle s'est terminée par la visualisation de la morphologie dynamique de la turbulence des semi - consonnes OUI, LOUI, LUI. » (Rybak, 1980 : 534)

Nous citons maintenant la fin de cette communication qui est essentielle pour la mise en évidence du phénomène des turbulences phonatoires externes et son fondement conceptuel :

« Ainsi :

1. C'est parce que **la phonation est une modulation précise de la ventilation** que les flux gaz-vapeur d'air exhalé présentent des turbulences définies pour chaque conformation dynamique interdépendante des constituants anatomiques de l'appareil phonatoire à un instant donné en tenant compte du biotype et de la variabilité individuelle - notamment au cours de la répétition d'un même phonème, non seulement dans les différents cas pathologiques mais chez le sujet normal. Il faut de surcroît également tenir compte pour le sujet - au moment des prises de son phonique comme des prises de vues des turbulences phonatoires - de la phase de son homéostasie. Ceci étant, les turbulences phonémiques, régulièrement répétables, sont, d'une articulation définie à la même, faiblement aléatoires, des structures invariantes y étant décelables. La phonation n'est donc pas seulement de caractère vibratoire mais relève de la propagation initiale de vibrations phoniques au sein d'un milieu fluide compressible fortement hétérogène et en mouvement. De surcroît chez le sujet non prognathe, le dispositif palais dur-dentition supérieure forme coupole et a tendance à envoyer, pour plusieurs phonèmes (comme VA, DA), le flux turbulent vers le bas. Mais les points remarquables sont les suivants : (1) tous les éléments de l'énonciation sont distinguables. Les syllabes [FA, CHA, etc.] sont dissociables, c'est-à-dire que l'effet structurel consonantique « pur » est visuellement séparé de l'effet vocalique qui le suit ici ; (2) en prenant comme échelle la longueur du nez (~4 cm) on peut déterminer la vitesse de propagation de la turbulence en développement (environ 20 cm/s pour un FA énoncé autour de 60 dB) ; (3) en fin d'articulation sonore ou muette, une certaine quantité d'air, que j'ai nommé air de réserve (laryngo-pharyngué) sort de la bouche ; (4) les nasalités peuvent désormais être étudiées avec une grande précision ; ainsi l'énonciation de AN ou de ON présente une pré nasalisation (abaissement du voile du palais) suivi d'une manifestation orale, alors que pour UN l'ordinateur fluïdique oro-nasal fonctionne en quasi-synchronie, avec toutefois une légère avance pour l'orifice oral ; par contre LUI est entièrement buccal.

2. En terme de physique générale (et aussi de sociologie), il ressort de ces travaux que s'il existe des chaos ou turbulences pathologiques (c'est le sens vernaculaire), s'il existe (comme l'a fait remarqué Prirogine) des chaos-désordres générateurs d'ordres, nous mettons ici en évidence **un troisième type de chaos** : les chaos ordonnés spécifiques itérables à volonté, correspondant ici à une des plus hautes fonctions du vivant, l'énonciation verbale » (Rybak, 1980 : 533-535).

Personnellement nous avons eu l'occasion, lors de nos premières rencontres avec le professeur Rybak, de voir un extrait du film réalisé dans les laboratoires de l'Onera et ainsi de

constater la précision avec laquelle ressortent ces morphologies spécifiques des turbulences phonatoires externes.

On pouvait y voir la manière rythmique et pulsatoire avec laquelle l'air phonatoire sortait de la bouche. Nous avons pu observer particulièrement pour la nasale [l] une suite rythmique de petites bulles. Ceci est très proche des observations de Zinke que nous avons citées et qui, par la méthode interférométrique, avait constaté la structure rythmique et pulsatoire formée par une chaîne de bulles d'air - ou perles - pour beaucoup de sons vocaliques et consonantiques antiques prononcés dans l'air.

On pouvait observer aussi que l'air expiré dans lequel nous parlons garde un court instant sa constitution humide et chaude qui lui donne l'aspect d'un flot sirupeux ou de glycérine dans l'air ambiant. **Les turbulences phonatoires externes maintiennent donc leurs formes caractéristiques pendant ce court instant** et sur une distance d'environ 50 cm à 1 mètre devant la bouche pour des personnes ayant une prononciation bien formée, comme nous avons pu le constater dans les prises de vue que nous avons faites avec nos locuteurs en utilisant la fumée de cigarette d'eucalyptus comme ensemencement de l'air.

Nous ne pouvons donc que déplorer que Rybak ne donne pas une seule illustration de cette découverte remarquable et significative dans cette communication de 1980 faite à l'Académie des Sciences de Paris dans le domaine de la biophysique.

Ce n'est que plus tard que l'on trouve dans quelques-uns de ses articles trois petites reproductions des syllabes [pa], [ta] et [tE], malheureusement d'une très mauvaise qualité ce qui ne permet pas d'étudier les détails de leurs enveloppes globales.

Mais nous donnons dans notre film en DVD (5^e partie) un exemple d'un des films de Rybak: la syllabe CV [pa] avec deux locuteurs. On peut y constater les structures *pulsatoires et turbulentes à bordure globale* : nous en avons fait ressortir *l'articulation morphodynamique* avec des arrêts sur images, vue que ces visualisations ont été réalisées sans le son.

Muni de ces nouvelles observations et confirmations de son hypothèse première, Rybak publie en 1980 dans le Bulletin de Psychologie « *Les principes propédeutiques pour les Sciences du Langage* ».

Nous en citons les passages principaux qui viennent soutenir notre étude:

« (...) le **langage langue** n'est possible qu'avec cet organe (S.M. : la langue et ses 17 muscles) - qui constitue un modulateur du flux d'air pulmonaire avec les autres organes de l'appareil phonatoire, mais il détient un privilège unique de par sa position à la fonction stratégique qui est de modifier fondamentalement le volume instantané de la cavité buccale.

Ainsi la phonation est une **gestuelle complexe**.

Il est remarquable que, modulation de la ventilation, la phonation ajoute à la fonction viscéro-végétative qu'est précisément la ventilation la fonction de relation majeure que manifeste le Verbe. De surcroît, cette modulation, qui engendre donc les sons linguistiques, procède par des positionnements relatifs de **résonateurs**, les uns rigides (denture, palais dur, fosse nasale, maxillaire inférieure **déplaçable**) les autres réversiblement déformables (lèvres, langue, vélum, etc.) de sorte que c'est une **dynamique géométrico-topologique** qui est en jeu dans cet acte **moteur** qu'est l'expression phonique où des muscles **volontaires** sont associés chez l'Homme - et c'est ce qui a surpris les Anciens ! - au souffle » (Rybak, 1980 : 482).

Puis Rybak insiste sur cette nouvelle source d'information phonique que sont les turbulences phonatoires externes : « (...) **chaque phonème présente une morphologie dynamique de turbulence qui lui est spécifique**. (...)

« D'où non seulement une nouvelle issue pour la Phonétique en tant que telle mais encore un aspect nouveau de l'aérodynamique pulmonaire, donc de la Biophysique et d'ailleurs d'une voie inédite dans le traitement d'une information, itérable à volonté et stochastiquement invariante dans le cas particulièrement ardu des turbulences de fluides compressibles ».

Rybak l'avait déjà précisé auparavant, ces turbulences phonatoires externes sont :

« **des chaos de troisième espèce** en ce sens qu'il sont des ordres constitutivement associés à l'acte physiologique (il ne s'agit pas d'enregistrement, donc de **sonique**) qu'est la parole. **Constitutivement** associés, il faut bien le comprendre, non seulement aux actes glottiques mais encore, **ce qui n'est compris que comme un bruit de souffle par la chaîne de mesures à capteur microphonique**, purement buccale, comme pour la chuintante «ch» que l'analyse (B. Rybak, film Onera,) des turbulences montre d'abord constituée d'un événement de sifflement à la turbulence rectilinéaire serrée (période de mise en place des organes phonatoires pour exécuter la chuintante) suivie de d'une dilatation de ce jet qui conduit à une turbulence sphérique (début du chuintement), qui se dilate encore en se dispersant selon une morphologie caractéristique (il est à noter que si la **voyelle** « a », par exemple, est associée à ce prononcer,

*elle apparaît comme élément final de ce prononcer en tant que **turbulence propre** dirigée vers le bas et, en conséquence, analysable pour son propre compte dans cette structure contextuelle de son linguistique » (Rybak, 1980 : 482-483).*

En 1982, Rybak et Duchatel présentent leurs premiers résultats : « *Résultats préliminaires et d'échotomographie phonatoire.* »

La méthode utilisée est « *la ciné-oro-échotomographie qui permet l'étude spatiotemporelle et non - perturbatrice des homotopies, de l'organe lingual en particulier pendant la phonation.* »

La sonde est placée « *en zone sous-maxillaire au niveau du muscle mylo-hyoïdien.* ». « *On y saisit :*

- a) la musculature de la base - voire de la racine de la langue ;*
- b) le dos de cette région ;*
- c) le voile du palais.*



Figure n° 95 : “Photo n° 2 / lui / “



Figure n° 96 : “Photo n° 2: / louis / “ (Rybak, 1982)

Et L'importance de la mécanique linguale ressort particulièrement de la cinétique de l'enregistrement sur vidéocassette. Le cliché 2 montre ce qu'il en est du profil des torsions linguales lors du prononcé de la semi-consonne /lui/ tandis que, à titre comparatif, le cliché 3 indique une torsion linguale, plus arrondie lors du prononcé de la semi-consonne /Louis/. » (Rybak, 1982 : 855-856)

Rybak de conclure :

« (...) l'examen morphologique quantitatif d'organes phonatoires, en particulier la langue, (...) ouvre un champ d'études rigoureuses des modulations de la ventilation que constituent la phonation et, notamment, des harmoniques conditionnant le timbre d'un son et déterminant le domaine formantiel. » (Rybak, 1982 : 857).

Rybak laisse entendre que les circonvolutions transitoires de la langue sont productrices ou coproductrices des fameuses zones formantiques ou formants. Avec une telle affirmation un vaste champ d'études et de débat est ici, encore aujourd'hui, pleinement ouvert.

3. Le code lingual

En 1988 une nouvelle étape est franchie qui va permettre à Rybak de formuler peu après le concept de « *code lingual* ».

Selon Rybak ce code spécifiquement humain doit être ajouté au code génétique qui lui est unanimement reconnu. Cette idée mérite d'être approfondie. D'autres scientifiques de haut niveau l'ont pensé aussi : Marcel Locquin par exemple.

Rybak fait connaître ses nouvelles observations : « *Correspondances morphologiques entre les mouvements linguaux et les écoulements d'air buccaux pendant la phonation.* ».

Il réussit à prendre des mesures isochrones dans leur vitesse de balayage :

- 1) par la V.A.P.
- 2) par l'oscillographie
- 3) par l'échographie avec un processus digital spécialement développé en couplage avec le capteur ultrasonore convexe (3,5 MHz). L'image qui en ressort décrit la variation temporelle d'une ligne-écho sélectionnée sur des sections transversales de la langue.

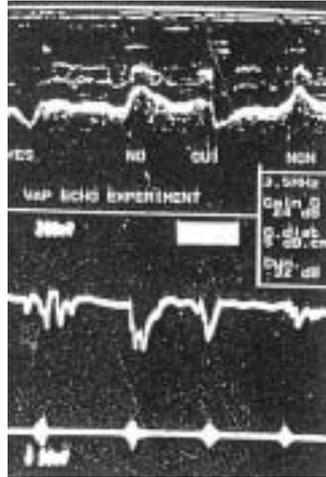


Figure n° 97 : « /yes/no/oui/non/ » (Rybak, 1988)

« La figure (ci-dessus) présente les prononciations successives de **/yes/no/oui/non/** avec :

- 1) dans la partie supérieure, la morphologie de la surface dorsale de la langue (ligne inférieure),
- 2) dans la partie inférieure, les configurations associées en V.A.P. avec,
- 3) en dessous, les traces des oscillogrammes correspondants (échelle : 45s).

Les résultats indiquent que lorsque l'on parle, la langue forme des canaux transitoires gouvernant la forme de l'air associé. » (Rybak, 1988 : 262)

Rybak précise plus tard que ces canaux sont semi-ouverts et de morphologie spécifique pour chaque *phon* : l'air pharyngien y étant encodé « par un moulage (cf les turbulences ventilatoires ordonnées) mais aussi en gradient de pression suivant que l'on parle fort ou bas » ce qui lui permet de dire que c'est bien « un codage global morpho-aérodynamique » qui constitue « la voix- résultat (S.M. : et la parole-résultat) au niveau du tympan et/ou du microphone. » (Rybak, 2001)

Pour nous se pose ici la question de la perception de cette gestualité dans les éléments donnés par le signal acoustique de la parole. Les découvertes et travaux de Condon sur la synchronie interactionnelle et la microkinésie, que nous avons étudié pour l'arrière plan théorique et anthropologique de notre recherche, nous rendent attentifs à un aspect encore mal compris de cette « gestualité audible ». Si la parole humaine a pu naître sur le plan phylogénétique - et peut naître encore aujourd'hui sur le plan ontogénétique - de la gestualité globale de l'être humain, elle est certainement en retour perçue de manière sous-jacente par tout le système kinétique, par tout « le corps de mouvements » de l'être humain.

C'est en 1990 que Rybak publie un petit ouvrage en trois volets: « *L'Identité Humaine* ».

La partie centrale est intitulée : *L'ordre chaotique*

« (...) Or, parler nous paraît tout à fait naturel ; cependant, le fait verbal constitue un mode de communication qui aurait pu ne pas exister. En effet la phonation est une modulation de la ventilation, c'est-à-dire que la fonction phonatoire, qui est une fonction motrice, s'est greffée sur une fonction viscéro-végétative qu'est la ventilation et qui intervient dans l'oxygénation de notre organisme ainsi que dans *L'équilibre acido-basique de son «milieu intérieur* »*...Donc la logique de l'évolution des êtres vivants montre ici l'innovation totale qu'est l'air entendu, qui fait que l'on passe d'une régulation grossière à la régulation la plus fine, la plus haute qui soit connue dans la nature vivante, celle de la création des mots, lesquels interviennent dans l'économie extérieure et intérieure de notre être, donc tout le construit dont nous sommes capables, toute l'anagogie. Les choses auraient pu aller autrement par le développement d'un système de communication chromatique, par exemple, par un codage vers l'extérieur de la peau et dans l'obscurité de notre corps par un codage lumineux, mais la logique des systèmes vivants a suivi l'axiomatique de la meilleure énergétique possible, celle de l'oxygénation» (Rybak, 1990 : 39).

Nous voyons personnellement dans ces considérations* des perspectives immenses quand à l'utilisation de la parole et des sons de la parole humaine dans l'acte thérapeutique. Nous y revenons à la fin de notre thèse, dans des perspectives.

« Le fait de parole résulte donc de l'aérodynamique pulmonaire dont les effets frictionnels au niveau des différenciations anatomiques qui constituent l'appareil phonatoire engendrent des bruits qui s'organisent en sons linguistiques (en phons) au cours du transit de l'air dans des géométries (pour les différenciations anatomiques rigides) et dans des topologies (pour les différenciations anatomiques moles) qui sont topographiquement variables et propres à chaque phon. L'appareil phonatoire n'étant donc pas assimilable à un tuyau lisse. C'est ce que nous avons expérimentalement démontré » (Rybak, 1990 : 39-40).

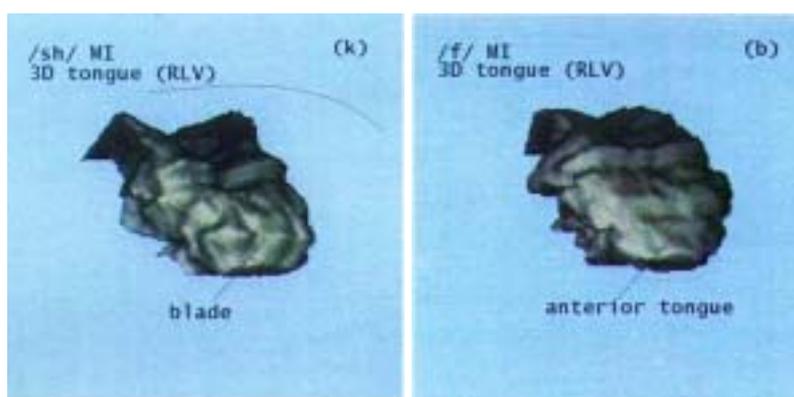
La remarque de Rybak sur le « *tuyau lisse* » - ou tube lisse, le fameux « tube coudé » d'environ 90 ° chez l'être humain, comme on le trouve nommé dans les ouvrages de phonétique - est une allusion aux conceptions mécanistes réductionnistes en phonétique qui ont sévi encore ces dernières années à des fins de modélisations pour comprendre ou plutôt pour copier la nature du conduit vocal. Dans les débuts de la modélisation du conduit vocal on

travaillait avec ce genre de système de tuyaux en matière rigide. Mais grâce aux méthodes d'imagerie moderne on a pu, assez récemment, mettre en évidence **l'extrême mobilité** des parois musclées et des muqueuses souples qui constituent ce conduit vocal. Pour chaque son du langage une structuration dynamique et plastique apparaît puis disparaît en l'espace de millisecondes tout le long des parois du conduit vocal jusque dans les circonvolutions de la surface de la langue !



Figure n° 98: IRM [l]

(Narayanan, Alwan and Haker, 1995)



Figures n° 99 et 100:

MRImages of Fricatives

(Narayanan, Alwan and Haker, 1995)

Notons bien que ce ne sont pas encore des images avec « *motion time* », mais des reconstitutions. Cela veut dire que la réalité doit être encore plus dynamique et plus finement structurée comme Rybak l'a mise en évidence en échographie 4 D. En ce sens Rybak est, depuis 1977 - en ce qui concerne le domaine de la phonétique physiologique - toujours en avance d'une dizaine d'années par ces inventions, recherches et remarques pertinentes.

Puis Rybak en vient aux turbulences phonatoires externes et à *l'ordre chaotique* comme il a nommé ce « *chaos de troisième espèce* ». Nous verrons pourquoi il donne ce nom à ce phénomène nouvellement observé par lui.

Un rappel du chapitre I à propos des cascades d'énergie :

*« Une propriété fondamentale d'un écoulement turbulent réside dans un processus appelé **cascade d'énergie**: la division des grands tourbillons en tourbillons plus petits permet un transfert d'énergie des grandes échelles vers les petites échelles. Ce processus est limité par l'effet de la dissipation moléculaire qui empêche les variations de vitesse trop importantes »* (Wikipedia, 2007).

Il se pourrait aussi que les turbulences phonatoires externes se constituent au sein de la cavité buccale d'après ce principe d'une cascade énergie. Rybak y fait allusion sans la nommer spécifiquement :

*« C'est évidemment **l'enveloppe d'une turbulence aérienne phonique spécifique qui représente la morphologie d'ordre** au sein de laquelle **les vorticités** - sortes de petites cornes d'abondance en giration - constituent l'aspect chaotique ». (Rybak, 1990 : 40).*

Rybak insiste sur ce qu'on appelle en physique « *l'enveloppe* », la forme à bordure globale, la « Gestalt » et qui pour lui représente « *la morphologie d'ordre* » qui est en soi une *structure simple, reproductible*, bien qu'extrêmement complexe dans *ses éléments intrinsèques* et constitutifs puisque formée de tourbillons. Ceci n'est pas sans nous rappeler non plus la caractérisation de ce qu'on appelle en sciences du chaos « l'attracteur chaotique où l'attracteur étrange ».

« L'attracteur chaotique des invariants vibratoires qui gèrent un désordre apparent en attirant à lui le comportement du système dans un régime bien particulier -c'est pourquoi on le dit étrange. Par exemple, la mise en résonance des poumons conduits à concentrer les multiples résonances élémentaires -en interaction- de sa structure... en une réforme globale spécifique, qui représente dans l'espace des états internes l'état vibratoire de cet organe. » (Miquel, 2002 : 213).

Il se pourrait que la projection des sons du langage soit de la nature de ces attracteurs chaotiques ou étranges et qu'ils contiennent des informations ou des éléments que nous n'arrivons pas encore déchiffrer.

Conférence de janvier 1992 (publiée en 1993) : ***Le code lingual***.

(...)

« Les technologies nouvelles que j'ai mises au point apportent donc deux « signaux » qui n'étaient pas connus jusqu'alors et qui présentent des morphologies spécifiques de tout autre type, soit : un « signal » ventilatoire d'élocution (saisi ici par V.A.P. et par strioscopie interférentielle) et un « signal » de torsions dorso-linguales. Jusqu'à ces travaux, la parole - résultat n'était traitée que par voie physico-mathématique qu'à partir de l'oscillogramme acoustique. La Physiologie s'est ainsi bien trouvée associée, comme Physiologie causale, dans sa définition de science des mécanismes des fonctions vivantes, par la mise en évidence des contributions morphodynamiques ventilatoires précises dans la production de la parole-résultat. Je me trouvais en présence toutefois d'un ensemble de données biophysiques dont je ne connaissais pas les corrélations, lesquelles devaient exister pourtant puisqu'une telle coïncidence de spécificité morphologique devait être non des hasards, mais des convergences.

Il faut noter en premier lieu que tous les phons ne sont pas lingualisés et qu'il y a des effets modificateurs intra-syllabiques (les voyelles modifient d'évidence le consonantique auxquelles elles sont associées intrinsèquement mais aussi dans un système phrastique par les liaisons, ce que font aussi les consonnes par rapport aux voyelles) ; de plus, l'aéro-acoustique, telle qu'elle est saisie par le système VAP- microphone, révèle des configurations fines corrélatives entre air et phon. Ainsi, la figure 1 (ci-dessous) montre la simultanéité de l'événement ventilatoire et acoustique pour le prononcé de la plosive/ PA/ (lecture comme toujours du texte de gauche à droite et en « AC »)), alors que la figure 2 (ci-dessous) indique pour le prononcé de la fricative /FA/ une plus grande complexité, soit : il existe un flux d'air pré phonique, mais associé à des trémulations de faible amplitude acoustique, suivi d'un phénomène simultané acoustico-ventilatoire, l'événement se terminant par un processus post-phonique (donc aphone) correspondant à une fuite d'air terminal à l'air strictement phonatoire. Ainsi, dans les tracés constitués de suite de phons, il faut tenir compte des élisions dans l'établissement simultané des correspondances entre les morphologies spécifiques observées. De plus, dans les configurations aériennes recueillies en V.A.P., il faut considérer que, à la suite des événements linguaux, il y a éventuellement des événements dentaux et labiaux, ce qui peut donner lieu à des jets d'air additifs, s'ils sont sonorisés au niveau du microphone. Enfin, il convient de noter que la vitesse du son, dans des conditions thermiques et de tension de vapeur d'eau variable, est, dans les différentes parties de l'appareil phonatoire, grossièrement de l'ordre de 330 m/s, alors que la vitesse des flux d'air exhalé au cours d'une phonation est très variable d'un phon à un autre est, selon les modalités paramétriques, de l'ordre moyen de quelque(s) dizaine(s) de centimètres/seconde en anémométrie évolutive des turbulences externes » (Rybak, 1993:114-115)

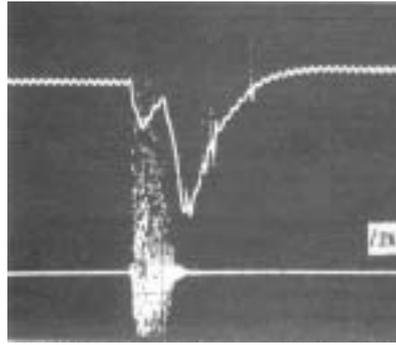


Figure n° 101 : « Fig. 1: /PA /» (Rybak, 1993)

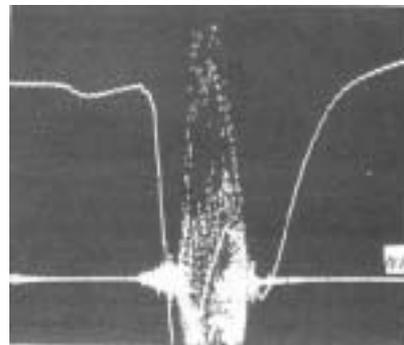


Figure n° 102: « Fig. 1: /FA /» (Rybak, 1993)

Tracés supérieurs : air -V.A.P. Tracés inférieurs : microphone juxtaposé --V.A.P (20 mV/div.)

Balayage : 100 ms/ div.

«Le fait capital de la phonation est lingual et, en conséquence, vont en roulant jouer de façon princeps les endomorphismes cinétiques de cet organe dans le processus langagier (...) » (...)

*À propos de la langue, la phonétique ne considère que **les macro mouvements** de positionnement intra buccal.» (...)* Or, la multiplicité des langues, dialectes, idiomes, patois, idiolectes..., laisse entendre que les procédures de spéciation acoustique, dans la phonologie tant ethno- culturelle qu'individuelle lors de prononcés différents, doivent dépendre **de phénomènes plus fins.**» (Rybak, 1993 :115- 116).

Un exemple que présente Rybak dans cette conférence de synthèse :

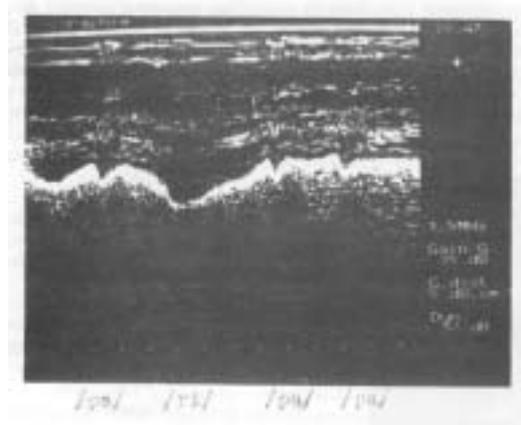


Figure n° 103 : « Fig. 4 : de /pa/ /ri/ et de /pa/ /pa/» (Rybak, 1993)

Remarque : Sur cet écran échographique la surface de la langue en bas : ligne fortement lumineuse due à la salive.

« La figure 4 montre à titre indicatif l'allure des morphologies spécifiques de la langue au cours du prononcé de successif en scansion de /pa/ /ri/ et de /pa/ /pa/. Ces résultats encourageants, qui s'ajoutait à des impressions de corrélations aéro-acoustiques vagues mais récurrentes au cours d'études exploratoires à l'oscilloscope, m'ont amené alors à examiner systématiquement ce qu'il en était de cette relation aéro-acoustique en mettant en oeuvre des oscilloscopes de précision («Tektronix », «Gould », «Schlumberger ») » (Rybak, 1993 : 116).

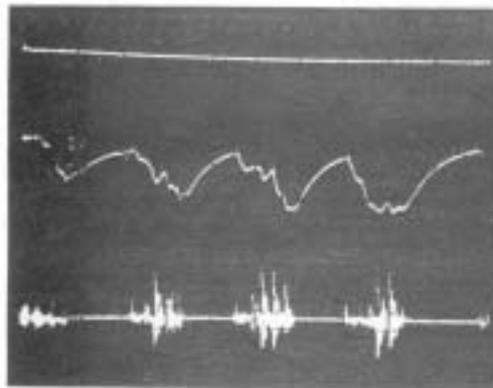


Figure n° 104 : « Fig.5: /pa/ /pa/ /pa/» (Rybak, 1993)

«On constate déjà (figure 5) que, dans des prononcés successifs phonologiquement mais distincts de /pa/ /pa/, il existe une correspondance point par point entre les accidents formant les morphologies du tracé V.A.P. (en haut) et les accidents formant les morphologies du tracé oscillo-acoustique simultané. Mais, et c'est là où il y a dès lors un plus, la figure 6 montre que,

par-delà ces correspondances ponctuelles flux d'air -fréquence acoustique, il se manifeste une induction de la morphologie globale du tracé ventilatoire sur l'enveloppe de l'oscillogramme microphonique (phon /E/) » (Rybak, 1993 : 117).

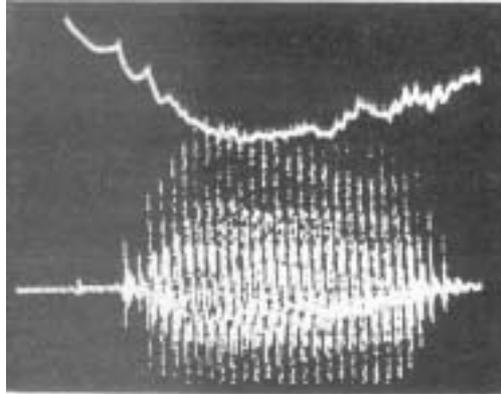


Figure n° 105 :

« Fig. 6 : /E/ »

(Rybak, 1993)

Rybak précise :

«En termes de théorie des processus, la propagation des événements depuis le codage mécanique lingual s'effectue donc selon une suite d'automorphisme dont les aspects, en termes d'instrumentation, sont enregistrés par des capteurs différents de principe et de construction, de sorte qu'à partir de la captation des canaux de spécifications morphologiques dorso-linguaux par un capteur d'imagerie anatomique, l'information est en homéomorphie ad hoc et saisie par un capteur ventilatoire et, enfin, l'impact de cet air codé sur la partie sensible du microphone en détermine les événements d'extensivité (fréquence) et d'intensivité (amplitude) pour modeler l'enveloppe de l'oscillogramme, le microphone agissant comme capteur de pression »
(Rybak, 1993 : 120).

Rybak reprend son idée qu'il existe pour l'Homme un code lingual de même qu'il existe un code génétique. Celui-ci résulte

*« d'une combinatoire biophysique d'endomorphismes n-aires aéro-linguaux. **Ce qui est remarquable**, c'est que cette information aérodynamique va se maintenir lors de sa dissipation externe sous forme de turbogénèse aérienne d'enveloppe spécifique pour chaque son linguistique. Précisément cette organisation d'enveloppe fait que l'ordre chaotique est constitutif de turbulences qui prennent, en bordure donc, une configuration distincte en chaque verbalisation. Cependant ces turbulences dynamiques sont formées de vorticités. Par tomoscopie laser, j'ai pu en démontrer l'existence » (Rybak, 1993 : 120).*

Nous avons noté le « *Ce qui est remarquable...* » de Rybak car il exprime exactement la même réaction de surprise des mécaniciens des fluides lors de nos premières visualisations. Que ces chaînes tourbillonnaires apparaissant à la sortie de la bouche pendant l'acte de la parole présentent des bordures globales spécifiques et reproductibles étaient pour eux aussi « remarquables », même s'ils ne pouvaient pas en donner une explication de suite.

Le fait que l'enveloppe globale, la morphodynamique, garde un court instant sa structure est bien l'expression dans l'air phonatoire de la réalité synergique ou synergétique de chaque son. On peut étudier les sons sur le plan spirométrique (comme l'a fait surtout Rothenberg aux USA) et aussi sur le plan pressionnel-hygométrique (Rybak avec son VAP).

Puis Rybak en vient aux prises de vue en tomoscopie.

« Pour la visualisation des écoulements aérodynamiques phonatoires, j'ai procédé à l'ensemencement avec la fumée de texture \pm fine provenant d'un cigare ou d'une cigarette, pour chaque prononcé à partir d'une charge intra buccale de fumée » (Rybak, 1993: 121).

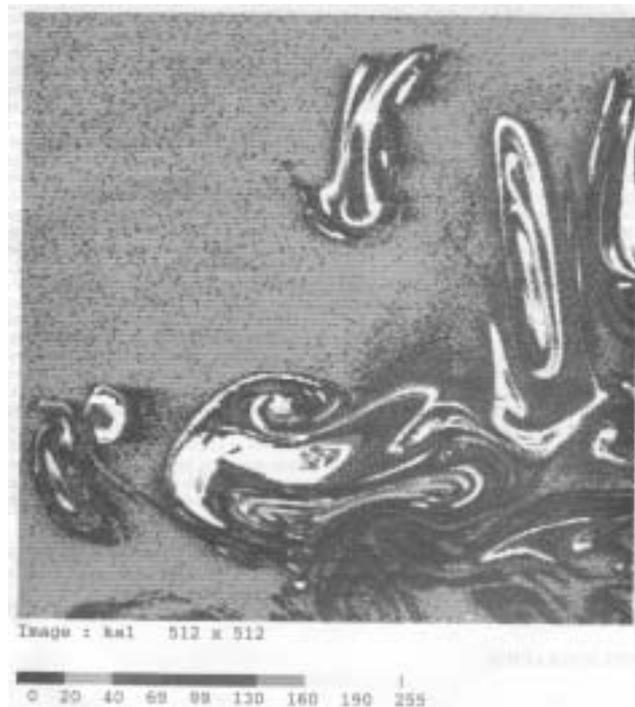


Figure n° 106 : « Fig.12: /KA/ coupe au laser » (Rybak, 1993)

« Comme l'indique la figure 12 lors de la saisie du prononcé de /KA/ la découpe laser fait voir des structures hautement organisées que sont les vortex constitutifs de l'état turbulent.

Ainsi, dans cette figure, la structure centrale en haut représente une coupe longitudinale d'un vortex, alors qu'immédiatement à sa droite se trouve une coupe transversale d'un puits de vorticités ; les structures de la moitié inférieure de la figure montrent d'autres sections transversales et des segments de volutes et torsades » (Rybak, 1993: 121).

Nous avons aussi de notre côté constaté que ces turbulences à enveloppe spécifique des sons du langage sont bien formées de vorticités intrinsèques.

Ces observations ont été faites au laboratoire de mécanique des fluides au LIMSI. Nous avons employé à peu près la même méthode que Rybak, la tomoscopie au laser et avons utilisé la fumée de cigarette d'eucalyptus pour l'ensemencement. Ce n'est qu'un an après que nous avons eu connaissance des documents et des visualisations de Rybak.

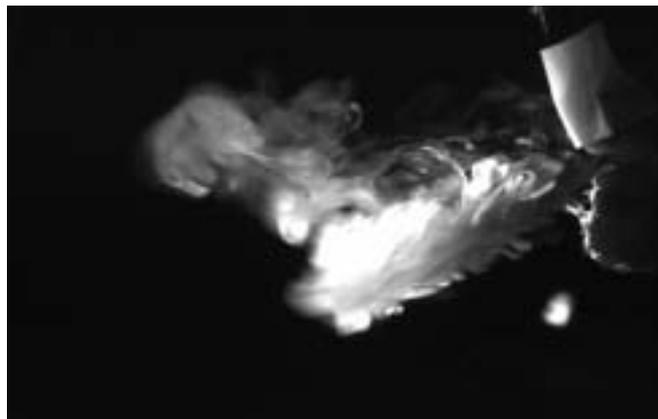


Figure n° 107 : [be], essai de faisabilité, coupe au laser. (F. Lusseyran, Maintier, 2001. LIMSI)

Prononcé par un non-fumeur : le nez protégé par un sparadrap. (à droite)

Dans notre exemple ci-dessus, [be], nous avons l'élément consonantique [b], à bordure globale bien délimitée, se présentant comme une morphologie tourbillonnaire avec des vortex -à gauche- et qui se dirige vers le haut, apparemment poussée par l'écoulement du jet plus rapide et dense, à droite, qui la suit et se dirige vers le bas. Cette deuxième morphologie turbulente, que nous connaissons déjà par les travaux de Zinke et que nous retrouverons confirmée dans nos propres travaux de reproductibilité, est celle de la voyelle [e], qui, quand elle est observée dans un déroulement cinétique d'une visualisation filmée, est caractéristique par sa forme globale triangulaire et qui se dirige rapidement en diagonale vers le bas. Elle

aussi est constituée d'un flot, d'une chaîne tourbillonnaire remplie de vorticités et de tourbillons comme celle que Rybak a visualisée.

Un deuxième exemple de nos prises de vue [bak] afin d'illustrer la richesse et la multitude des vorticités et turbulences dont parle Rybak à la page suivante :



Figure n° 108 : [k] de [bak] sortant de la bouche, coupe au laser. (Lusseyran, Maintier, 2003)

Les diverses observations de Rybak - quant à ces morphologies de turbulences phonatoires -se trouvent pour nous très bien exemplifiées dans nos deux clichés.

(Nous donnons de nombreux exemples dans la troisième partie de notre thèse : voir DVD)

Effectivement Rybak décrit et explique avec grande précision ses techniques de métrologie et ses mesures. Par contre il ne donne pas de visualisations convaincantes *des morphologies d'enveloppes* dont il parle avec tant de pertinence. Cela est certainement dû au fait que ce chercheur ne s'intéressa pas particulièrement à ces morphologies spécifiques en tant que telles. Notre thèse de doctorat continue à élargir ce champ d'études « aérophoniques », surtout sur les rapports entre la morphodynamique et le déroulement du signal phonémique, acoustique.

Pour Rybak, une fois l'existence de ces turbulences phonatoires externes à morphologies spécifiques mises en évidence et prouvées, il s'agissait avant tout de mettre en lumière leur cause, leur source.

C'est donc sur l'organe formateur, « encodeur » de ces morphologies aérodynamiques et aérophoniques que Rybak concentre alors toutes ses recherches : *l'organe de la langue*.

Nous donnons dans les pages qui suivent un résumé des recherches de pointe de Rybak qui continua jusqu'à la fin de sa vie dans ce sens.

«Ainsi, le codage lingual maîtrise un désordre formant un ordre chaotique pour produire un ordre supérieur, celui du Verbe. Cela fait ressortir plusieurs points : d'abord que la notion de désordre est une question d'échelle. Il faut noter déjà que le flux d'air ventilatoire témoin, aphone, présente des turbulences qui renferment des vorticités, c'est-à-dire que si, dans chaque morphologie globale, il présente un chaos quelconque -l'expiration ventilatoire non phonatoire pouvant se produire selon des voies fort multiples-, constitutivement la vortacité y existe ; ce qui distingue un flux d'air phonatoire d'un flux d'air ventilatoire, c'est qu'il est organisé comme morphologie d'enveloppe pour chaque phon et c'est là l'aspect immédiatement apparent de l'ordre chaotique, lequel doit donc s'exprimer en morphologie interne par une organisation des vortex qui, pour le cas parfait, doit être strictement déterministe... Ce sont là des travaux à venir» (Rybak, 1993:121).

Un avenir proche, puisque Rybak annonce déjà du nouveau en 1993.

Il fait une conférence sur « *Le Code Lingual : récents progrès* » dans laquelle il résume de nouveau les étapes de ses découvertes :

« Le code lingual, dont on a notamment ici même publié les caractéristiques (1990), et la relation princeps se manifestant au cours d'une élocution entre 1) les torsions mesoscopiques, alors mises en évidence, formant canaux de morphologie spécifique pour chaque son linguistique (ou phon) de la surface dorsale de la langue , 2) les flux d'air moulés dans ces canaux et en portant leur information sous forme d'air codé, 3) mettant en mouvement le capteur de pression qu'est un microphone, lui imprime, en fréquences et en amplitude, la morphologie canalaire linguale de cette élocution » (Rybak, 1993: 7).

D'abord ces trois paramètres linguo-aéro-acoustiques étaient saisis sur *deux écrans*. Cette fois-ci en 1993 Rybak réussit à établir « *sur un seul écran la synchronie exacte et automatique sur l'abscisse d'extensivité.* » (Rybak, de 1993:7)

Nous donnons un seul exemple des trois présentés par Rybak :

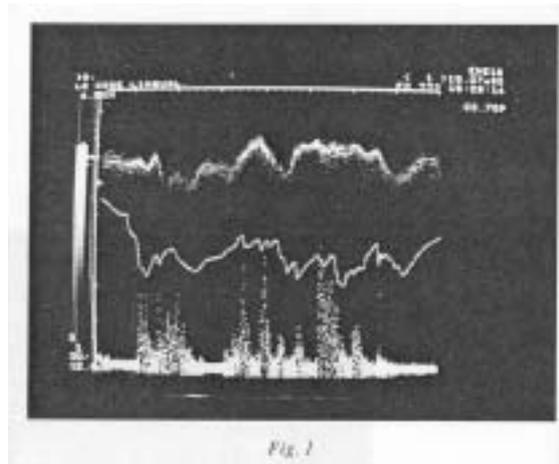


Figure n° 109 : « Fig.1 : /j'ai pris une petite tasse de thé / » (Rybak, 1993)

« La figure1 représente les tracés correspondants à l'articulation de **/j'ai pris une petite tasse de thé /**. La trace supérieure est l'expression échographique des convolutions linguales. La trace fine en dessous est celle du flux d'air ainsi codé, décelée par la technique V.A.P. La trace inférieure est celle de l'oscillogramme microphonique induit. La vitesse de déroulement est de 2s pleine échelle» (Rybak, 1993:7).

C'est seulement un an plus tard en février 1994 que Rybak annonce dans le *Nouvel Art du Français* : «*Le code lingual : récents progrès II* »

« J'ai été amené à perfectionner l'échographe en mode temporel* de telle ou sorte que le tracé des convolutions linguales se manifeste avec une précision jamais atteinte, ce qui va beaucoup aider à la lecture corrélatrice des paramètres mis en jeu dans le fonctionnement du code lingual.» (Rybak, 1994:11).

Remarque : Il s'agit de l'invention de l'échographie haute résolution en mode temporel (EHRM).)

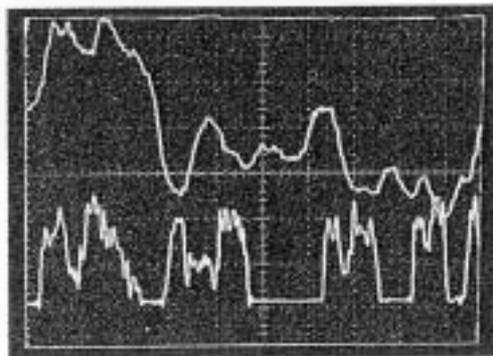


Figure n° 110: « /Bonjour Monsieur. Comment allez-vous ?/ » (Rybak, 1994)

«La figure ci-dessus correspondant au prononcé de:/Bonjour Monsieur. Comment allez-vous ?/montre les tracés linguo-acoustiques associés obtenus par l'échographe perfectionné selon la nouvelle technologie (la trace supérieure est celle des convolutions linguales, la trace inférieure est celle de l'oscillogramme acoustique consécutif).

Le code lingual a ainsi une conséquence instrumentale: l'échographie haute résolution en mode temporel » (Rybak, 1994:11).

4. La boîte noire phonatoire

Déjà en novembre 1994 une nouvelle communication de Rybak s'intitule : « *La Boîte Noire Phonatoire* ».

Rybak ajoute à ces mesures *une quatrième voie paramétrique*, celle du système glotto-laryngé à l'aide d'un laryngophone pré-amplifié (x3) donnant un oscillogramme microphonique. Nous donnons la troisième figure présentée par Rybak, page suivante :

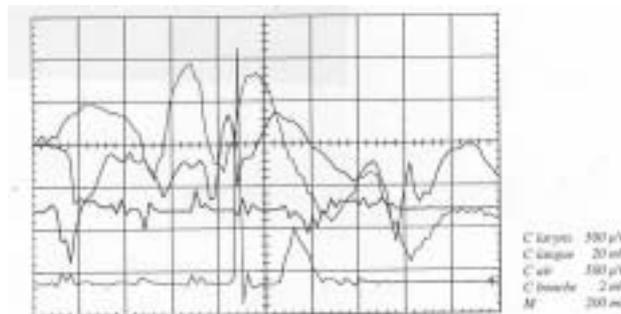


Figure n° 111 : « /Paris est / dans /Paris est la capitale/

«La ligne des correspondances de grande précision ; (pointe à pointe, emboîtement, parallélisme cinétique, etc.) se manifeste dans le système quadri- paramétrique :

Ici le prononcé de /**Paris est**/ un extrait de l'énoncé /Paris est la capitale/ (...)

Ainsi, pour la première fois, ont pu être établis, de façon non perturbatrice, des événements auto adjoints qui conditionnent fondamentalement la réalisation de la parole » (Rybak, 1994:32).

Ayant réussi la démonstration de l'existence de l'oscillogramme acoustique de sons linguistiques provenant de l'aérodynamique codée par la langue, indépendamment des

oscillogrammes tirant leur origine de l'aéroacoustique laryngée, Rybak et des collègues du Service de Radiodiagnostic de l'Hôpital Saint Louis à Paris entament en 1995 la démonstration anatomique-fonctionnelle.

Ces recherches sont publiées sous le titre : « *Mise en évidence d'homotopies surfaciques de la langue en cours de phonation.* »

Ils utilisent pour cela un échographe Combison 530 équipé d'une sonde de volume unique de 3,5 MHz. La sonde est positionnée au niveau du plancher buccal en regard de la région de mylo-hyoïdienne.

« *La séquence de balayage, d'une durée de 3 secondes, permet d'obtenir par reconstruction 3 plans de coupes orthogonaux. Ainsi, dans l'exemple rapporté, à partir d'un empilement de coupes sagittales, des coupes transversales et horizontales de la masse linguale sont reconstruites.* » (Rybak, 1995:170)

Page suivante :

Reproduction du prononcé : /allô/

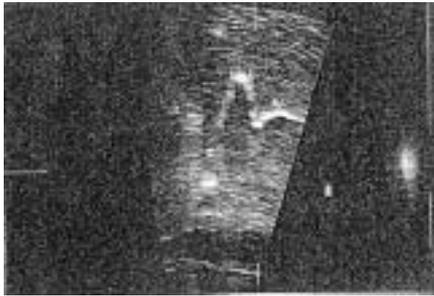


Figure n° 112 : « /allô/ » (Rybak, 1995)

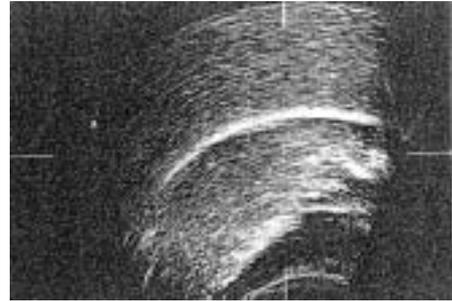


Figure n° 113 : « /a/ » (Rybak, 1995)



Figure n° 114 : « /l/ » (Rybak, 1995)



Figure n° 115 : « /l/ » (Rybak, 1995)



Figure n° 116 : « /o/ » (Rybak, 1995)

La ligne blanche la plus lumineuse correspond la surface de la langue ; on devine les différentes lettres du mot ALLO indiquées sur les clichés ou sur le côté gauche.

Peu de temps après, Rybak publie un article : « *De la vie au Verbe* » qui semble être un compte-rendu d'une conférence au Collège de France en 1995 dans lequel il conclut :

« Dès lors, je considère l'appareil phonatoire comme une boîte noire glotto-buccale (voire

nasale) de sorte qu'on enregistre simultanément 4 paramètres sur un seul écran, soit : deux phénomènes acoustiques ((de la parole laryngée et de sa forme résultante orale, affinée au niveau oral) et deux phénomènes strictement mécaniques (les convolutions linguales et les flux d'air codé). On décèle ainsi des synchronies constitutives de ces paramètres réalisant la parole-résultat. Il s'agit désormais d'une aéro-acoustique différente de celle des inertes du fait des conditions topogéométriques et hygrométriques particulières qu'impose la nature phénoménologique de l'aérophonie. Par des expérimentations sur les phons sourds et les phons sonores, aussi sur la « beauté naturelle de la langue française » (le /e/ muet), le rôle capital des canalisations fines du code lingual est désormais acquis » (Rybak, 1995: 23).

En 1997 au 16e Congrès International des Linguistes de Paris Rybak fait part d'une communication : « *Les étapes de la découverte du code lingual* ».

Il précise alors que

« ... les canalisations résultent des deux types de mouvements conjugués glotto-glossiques : les mouvements glottiques « en éventail », bord à bord s'organisent en code par rapport aux mouvements glossiques - ceux-ci étant plus variés 1) Haut-Bas et inverse global ou partiel et 2) Latéraux-constrictifs et expansifs. Tous ces mouvements macroscopiques, mésoscopiques et minuscopiques forment un dorsum linguae instantané de codage morphologique et barodynamique de l'air pharyngien » (Rybak, 1997).

Dans une séance de travail de l'Académie Nationale de Chirurgie Dentaire en 1997 Rybak présente le *Codage Lingual de la Parole*.

Il redonne les grandes étapes de ses découvertes et apporte de nouveaux détails importants. Il fait pour cela devant son auditoire une démonstration avec un nouvel appareil :

« (...) Le Voluson 530D réceptionné dans le service de Radiodiagnostic de l'Hôpital Saint-Louis, appareil avec lequel j'ai l'honneur de vous présenter le premier cliché obtenu en temps réel 3D (même 4D en considérant le temps d'énonciation) du code lingual sur le prononcé /bonjour bienvenu à l'hôpital Saint-Louis/ : 2D (figure 3 a), et 3D (figure 3 b). Ceci étant acquis, les canaux du code lingual pourraient intervenir dans la réalisation des formants (la planche 1 donne l'analyse formantique et l'analyse boîte noire d'un prononcé de /Paris est la capitale/, soit les bases de la relation princeps glotto-glossique » (Rybak, 1997:112).

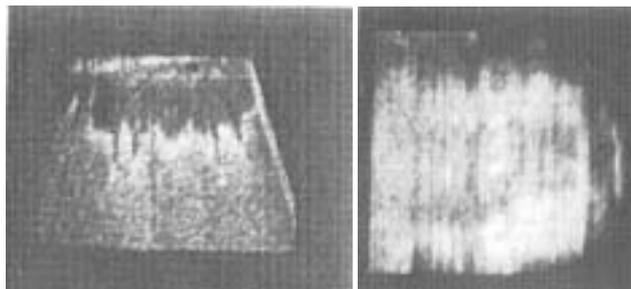


Figure n° 117: « Fig. 3 a » (Rybak, 1997) Fig. n° 118: « Fig. 3 b » (Rybak, 1997)

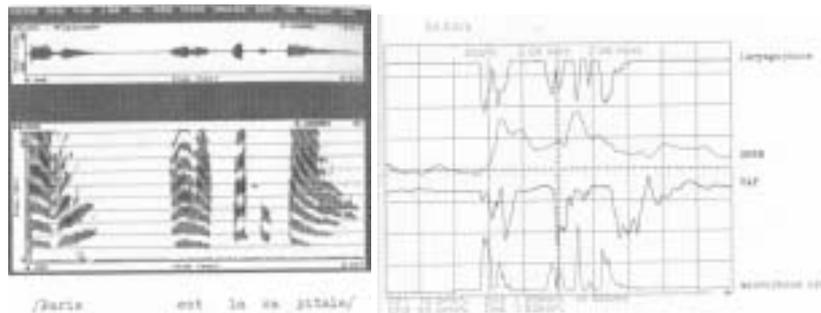


Figure n° 119 : « Planche I sur deux images » (Rybak, 1997)

Quelle va être la nouvelle étape dans les inventions et les recherches de Rybak ? !

Boris Rybak est malheureusement décédé le 14 novembre 2003, à 82 ans, alors qu'il continuait toujours ses recherches.

Nous sommes heureux d'avoir rencontré ce chercheur productif, exigeant, souvent plagié, donc méfiant et d'un abord pour cela difficile. Nous lui rendons hommage en donnant ici l'historicité de ses recherches et les lignes directrices de sa vision et compréhension du phénomène de la parole. Mais cette étude détaillée et approfondie de ses travaux et idées a été pour nous aussi une démarche de compréhension et de confirmation du phénomène des formes aériennes des sons du langage.

Même s'il n'a été que très peu compris des linguistes, lors de rares congrès de phonétique où il présenta ses travaux avant tout du point de vue physiologique – bien qu'il maîtrisait les mathématiques et l'aspect physique des choses parfaitement - nous pensons que Rybak sera mieux compris dans les années à venir, comme beaucoup de précurseurs l'ont été souvent après leur mort, ainsi que nous le formulions à propos de la recherche pionnière de Zinke.

Remarque : Bien que dans la langue française et dans la majorité des ouvrages on ait pris

l'habitude de parler de *respiration*, nous devrions faire la différence d'avec *la ventilation*. C'est un point important sur lequel insiste Rybak, spécialiste du coeur et des poumons : la respiration est un fait *cellulaire* et la *ventilation* est un déplacement d'air dans des conduits spécialisés.

Mais nous employons les deux termes dans notre thèse, un peu comme cordes vocales et plis vocaux.

Troisième partie

Approche expérimentale

Chapitre V

Objectifs, méthode, protocole expérimental

Table du cinquième chapitre

1. Objectifs	175
2. Méthode	176
3. Prises de vue	178
3.1 Faisabilité et reproductibilité : un, deux, puis cinq locuteurs	178
3.2. Prises de vues au laser au LIMSI d'Orsay: deux locuteurs	178
3.3 Ensemencement de l'air par la fumée de cigarettes d'eucalyptus	179
4. Matériel et moyens techniques pour les prises de vue des essais de faisabilité et d'études de reproductibilité	180
5. Acquisition du corpus	181
5.1. Première étape : Films 25 im/s	181
5.2. Deuxième étape : visualisations avec 100 images/ s et éclairage au laser (tomoscopie)	181
6. Le corpus	182
6.1. Premier film : Essais de faisabilité	182
6.1.1. Deuxième film : Essais n° 1 : [a,e,i,o,u,] isolées , [d, t -,g, k -,b,p,l,m,v] isolées et les syllabes CV [ba,be,bi,bo,bu]	183
6.1.2. Essais n° 2 : Reproductibilité - Les syllabes CV [da,de,di,do,du]	183
6.1.3. Essais n° 2 : Reproductibilité- Les syllabes CV [na,ne,ni,no,nu]	184
6.1.3.1. [an]	184
6.1.3.2. Essais n° 3 : Reproductibilité - Les syllabes C ₁ V ₁ C ₂ [bak, bèk,bik,bOk,buk]	184
6.1.4. Essais n° 4 : Reproductibilité- Mots de deux syllabes C ₁ V ₁ C ₂ V ₂ [bato] et [pato]	184
6.2 Deuxième film : Reproductibilité et étude dans les trois axes : profil, face, dessous	185
6.3. Prises de vue au LIMSI	186
6.3.1. Premières prises de vue	186
6.3.2. Deuxièmes prises de vue	186
6.4. Troisième prises de vue au LIMSI avec son: les syllabes C ₁ V ₁ C ₂ [bak, bèk,bik,bOk,buk]	186
7. Analyses morphodynamiques	188
7.1. Analyses morphodynamiques des films à 25 images/s	188
7.2. Analyses morphodynamiques et acoustiques des films au laser, 100 images/s	189

1. Objectifs

Remarque : Nous ne connaissions au départ aucun chercheur travaillant actuellement sur ce sujet.

Nous avons démarré avec des moyens techniques limités, par conséquent nous avons d'abord avancé de manière extensive, mais conscients que nous voulions arriver à une analyse descriptive détaillée et précise.

Pour cela notre objectif plus lointain était une analyse au laser et avec des caméras plus performantes. Il nous fallait pouvoir faire *une analyse au centième de seconde* (1/100 s), donc toutes les 10 ms, ordre de grandeur pour les analyses et sur lequel les phonéticiens se sont accordés. (Calliope, 1989:16) Mais il nous fallait trouver le laboratoire et l'équipe de mécaniciens des fluides qui nous offriraient de leur temps, leurs compétences et leurs conseils pour nous engager dans de telles visualisations.

Nos objectifs dans un ordre de priorité :

- Vérifier une partie des visualisations de Zinke.
- Mettre en évidence la reproductibilité pour une personne, puis deux personnes, voire quatre ou cinq personnes.
- Faire une analyse descriptive de la morphodynamique de ces sons.
- Ne pas en rester à l'étude de sons isolés, comme l'a fait Zinke, mais étudier de manière systématique *des séries* de coarticulations avec les voyelles: [a, e, i, o, u].
- Trouver si possible des corrélations entre la segmentation, la structure morphodynamique, et la structure acoustique des sons étudiés, chose jamais systématiquement réalisée jusqu'à aujourd'hui.
- Nous laisser surprendre par certaines « découvertes » qui se feraient.

2. Méthode

Nous avons pris une démarche phénoménologique pour notre recherche fondamentale. Une telle démarche phénoménologique est pensée dans le sens d'Husserl, de Merleau-Ponty ou, plus en arrière dans le temps, de Goethe. Elle consiste à respecter l'ordre temporel des phénomènes, de ne pas les fragmenter en morceaux « qui ne peuvent plus être remis ensemble ».

Si l'on veut par exemple observer et comprendre les comportements de l'eau* mais en ne s'intéressant qu'aux éléments de sa décomposition, de son analyse chimique qui sont l'hydrogène et l'oxygène, nous aurions ce genre d'analyse qui « fragmente en morceaux » mais en perdant les qualités particulières de l'élément observé au départ. Dans le cas de l'eau, l'hydrogène *s'enflamme et explose* facilement et l'oxygène est la base de toute *combustion*. De leur réunion naît *l'eau* qui est *un autre élément à un autre niveau* et qui présente de toutes autres propriétés, comme celle d'éteindre le feu par exemple, chose assez surprenante au premier abord quand on voit que ces deux composants sont de nature ignée, inflammable.

*Même les sciences actuelles n'en finissent pas de découvrir des propriétés jusque-là méconnues de l'eau justement à notre époque, époque où sa « traïtance » et le maintien de son cycle géobiologique deviennent un des plus grands problèmes planétaires, économiques et écologiques du XXI^e siècle. « L'or bleu » est un concept d'aujourd'hui.

Avec ce type d'analyse nous arrivons à des fragments de décomposition qui ne nous donnent plus les propriétés spécifiques du tout dans lesquelles ils étaient réunis. C'est en étudiant d'une manière phénoménologique les comportements de l'élément liquide aqueux que l'on peut s'approcher de sa nature particulière. Là se pose la question de la partie et du tout.

Pour comprendre l'élément liquide aqueux il faut faire une analyse d'une partie qui soit encore en relation avec le tout : ici dans notre exemple, ce serait *la goutte d'eau*. Mais alors pour y parvenir il nous faut exercer *un autre type d'analyse*, une analyse « qui décompose un tout en **unités de base** » (Vygotsky, 1997 :53-54). Ces unités de base doivent posséder encore « *toutes les propriétés fondamentales du tout* » et elles sont en ce sens « *des parties vivantes de cette unité qui ne sont plus décomposables* » à la différence des éléments. (Vygotsky, 1997 :3-54) Cette notion d'analyse en « *unités de base* » a été formulée par le grand psychologue et scientifique russe Lev Vygotsky, dans son ouvrage « *Pensée et Langage* ».

Nous ne l'utilisons pas ici sur le plan psycholinguistique comme Vygotsky l'avait fait, mais nous reprenons cette caractérisation d'une analyse qui ne casse pas l'élément qu'elle étudie.

Ce type d'analyse est très proche de la démarche phénoménologique qui a été celle de William Condon. Celui-ci a cherché à mettre en évidence, dans le continuum d'espace-temps qu'est l'interaction langagière, des *unités de base du comportement humain*. L'utilisation de la cinématographie lui a permis de mettre en évidence et de décrire d'une manière précise ce qu'il a nommé « *la synchronie interactionnelle ou microkinésie* », comme nous l'avons présentée plus haut.

Appliqué à la phonation, on pourrait dire qu'étudier des sons du langage **sans leur support aérien** ne nous donne *que l'aspect acoustique* de la parole mais pas sa dimension aérienne, respiratoire, « gestuelle », de mouvement, ou dit autrement : sa dimension aérodynamique.

Cette dimension est indispensable pour saisir la parole dans sa globalité fonctionnelle vivante.

Certes de nombreuses technologies travaillent en filtrant et en manipulant les ondes acoustiques produites par la phonation ou par des synthétiseurs électroniques. Mais comme les limites de la modélisation de la voix humaine le montrent, il nous faut intégrer les couches, les processus aérodynamiques comme processus générateurs de la voix, de la parole, si nous voulons avancer.

Car une chose est bien certaine quand nous parlons de manière « oralisée » : les sons du langage ne sont possibles que grâce à la respiration et la ventilation modulées, donc à l'élément aérien, pneumatique. On touche effectivement ici à une zone de transition entre *le domaine physique et le domaine physiologique* de la réalité de la phonation, thème qui revient tout au long de cette thèse.

Dans un premier temps il s'agit donc pour nous de faire *une analyse descriptive* des unités de base de la parole réalisée dans l'air phonatoire, de les comparer, de les ordonner puis si possible de trouver des paramètres. C'est la raison pour laquelle nous avons très vite étudié des **séries de syllabes basées sur les cinq voyelles**, la syllabe étant l'unité de base de la phonation humaine, dans sa production comme dans sa perception*, déjà chez le nourrisson. (*Voir les études sur les nourrissons citées et aussi faites en partie par J. Mehler, 1995 :222-230)

Nous ne faisons qu'élargir la brèche ouverte par Zinke et Rybak sans chercher à donner d'emblée des explications aux différents niveaux que pose ce phénomène reproductible. En ce sens notre partie théorique devrait venir *après* notre partie expérimentale, chose qui aurait été inhabituelle dans le modèle des thèses classiques.

Nous pouvons espérer que des phonéticiens, des mécaniciens des fluides et surtout des aéroacousticiens sachent, de par leurs compétences, découvrir ou reconnaître dans cette recherche pionnière encore tâtonnante des éléments qui demandent à être approfondis. Mais ceci nécessite le travail d'une équipe interdisciplinaire.

3. Prises de vue

3. 1 Faisabilité et reproductibilité : un, deux, puis cinq locuteurs

Remarque : Pendant les premiers essais de faisabilité nous avons d'abord une seule locutrice afin d'observer la reproductibilité chez une personne. Les essais sur les cinq voyelles [a,e,i,o,u], quelques consonnes et quelques mots étaient convaincants.

Deux jeunes femmes et trois jeunes hommes âgés de 20 ans en moyenne, tous fumeurs, ce qui est nécessaire pour obtenir une bonne qualité des formes aériennes des sons. Effectivement la fumée doit venir des poumons si l'on veut obtenir *une image aérodynamique des processus qui ont eu lieu au travers de la glotte jusqu'à la sortie de la bouche.*

Le fait d'aspirer de la fumée seulement dans la bouche et de prononcer ensuite une syllabe donne une image déformée et fausse des processus aérodynamiques sous-jacents à la phonation.

Nos jeunes locuteurs - à part un jeune homme - n'avaient aucun problème particulier au niveau de l'élocution, ni au niveau respiratoire et ne présentaient aucun accent alsacien, ce qu'il faut préciser pour la région.

3. 2. Prises de vues au laser au LIMSI d'Orsay: deux locuteurs

Pour les expériences plus poussées et les prises de vue au laser au LIMSI d'Orsay, nous avons travaillé avec la jeune femme (L.K) qui avait la meilleure diction. Elle avait pris option théâtre au baccalauréat.

Son frère (N.K.), fumeur lui aussi, était le deuxième locuteur pour les prises de vue au laser.

Il présentait un léger problème de cloison nasale, chose qui nous est apparue - heureuse opportunité - dans les visualisations *des syllabes nasalisées* [na], [ne] ce qui nous a permis de faire une petite constatation.

Effectivement l'impression acoustique dure, courte, un soupçon nasillarde de sa voix parlée trouvait sa confirmation dans la configuration ventilatoire et morphodynamique de sa parole.

3.3 Ensemencement de l'air par la fumée de cigarettes d'eucalyptus

La fumée de cigarettes de tabac -ou bien d'eucalyptus dans notre cas- n'a aucune influence pondérable sur le développement des structures tourbillonnaires étudiées. C'est pour cette raison qu'on l'utilise depuis plus d'un siècle comme moyen d'ensemencement de l'air pour les travaux de visualisations et d'étude de comportements tourbillonnaires et turbulents dans les laboratoires de mécanique des fluides. Elle offre l'avantage de réfléchir la lumière de telle sorte que les courants aériens *intrinsèques* y apparaissent de manière pertinente.

Ce n'est pas le cas avec *la méthode strioscopique* (nommée aussi : *ombroscopie* ou *Schlieren*) comme nous l'avons déjà fait remarquer dans le chapitre sur les visualisations de Zinke. L'avantage de la méthode strioscopique c'est de faire apparaître *l'enveloppe globale* d'une manière très plastique. De plus on peut travailler avec des non-fumeurs et donc théoriquement avec des personnes de tout âge.

Nous avons aussi utilisé des cigarettes *d'eucalyptus* afin de respecter la santé de nos locuteurs qui devaient fumer beaucoup de cigarettes pendant nos séances. Lors d'une première séance avec des cigarettes de *tabac* des locuteurs ont dû reconnaître qu'ils avaient vite des malaises.

Les locuteurs doivent aussi se familiariser avec la manière de parler en expirant naturellement la fumée, sans secouer la tête par exemple, comme cela était le cas au départ pour deux de nos

locuteurs.

4. Matériel et moyens techniques pour les prises de vue des essais de faisabilité et d'études de reproductibilité

(Prises de vue faite à Colmar dans une salle de musique).

Caméra Sony DV CAM PD 100 25 images/ secondes (25 im/s)

Éclairages Tungstene 500 W avec lentille de Fresnel 3200° K

Microphone Neumann KMR 81 I (33 Hertz-20 000 Hertz)

Acquisition sonore sur la cassette DV Sony.

Matériel au LIMSI d'Orsay, Paris :

Prises de vue faites dans la petite salle du laboratoire de mécanique des fluides où se trouvait le laser.

LASER Spectraphysic : 3,6 Watt sortie de puissance

Ar ++ (Argon)

Longueur d'onde : vert (514,5 nano) +bleu (488 nano)

Caméra du laboratoire pour les premières visualisations :

Technologie Pulnix

30 Herz (30 images/ sec)

Deuxième étape au LIMSI.

Les prises de vue d'octobre 2003 ont été réalisées par M. Arnaud Susset, directeur de R+D VISION, Paris, qui est venu au LIMSI avec son matériel loué pour notre propos :

Une caméra avec prise de son synchronisée, Technologie CMOS, réglée à 100 images/seconde

Enregistrements des images sous Windows 2000

Microphone : Beyerdynamic Opus59 45 à 16000Herz, placé sur le côté droit, à 15 cm du locuteur, au niveau de la bouche. Pis

Acquisition sonore : DAT Tascam TEAC Professional

5. Acquisition du corpus

5.1. Première étape : Films 25 im/s

La reproductibilité du phénomène avec *des voyelles et des consonnes isolées*, tout comme *des syllabes*, était perceptible macroscopiquement. Ces premiers résultats nous encouragèrent à faire des prises de vue avec *cinq autres locuteurs*.

Remarque : Parallèlement à ce travail nous avons continué de prospecter afin de trouver un laboratoire de mécanique des fluides et surtout un aérodynamicien en mesure de s'intéresser notre sujet.

Entre-temps nous avons eu la possibilité de faire des essais de faisabilité au LIMSI d'Orsay.

5.2. Deuxième étape : visualisations avec 100 images/ seconde et éclairage au laser

(tomoscopie)

Deux locuteurs.

Protection des yeux avec des lunettes spéciales. On travaille dans l'obscurité.

Protection du nez avec un sparadrap blanc pour éviter les brûlures.

Montage et installation d'un système de barres métalliques pour fixer le visage des locuteurs.

Installation du laser au plafond de la salle.

Température : 20 °C

Humidité de l'air : normale.

Un léger bruit de fond, un chuintement, se fait entendre : c'est le système de refroidissement du laser qui apparaît légèrement dans nos enregistrements lors de nos prises de vue avec son. Les phonéticiens sauront le reconnaître.

Tout d'abord nous explorons un large champ de sonorités et de syllabes pour les comparer avec les structures morphodynamiques déjà obtenues dans nos visualisations faites par simple éclairage de cinéaste et à 25 images/s.

Il faut préciser ici que de nombreuses séances ont été nécessaires pour saisir ces turbulences phonatoires dans la nappe de laser ultrafine.

Nos premières séances d'essais puis de visualisations pour la reproductibilité au LIMSI ont été faites sans le son. Pour la troisième et dernière séance nous avons enfin pu louer un matériel adéquat récemment développé et aboutir à des prises de vues avec son synchronisé au 100^e de seconde. Ces visualisations permettant **une analyse morphodynamique et acoustique** pertinente

6. Le corpus

Liste des morphodynamiques et sons visualisés.

Tous ces sons sont archivés sur des cassettes DV Sony ou sur des CD-ROM.

6.1. Premier film : Essais de faisabilité (décembre 2001)

Nous avons d'abord fait des essais sur des voyelles isolées, quelques consonnes et quelques mots avec une seule locutrice. Les résultats ont été convaincants car nous avons constaté macroscopiquement des formes aériennes très semblables à celles que nous connaissions par des photographies de la pionnière Zinke.

Les voyelles isolées présentées dans le DVD font partie de cette première série.

6.1.1. Deuxième film : Essais n° 1 : [a,e,i,o,u,] isolées , [d, t -,g, k -,b,p,l,m,v] iso lées et les syllabes CV [ba,be,bi,bo,bu] (février 2002)

Son et images (25 im/s)

L'indication +r après un son ou une syllabe signifie que la turbulence phonatoire passe une deuxième fois sur le film mais sans le son et *au ralenti* : +r (environ ralenti à 50 %).

Remarque : Nos abréviations

1re f signifie : première femme ou locutrice ; 1er h : premier homme ou locuteur.

Un trou avec -- indique qu'ici une visualisation d'un son n'a pas été saisissable avec certains locuteurs.

1re f : [a,e,i,o,u,] +r

1re f : [d, t -,g, k -,b,p,l,m,v] +r

1re f : [ba]+r [be]+r [bi] +r [bo]+ r [bu] +r

1er h : [ba,be,bi,bo,bu] +r (ces cinq voyelles à la suite sur une seule expiration).

6.1.2. Essais n° 2 : Reproductibilité - Les syllabes CV [da,de,di,do,du] (avril 2002)

Avec plusieurs locuteurs : deux femmes et trois hommes.

Il faut énormément de patience pour réussir à bien visualiser dans la nappe de laser ultra fine (micron) ces formes dynamiques très rapides et de nombreux essais sont nécessaires.

1re f : [da]+r 2e f : [da]+r 1er h:[da]+r 2e h:[da]+r 3e h:[da]+r

1re f : [de]+r 2e f : [de]+r 1er h:[de]+r 2e h:[de]+r 3e h:[de]+r

1re f : [di]+r 2e f : [di]+r 1er h:[di]+r 2e h:[di]+r 3e h:[di]+r

1re f : [do]+r 2e f : [do]+r 1er h:[do]+r 2e h:[do]+r 3e h:[do]+r

1re f : [du]+r 2e f : -- 1er h:[du]+r 2e h: [du]+r 3e h: [du]+r

6.1.3. Essais n° 2 : Reproductibilité- Les syllabes CV [na,ne,ni,no,nu]

avec plusieurs locuteurs : deux femmes et trois hommes

1re f :[na]+r 2e f:[na]+r 1er h:[na]+r 2e h:[na]+r 3e h:[na]+r

1re f :[ne]+r 2e f:[ne]+r 1er h:[ne]+r 2e h:[ne]+r 3e h :[ne]+r, [ne]+r

1re f : -- 2e f :[ni]+r 1er h:[ni]+r 2e h:[ni]+r 3e h:[ni]+r

1re f :[no]+r 2e f:[no]+r 1er h:[no]+r 2e h:[no]+r 3e h:[no]+r

1re f : -- 2e f:[nu]+r 1er h:[nu]+r 2e h:[nu]+r 3e h:[nu]+r

6.1.3.1. [an]

Et pour comparer nous avons fait un essai avec la syllabe [an], visualisation qui a été fort utile, comme on peut le voir dans la 3^e partie du DVD.

1re f : [an]

6.1.3.2 Essais n° 3 : Reproductibilité - Les syllabes C₁V C₂ [bak, bək,bik,bOk,buk]

Avec plusieurs locuteurs féminins et masculins

1re f :[bak]+r 2e f :[bak]+r 1er h:[bak]+r 2e :[bak]+r 3e h:[bak]+r

1re f :[bək]+r 2e f :[bək]+r 1er h:[bək]+r 2e h :[bək]+r 3e h :[bək]+r

1re f :[bik]+r 2e f :[bik]+r 1er h:[bik]+r 2e h :[bik]+r 3e h :[bik]+r

1re f :[bOk]+r 2e f :[bOk]+r 1er h :[bOk]+r 2e h :[bOk]+r 3e h :[bOk]+r

1re f :[buk]+r 2e f :[buk]+r 1er h :[buk]+r 2e h :[buk]+r 3e h :[buk]+r

6.1.4. Essais n° 4 : Reproductibilité- Mots de deux syllabes C₁V₁C₂V₂ [bato] et [pato]

Avec plusieurs locuteurs féminins et masculins

1re f:[bato]+r 2e f:[bato]+r 1er h:[bato]+r 2e h:[bato]+r 3e h:[bato]+r

1re f:[pato]+r 2e f:[pato]+r 1er h:[pato]+r 2e h:[pato]+r 3e h:[pato]+r

6.2 Deuxième film : Reproductibilité et étude dans les trois axes : profil, face, dessous

Avec une locutrice (mai 2002)

Séries de 5 syllabes prononcées par la même locutrice.

Nous avons pris les consonnes sonores [b,d,g] pour observer les effets de coarticulation sur les morphodynamiques avec les cinq syllabes cardinales [a,e,i,o,u].

Chaque syllabe est visualisée de la manière suivante :

- séquence film : *son et image* en temps réel
- séquence film : *sans le son, au ralenti* en avant
- séquence film : sans le son et *à rebours*, ici dénommé: *retro*.

Chaque syllabe apparaît donc trois fois, selon les trois axes : **de profil, de face, de dessous**.

[ba]+r+retro, [be]+r+retro, [bi]+r+retro, [bo]+r+retro, [bu]+r+retro

[da] [de] [di] [do] [du]

[ga] +r+retro [ge]+r+retro [gi]+r+retro [go]+r+retro [gu]+r+retro

[la] +r [le] +r [li,li,li] [li]+r [lo]+r [lu]+r

Selon les trois axes: **de profil, de face, de dessous** :

[la] +r [le] +r [lF] et une répétition : [li,li,li] [li]+r [lo]+r [lu]+r

6.3. Prises de vue au LIMSI

6.3.1. Premières prises de vue (avril 2002)

Remarque : Nous avons fait auparavant quelques essais de faisabilité, sans locuteurs externes, en novembre 2001

1er laser, sans le son, archivé sur CD-ROM

Une locutrice

Voyelles isolées :

[a], [e], [ɛ] vue d'en bas, [e] coupe transversale, [i].

Syllabes CV :

[da], -, [dat], [det], [dit], [dot]

[l], [la], [le]

[va], -, [vi], [vo], [vu]

[na], [ne], [ni], [no], [nu]

Bisyllabes C₁V₁C₂V₂ :

[bato], [pato], [gato].

6.3.2. Deuxièmes prises de vue (avril 2003)

[ba,da,ga] et [guga] avec un locuteur. Séance de mises au point en vue de la prochaine étape décisive.

6.4. Troisième prises de vue au LIMSI avec son: les syllabes CVC

[bak,bèk,bik,bOk,buk](octobre 2003)

Une locutrice et un locuteur.

Laser, caméra 100 images/ s, avec le son synchronisé.

Les prises de vue ont été réalisées par M.Arnaud Susset, directeur de R+D VISION, Paris, qui est venu au LIMSI avec son matériel, loué pour notre propos :

Chaque série est constituée de 4 syllabes sur une expiration ensemencée, ce qui correspond à 3000 images de format « tif » à recalculer et à traiter par série !

Une locutrice :

[bak] trois séries

[bak] prononcée de manière intentionnellement très courte.

[ba-k] prononcée en séparant de manière exagérée la consonne finale.

[ba:k] prononcée en exagérant la longueur de la voyelle [a].

[bèk] quatre séries

[bik] deux séries

[bOk] trois séries

[buk] trois séries

Un locuteur :

[bak] trois séries

[bèk] quatre séries

[bik] trois séries

[bOk] trois séries

[buk] trois séries

C'est sur la base de ces dernières visualisations que nous avons pu mettre en évidence sur les syllabes [bak] et [bèk] les corrélations entre les structures aérodynamiques, les morphodynamiques des sons, et leurs structures acoustiques.

Focalisation sur les deux syllabes [bak] et [bèk]

On trouve dans ces consonnes CVC plusieurs phénomènes phonétiques riches et pertinents autour du noyau vocalique, comme le VOT et la tenue articulaire. De plus l'explosion de la consonne labiale initiale [b] *se montre immédiatement à la sortie des lèvres*, chose pertinente pour l'aspect aérodynamique immédiat, et la consonne finale [k] présente une grande variabilité coarticulaire. D'après nous ces deux aspects devaient apparaître très clairement dans les structures aérodynamiques de ces syllabes.

Madame Gabrielle Konopczynski, notre professeur de l'époque, nous conseilla aussi de prendre ces syllabes et de focaliser notre travail sur deux seules syllabes en suggérant que ce serait déjà un énorme travail, remarque que nous avons pu comprendre entre-temps.

7. Analyses morphodynamiques

7.1. Analyses morphodynamiques des films à 25 images/s

Sur une barre de montage (Adobe première 6.5) nous avons procédé à une analyse minutieuse du développement de ces morphodynamiques sur les milliers d'images obtenues, toujours en rapport avec le signal acoustique de la bande-son de notre barre de montage. La possibilité de dérouler les formes aériennes de la bouche puis de les « rembobiner » a été fort utile et pratique pour déterminer leur segmentation naturelle.

Nous avons toujours la bande audio sous la bande vidéo ce qui permettait de suivre les phases acoustiques et signaler de la parole en parallèle avec l'apparition des structures morphodynamiques.

Nous nous sommes concentrés alors sur ce développement, ce découpage des structures morphodynamiques aériennes. Nous avons commencé à les mettre en évidence par une analyse des transitions que nous avons mises en relief avec des lignes en pointillé de différentes couleurs correspondant aux différents événements phonétiques. (On les retrouve dans nos tableaux et nos analyses descriptives dans le DVD.) Pour cela nous avons travaillé image par image avec le logiciel Photoshop.

Si l'analyse descriptive morphodynamique demandait de la patience mais était en soi relativement simple, la synchronisation avec la bande son était par contre extrêmement difficile à réaliser. Il y avait des sautes d'images dues à l'échelle des 25 images secondes. C'est-à-dire qu'il manquait des phases intermédiaires au niveau visualisation comparé à la forme sonore enregistrée, justement dans les transitions acoustiques qui nous intéressaient et pour lesquelles une caméra plus rapide aurait donné ces éléments. Cette mise en évidence de ces transitions nous était nécessaire si nous voulions montrer de manière pertinente des corrélations entre le développement de la morphodynamique d'un son, d'une syllabe avec sa structure temporelle acoustique.

Pour le découpage du son de nos syllabes et l'analyse oscillographique qui nous intéressait (et spectrographique comme contrôle de la qualité de la production sonore) nous avons utilisé le logiciel d'analyse phonétique PRAAT.

Néanmoins des découvertes fort intéressantes sont apparues : nous avons mentionné dans nos objectifs de nous laisser surprendre par ce genre de « découvertes ».

Par exemple la constatation toujours plus évidente de la reproductibilité du phénomène de la coarticulation :

- Dans les syllabes CV, le [b] initial varie en fonction des voyelles qui le suivent.
- Dans les syllabes C₁VC₂ [bak,bèk,bik,bOk,buk] où les directions et les structures morphodynamiques de la consonne finale [k] sont apparues sur les films de manière extrêmement surprenante et très caractéristique. Cette consonne occlusive vélaire sourde [k] est bien connue en phonétique pour son comportement très sensible à la coarticulation. On le *voit* dans les morphodynamiques de manière renforcée.

7.2. Analyses morphodynamiques et acoustiques des films au laser, 100 images/s

Pour les visualisations au laser, 100 images/s, un long travail de recalculon a été nécessaire pour acquérir les images sur la bande de montage puis les mettre en synchronisation avec le son de la bande d'enregistrement qu'il fallait recalculer pour cela.

Avec le logiciel d'analyse phonétique PRAAT, nous avons aussi découpé le son de toutes les syllabes en cellules de 1/100 de seconde, chaque cellule-son correspondant alors à une séquence filmée au laser bien précise et numérotée dans notre décompte. A partir de cette base les syllabes reconstituées étaient analysables. Les transitions morphodynamiques que nous cherchions à mettre en évidence pouvaient enfin être saisies et mises en relation avec les séquences des événements acoustiques qui leur correspondent.

C'est l'objet de notre travail présenté sur DVD et sur CD-ROM dans le chapitre suivant.

Chapitre VI

Analyses descriptives : morphodynamique et acoustique

« (...) il y a une cohérence intrinsèque parmi les choses que nous percevons et sur lesquelles nous pensons, et que cette cohérence n'est pas créée par nous, mais découverte par nous. »

Condon, W.S. (1976)

Table du sixième chapitre

1. Analyses descriptives des morphodynamiques des sons et syllabes sur le support cinématographique du DVD	195
1.1. Visualisations 25 images/s et analyse descriptive des morphodynamiques	195
1.2. Visualisations 100 images/s de la syllabe [bək] à l'aide d'une nappe de laser (ou tomoscopie)	195
2. Analyses descriptives : morphodynamique et acoustique de cinq syllabes [bak] et [bək] avec deux locuteurs	196
3. Description et analyse morphodynamique et acoustique	198
3.1 1 ^e syllabe [bək] (# 3 2 ^e lor) par une locutrice	198
3.2 : Les quatre autres analyses des syllabes [bak] et [bək] : voir sur le CD-ROM	228
4. Bilan de l'analyse des deux syllabes [bak] et [bək] :	228
5. Remarque du spécialiste en aéroacoustique sur nos syllabes C1VC2 [bak] et [bək], 100 images/s	230
6. Essai de vélocimétrie par images de particule (PIV) et l'analyse de la syllabe [bak]	231
7. DVD - 5 ^e partie : Turbulences et phonétique (7 min)	2355
7.1. Remarque sur la voyelle [e] : ses structures morphodynamiques intrinsèques	235
7.2. Reconstitutions de la langue en 3D des voyelles [a, è, e] : leur impact sur les écoulements phonatoires	237
7.3. Un précurseur d'une phénoménologie aérodynamique du langage : Wolfgang von Kempelen.	240

Remarque : comme rappel aux lecteurs

Contenu du DVD : (qu'on retrouve dans le menu)

2^e partie : Analyses morphodynamiques -A (17 min)

3^e partie : Analyses morphodynamiques - B (21 min)

4^e partie : Morphodynamique et acoustique (40 min)

5^e partie : Turbulences et phonétique (7 min)

Tout au long de ce DVD on trouvera pour comparer des prises de vues de la pionnière Zinke datant des années 1965 à 1980.

1. Analyses descriptives des morphodynamiques des sons et syllabes sur le support cinématographique du DVD

1.1. Visualisations 25 images/s et analyse descriptive des morphodynamiques

- **DVD - 2^e partie** : Analyses morphodynamiques -A (17 min.) (25 images/ s - fumée d'eucalyptus)

Les cinq voyelles isolées : [a, e, i, o, u]

La coarticulation : syllabes CV : [ba, be, bi, bo, bu]

- **DVD - 3^e partie** : Analyses morphodynamiques - B (21 min.) (25 images/ s - fumée d'eucalyptus)

Quelques consonnes isolées : [d, t, g, k, v, l, m]

La coarticulation :

Syllabes CV : [an, na, ne, no]

Syllabes C₁VC₂ : [bak, bèk, bik, bOk, buk]

1.2. Visualisations 100 images/s de la syllabe [bèk] à l'aide d'une nappe de laser (ou tomoscopie)

- **DVD - 4^e partie** : Morphodynamique et acoustique (40 min)

Analyse descriptive et segmentation au 1/100 s

d'une syllabe [bèk] (#3-2e lor)* prononcée par une locutrice.

- Différentes approches pour mettre en valeur nos visualisations et la reproductibilité du phénomène sont présentées dans cette séquence de 40 minutes

2. Analyses descriptives : morphodynamique et acoustique de cinq syllabes [bak] et [bèk] avec deux locuteurs

(Nappe de laser -ou tomoscopie - et à 100 images/s)

- Sur le DVD, le CD-ROM et sur cette version imprimée au paragraphe suivant:

[bèk] (#3 2e lor)* : 1re locutrice

- **Sur le CD-ROM seulement** sont ajoutées :

les quatre autres syllabes - [bak] et [bèk] avec deux locuteurs *et leurs analyses descriptives morphodynamique et acoustique image par image*, avec en archive *les cellules son* (la syllabe entière) *et les images* (au centième de seconde) de chaque syllabe, se trouvent dans la version en CD-ROM de notre thèse qui est alors complète. Ce sont des centaines d'images qui dépassent le cadre classique d'une thèse sur papier mais ne posent aucune difficulté sur support numérique. On peut facilement les visualiser avec le logiciel gratuit Irfanview.

2^e [bèk] (# 3 3e lor)*: 1re locutrice

3^e [bèk] (#4 1er hom)*: 1er locuteur

4^e [bak] (#3 4e lor)*: 1re locutrice

5^e [bak] (# 1 2e hom)*: 1er locuteur

*Pour ces cinq dossiers d'analyse de nos visualisations de ces deux syllabes nous utilisons une **numérotation des images indépendantes** de celle des images et schéma qui accompagnent

autrement cette thèse. Les indications qui sont en italique et entre parenthèses correspondent à celles de notre fichier. On les retrouve aussi en haut des cadres des oscillogrammes.

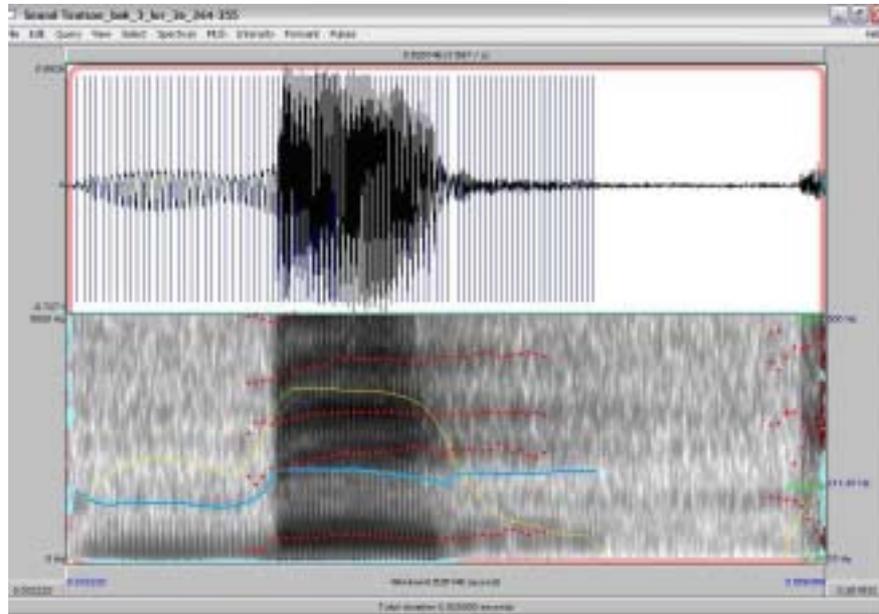
Remarque pour les pages qui suivent de ce chapitre 6 :

Vu l'immense quantité de clichés provenant de nos propres visualisations nous n'avons pas indiqué sous chaque image : *Figure n°* du fait que nous utilisons notre propre décompte dans ces analyses descriptives.

3. Description et analyse morphodynamique et acoustique

3.1 1^e syllabe [bèk] (# 3 2^e lor) par une locutrice

Remarque : Cette analyse est celle que le lecteur aura suivie sur le DVD (4^e partie, 40 min).



Syllabe [bèk] (# 3 2^e lor)

Système d'analyse phonétique PRAAT

Image 283 :



Image 284 :



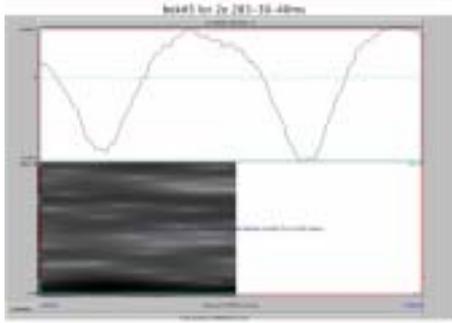


Image 283 : ondulation du tracé oscillographique de la barre de voisement du [b]

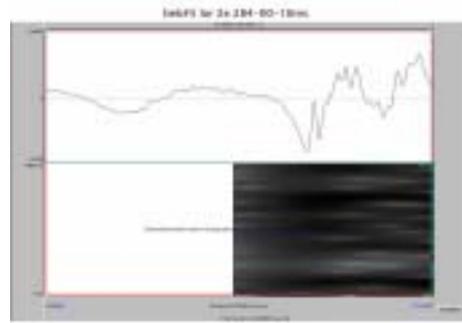


image 284 : tracé de la barre d'explosion du [b] initial

Le jet tourbillonnaire apparaît à la sortie des lèvres en parfaite synchronie avec le son

Le jet tourbillonnaire -extrêmement rapide- présente après 10 ms, image 285, une articulation de ses structures turbulentes intrinsèques que l'on peut décrire comme tripartite :

Image 285 :



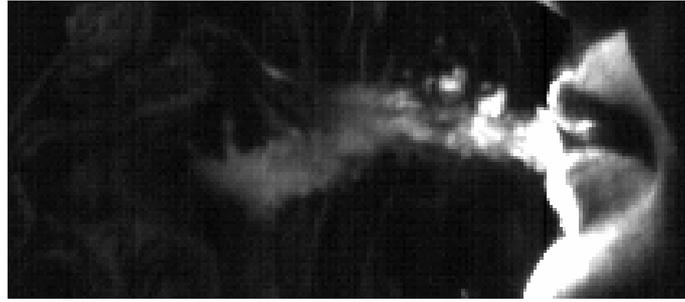


Image 285 : détail

Même image 285 : détails de cette segmentation aérodynamique naturelle mise en évidence.

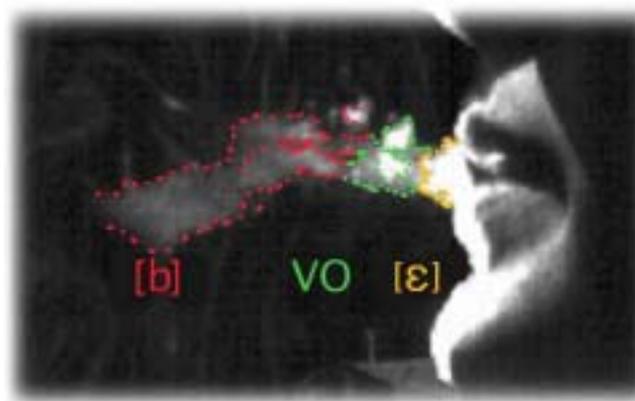
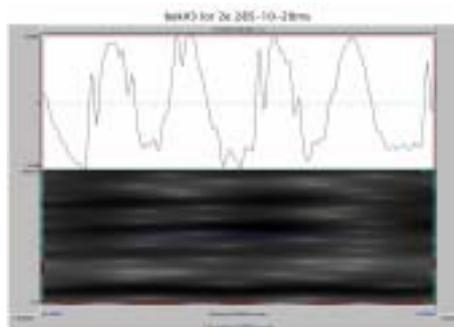


Image 285 : détail de la segmentation tripartite

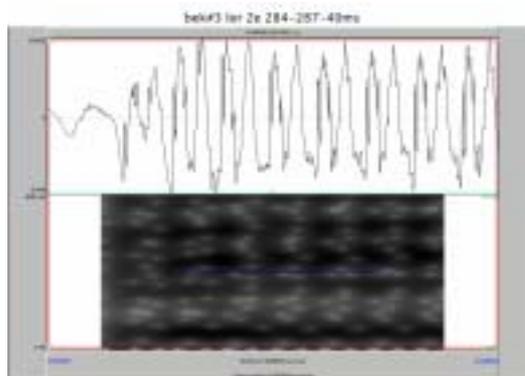
La partie la plus en avant sur la gauche (en rouge) se détache ; une partie **intermédiaire** plus petite et lumineuse s'est formée (en vert) ; une troisième structure apparaît à la sortie de l'orifice buccal (en jaune orangé).

Sur le plan acoustique nous avons:



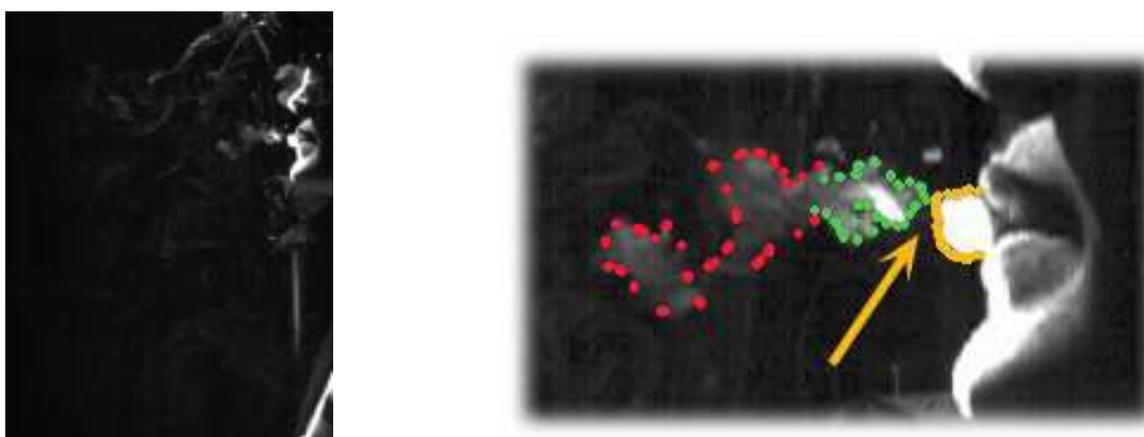
285

Les oscillations régulières -quasi périodiques- et caractéristiques de la voyelle [ε] *ne sont pas encore apparues*. Nous avons ici le VO (Voice Onset), l'établissement de vibration des cordes vocales pour la voyelle ou une transition initiale qui correspond à l'événement du VO :



Les 40 ms où cette transition vocalique, VO, est détectable.

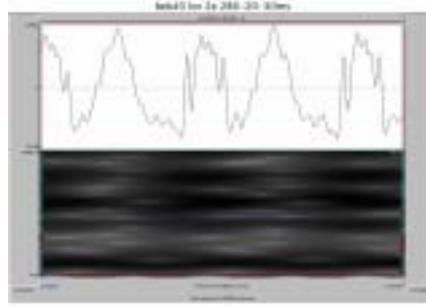
Image 286 :



L'articulation structurelle tripartite que nous devinions sur l'image 285 est ici évidente. (On peut zoomer à 500% sur l'ordinateur). Il y a une *séparation nette* dans la morphodynamique de cette chaîne tourbillonnaire.

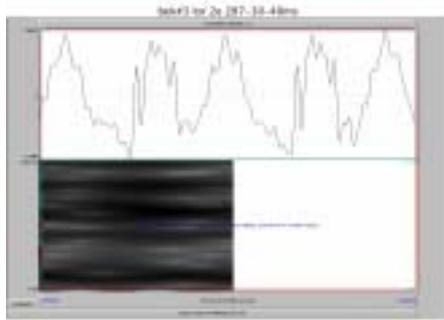
La forme à bordure arrondie et de forte densité aérienne -puisque très lumineuse- qui sort de manière relativement symétrique de l'orifice buccal ressemble à la forme arrondie que l'on connaît de la voyelle [a]. Voici le court instant acoustique auquel elle correspond :

286



En la comparant avec les deux oscillogrammes suivants nous voyons que l'acoustique et la morphodynamique saisies sur l'image 286 font encore partie du *court laps de temps* du VO (Voice Onset), de la transition initiale de la voyelle, de sa mise en place :

287



288

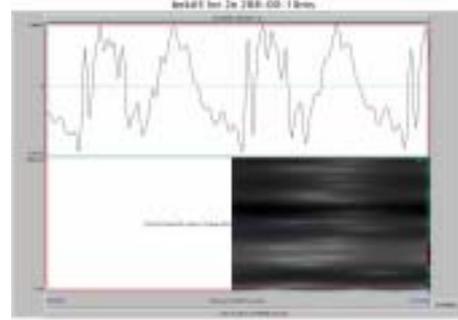


Image 287 :



Le premier jet tourbillonnaire sur la gauche qui correspond à l'émission de la voyelle [b] se

détache et disparaît en vortex. La petite zone intermédiaire garde encore un peu sa structure plus dense et après cette entaille, cette zone de séparation, la morphodynamique de grande densité lumineuse continue à se développer à la sortie de la bouche.

Mais si nous agrandissons cette prise de vue de 200 à 500 % sur l'écran de l'ordinateur nous pouvons y voir des détails subtils. Cette entaille, cette zone de séparation est en fait **une transition aérodynamique** qui semble rendre compte du changement de régime d'écoulement aérien au travers de la glotte. C'est le passage du VO à la voyelle pleine. Ce pourrait être aussi l'empreinte de la détente de la compression de l'air après l'ouverture soudaine des lèvres pour [b] et le passage à la voyelle [a] ou l'air est soudainement ralenti. (On passe d'un jet puissant à une sorte d'écoulement.)



Image 287

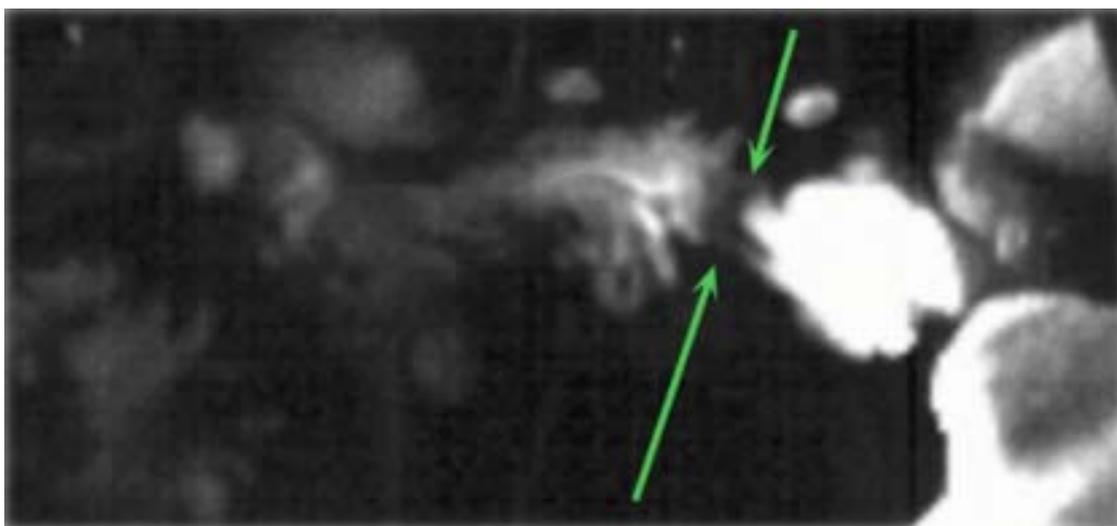


Image 287 : détail agrandi, transition aérodynamique.

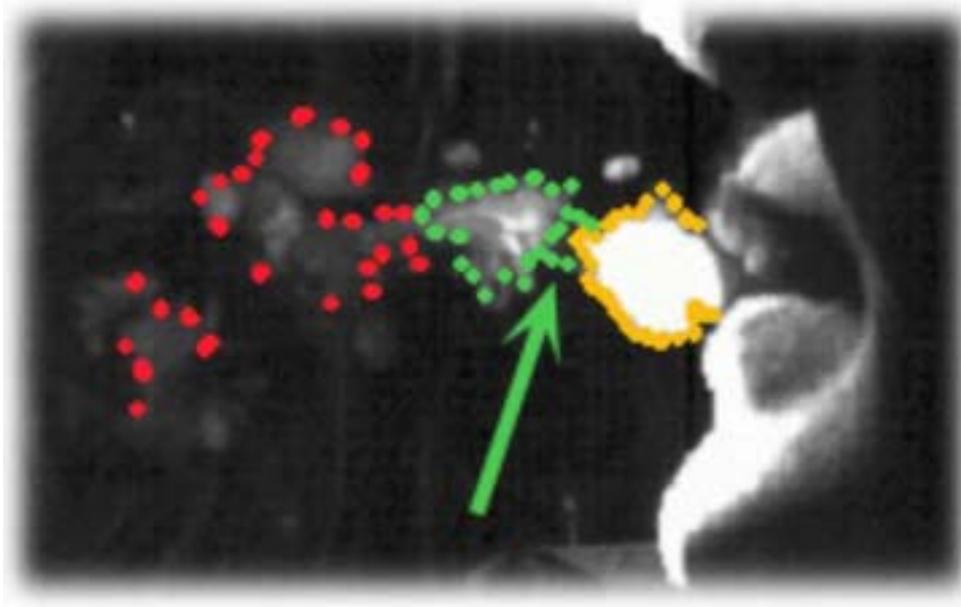
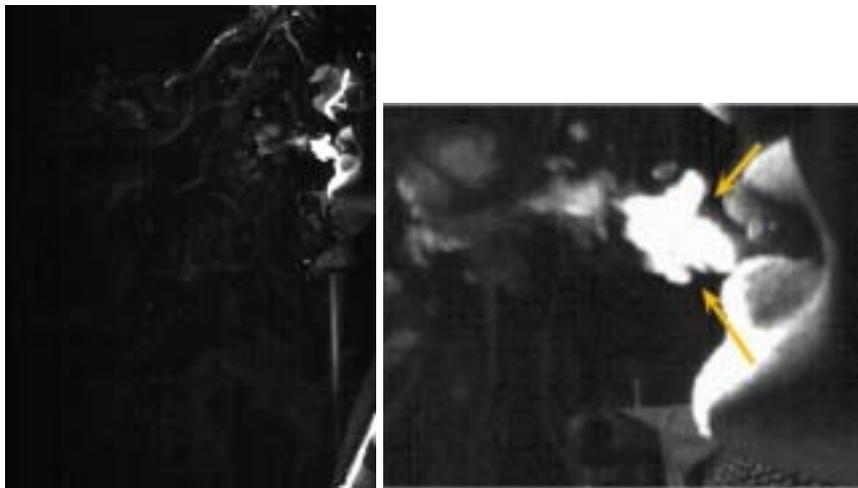


Image 287 : détails de cette segmentation morphodynamique

Image 288 :



Les structures turbulentes continuent d'évoluer de manière séparée et la morphodynamique qui se développe à la sortie de l'orifice buccal (image 288) présente encore un peu les caractères de la voyelle [a].

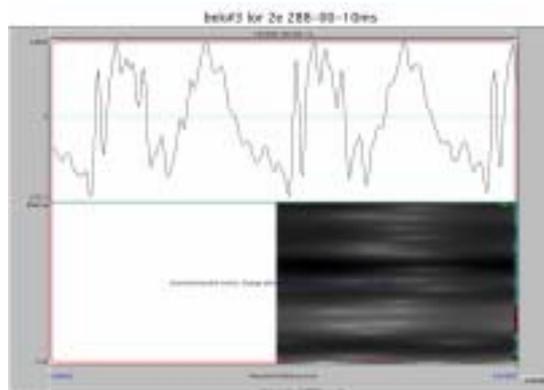
Mais *les deux entailles* que nous avons mises en relief avec des lignes jaunes orangées montrent que le *courant central* du jet tourbillonnaire est *plus rapide* et se heurte à l'air

extérieur. Ceci engendre ces entailles, ces zones d'instabilité qui sont l'amorce de turbulences.

Image 288 : agrandie



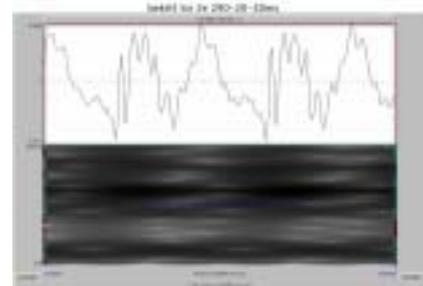
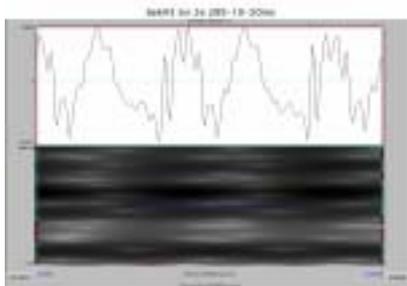
Le tracé oscillographique de cette image 288 permet aussi de reconnaître la formation et l'émission de la voyelle [è] :



289 :



290 :



291 : ci-dessous

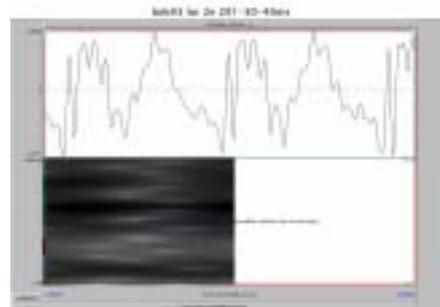
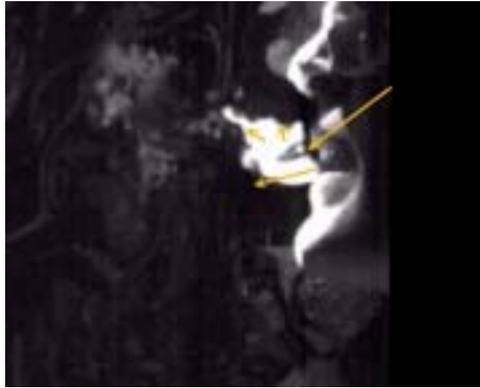


Image 291:



Le jet tourbillonnaire central, plus étroit, sortant de l'orifice buccal (flèches jaunes orangé), s'écoule plus rapidement et continue à s'incruster dans la forme arrondie de départ, forme qui se trouve décalée vers le haut et perd peu à peu ses contours (2 petites flèches).

20ms plus tard (donc **2 images après**) la morphodynamique prend clairement la *direction* et la *forme* que nous connaissons de la voyelle [e] (ceci s'amorçait déjà sur l'image d'avant : 293)



Image 294 :

Images 293 à 296 : développement de l'émission de la voyelle [e]

Image 293 :



Image 294 :

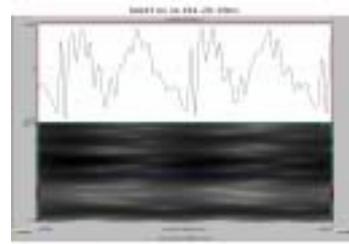
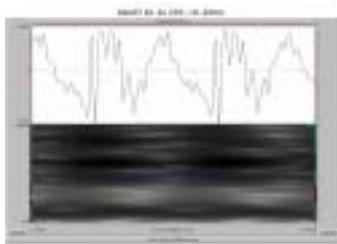


Image 295 :



Image 296 :

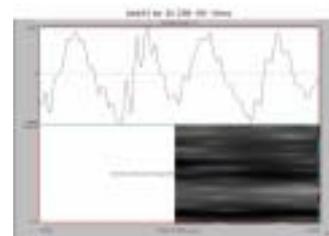
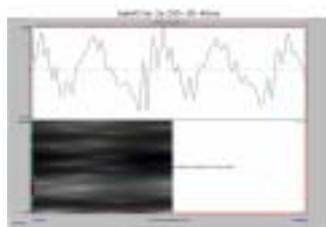


Image 297 :

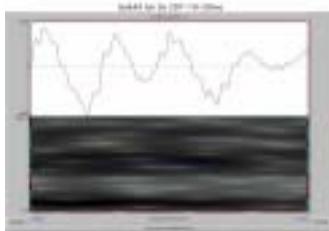
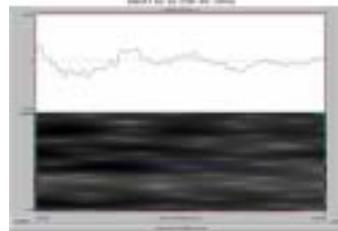
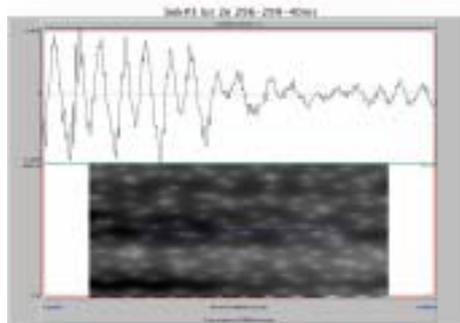


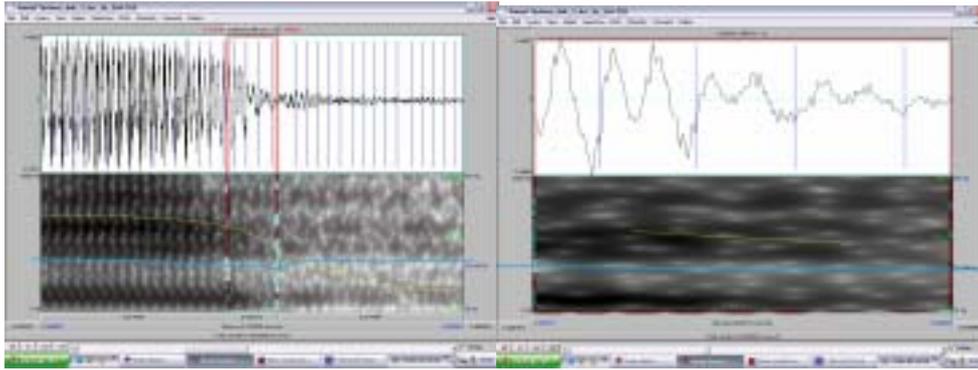
Image 298 :



L'oscillogramme présenté à une autre échelle pour mieux situer ce passage du VT :

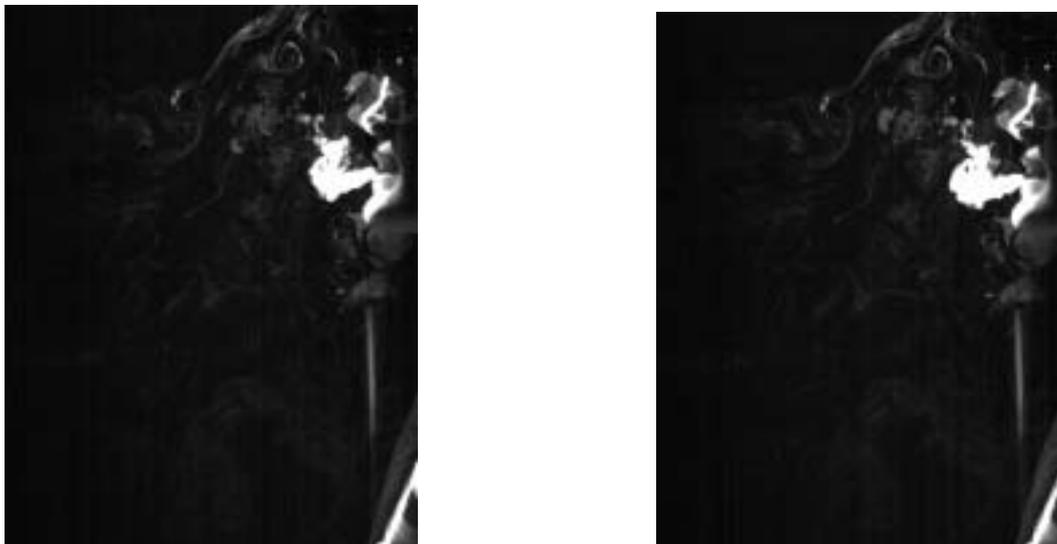


40ms 296 à 299



Une autre échelle pour bien se resituer sur l'oscillogramme : le VT est mis en évidence (rose)

Encore une fois la morphodynamique de ces deux séquences 297 et 298 :



On voit se former de *légères ondulations sur la bordure extérieure inférieure du jet tourbillonnaire*. (Voir les agrandissements sur le DVD, mais on peut aussi zoomer cette page à 200 ou 500 %). Elles sont le signe *d'une zone d'instabilité* due au fait que le jet n'est plus alimenté par le courant laryngé, les cordes vocales s'étant arrêtées ou s'arrêtant d'osciller. L'air extérieur prend le dessus. La forme reste quasiment sur place.

Images 299 :

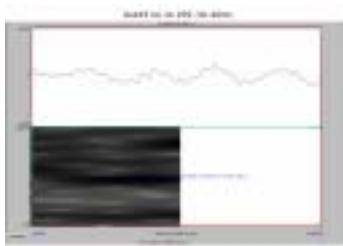
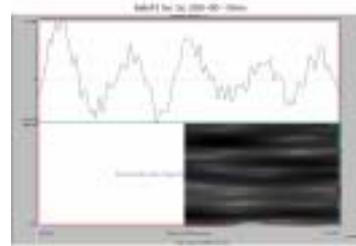


image 300 :



C'est la fin du VT. La morphodynamique de la voyelle [è] *se déplace (lentement) sur sa lancée mais en même temps continue à se déstabiliser* : ses bordures se défont peu à peu, turbulences et vorticités apparaissent de plus en plus complexes.

Image 301 :

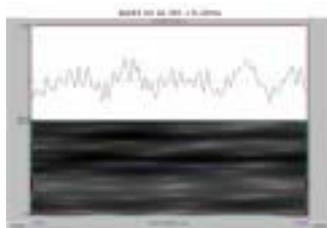
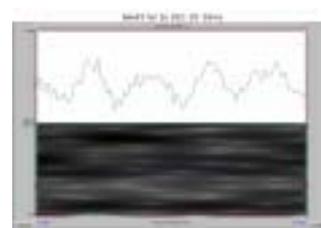
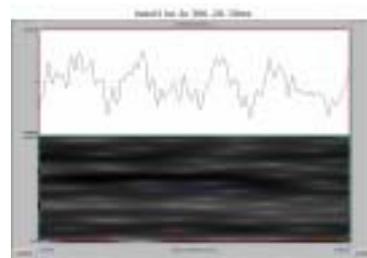
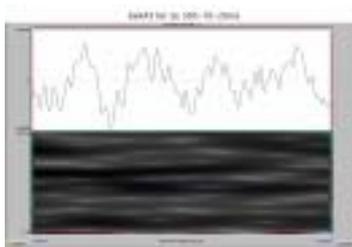
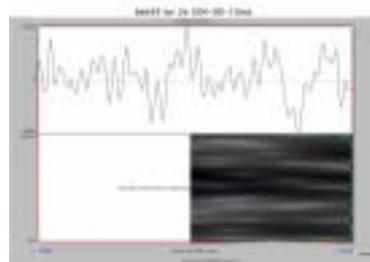
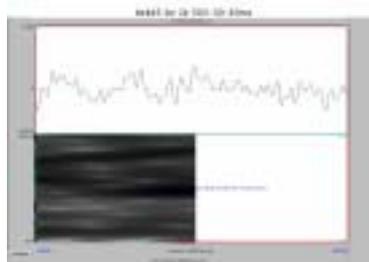
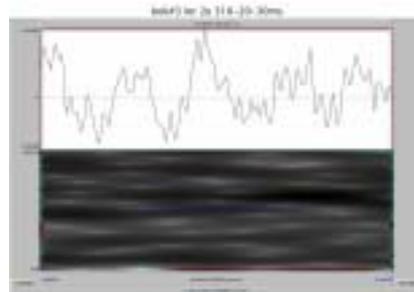
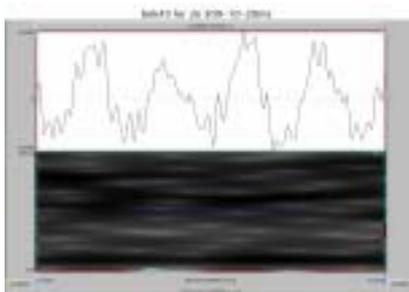
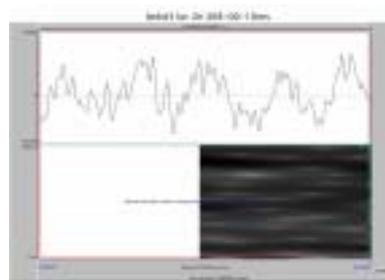
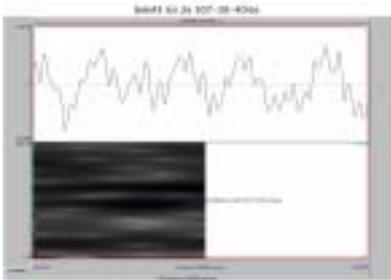


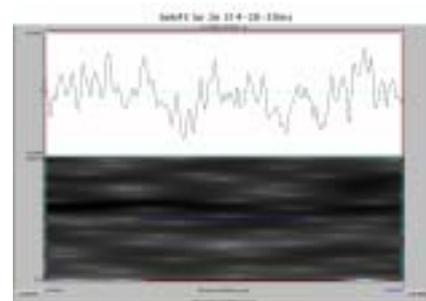
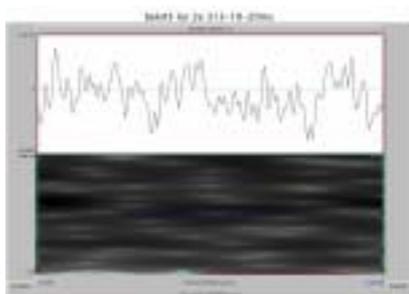
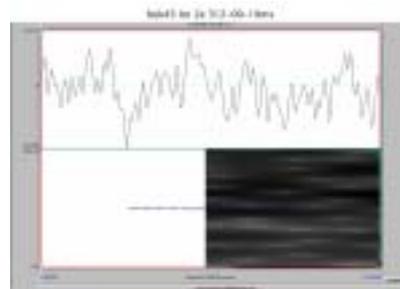
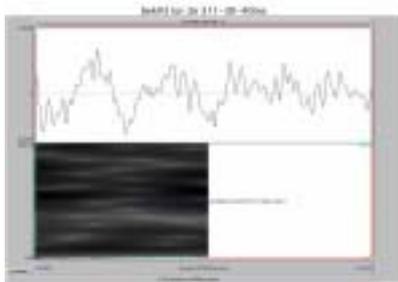
image 302 :

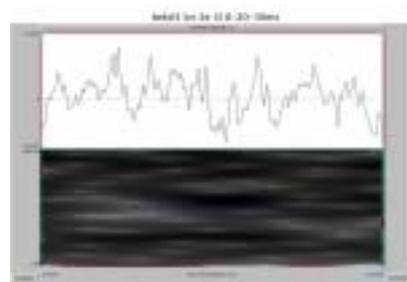
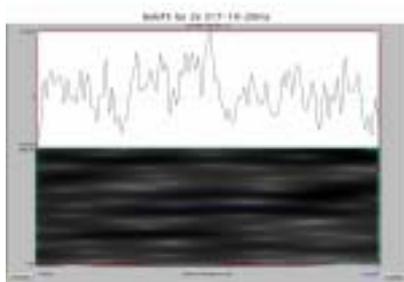
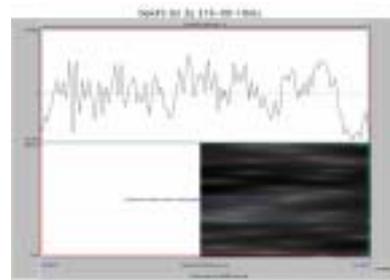
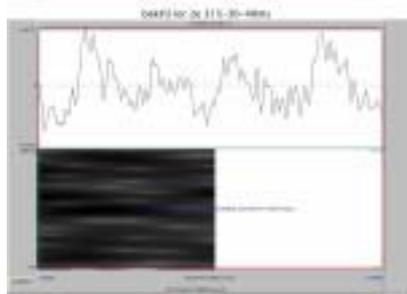


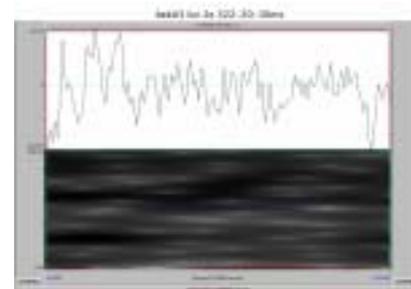
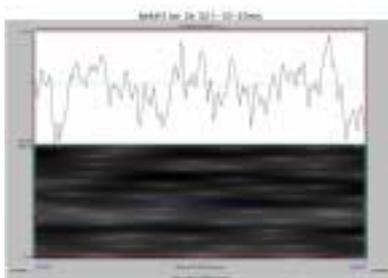
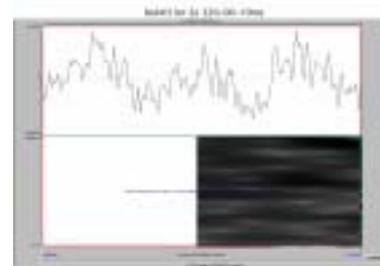
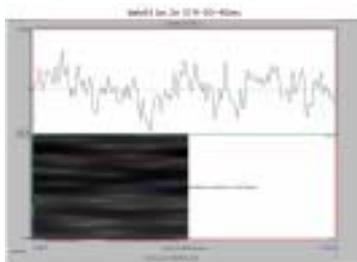
Nous suivons le développement de la morphodynamique de la voyelle, des images 303 à 326.

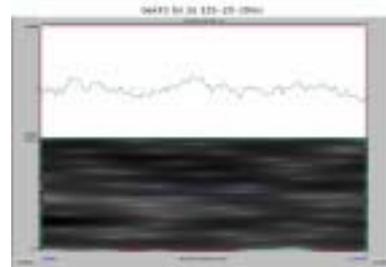
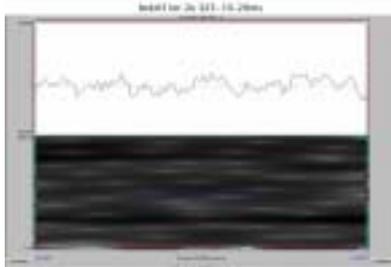
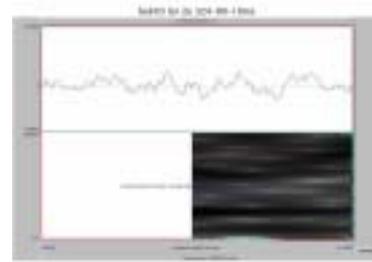
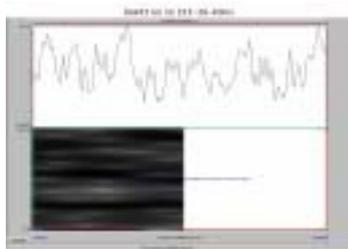










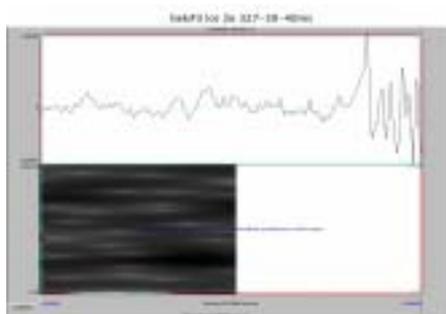


326 :

Cette phase - des images 303 à 326 - qui est comme un « **trou aérodynamique** », où la morphodynamique de la voyelle [è] se défait par ce qu'elle n'est plus alimentée par un courant phonatoire glottal-pharyngé, correspond exactement à **une phase de silence acoustique***. C'est la **tenue articuloire**, l'occlusion complète du conduit vocal. La langue est déjà mise en position vélaire d'occlusion pour la consonne *sourde* finale [k]. Les cordes vocales sont stoppées.

(*L'oscillogramme montre une bande irrégulière (des images 303 à 326) que nous avons signalée comme étant un bruit de fond dans la salle du laboratoire, mais le phonéticien averti sera reconnaître cette phase comme non phonique.)

Image 327 :



La barre d'explosion du [k] final apparaît sur le plan acoustique,

mais sur le plan morphodynamique nous avons au même instant :

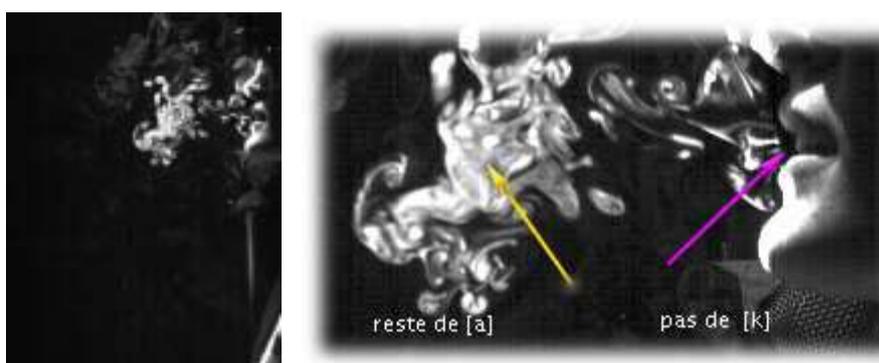


Image 327 :

Encore absence du jet tourbillonnaire de [k]

10 ms après image 328 :

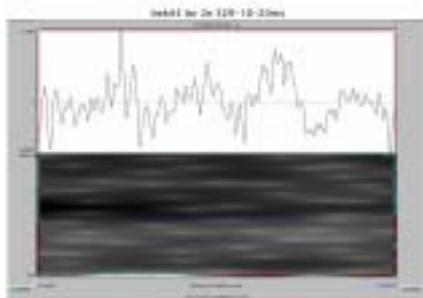


Là encore le jet tourbillonnaire de la consonne finale [k] n'est pas visible. Sur deux séquences de 10 ms, soit 20 ms, le jet tourbillonnaire correspondant à la barre d'explosion du [k] final **n'apparaît donc pas encore**. Dans d'autres syllabes [bak, bèk,] il peut être aussi de 10 ms seulement.

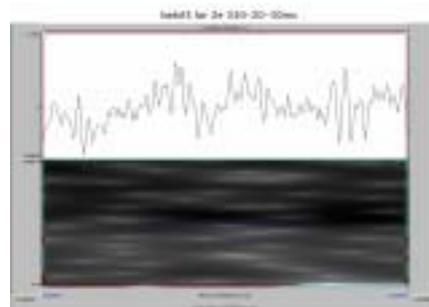
Image 329 :



Image 330 :



329 :



330 :

Image 329 : première trace de ce jet tourbillonnaire.

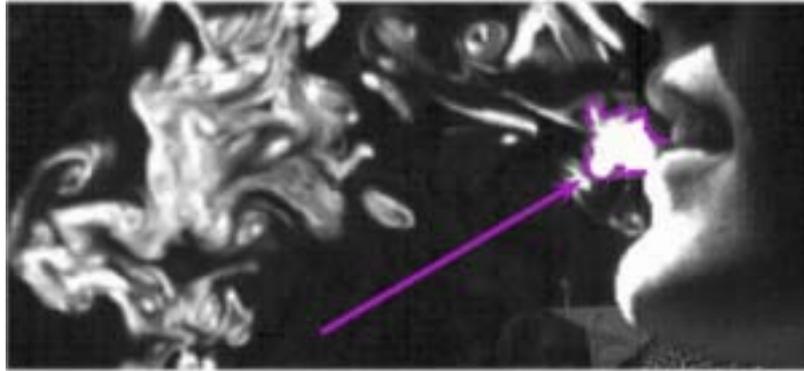
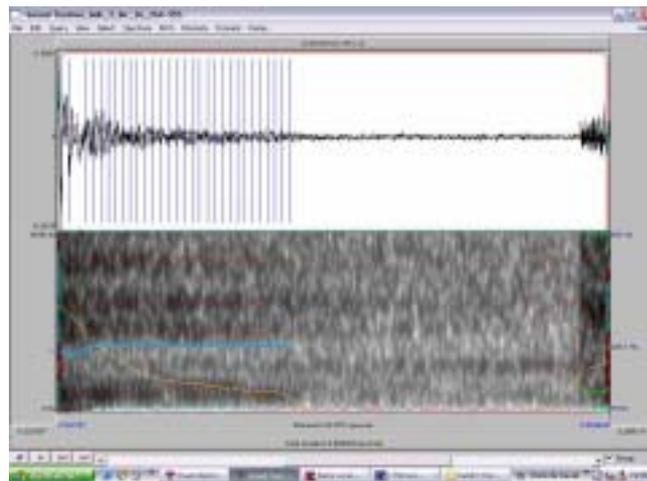


Image 329 : première trace de ce jet tourbillonnaire de [k] (violet)

Comment comprendre ce décalage minime de 20ms.

La tenue a ici une durée de 0,3215072 s soit 0,32 s ce qui correspond à 32 images sur notre film :



C'est seulement sur l'image 329 que nous voyons apparaître le jet tourbillonnaire de l'explosion de la consonne occlusive vélaire [k].

L'arrêt de la vibration des cordes vocales pour la voyelle [è] a été constaté image 298. Donc nous avons bien ici une durée de la tenue de 32 images, soit 0,32s.

Comme nous le montrons dans notre film de DVD avec cette syllabe les 20 ms de décalage entre l'apparition de la trace acoustique de la barre d'explosion du [k] et celle de son jet tourbillonnaire correspondent au temps nécessaire à ce dernier pour arriver de la région palato

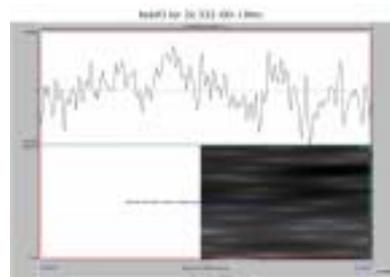
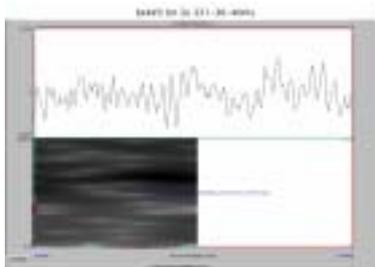
vélaire jusqu'au devant les lèvres. Ce qui correspond à un trajet d'environ 5 à 7 centimètres.

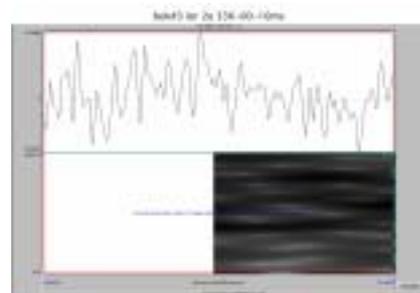
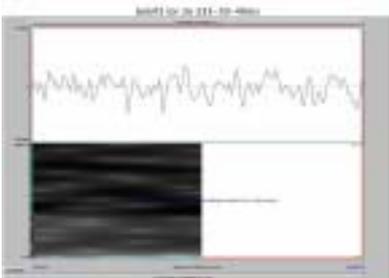
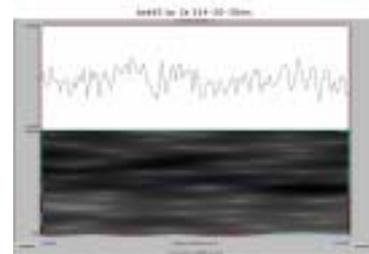
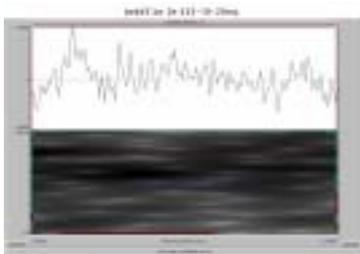
Ceci nous permet de dire que le jet tourbillonnaire de la consonne occlusive vélaire [k] dans le cas de la syllabe étudiée est bien corrélaire, synchrone à la formation de sa structure acoustique.

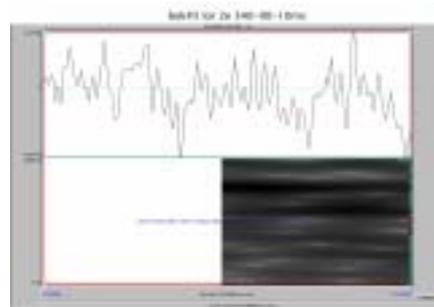
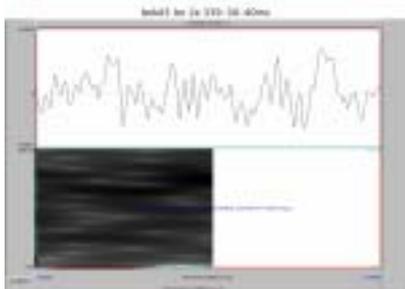
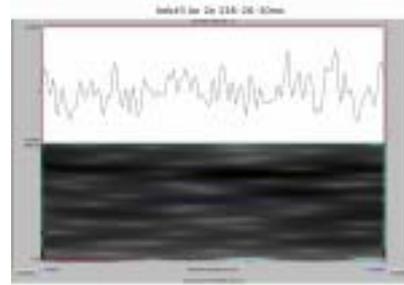
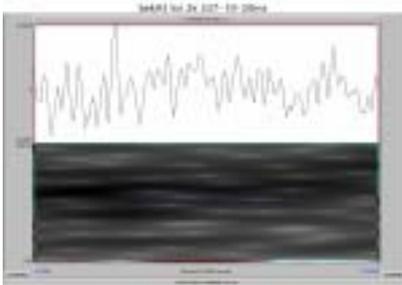
Développement morphodynamique du jet tourbillonnaire de la consonne finale [k].

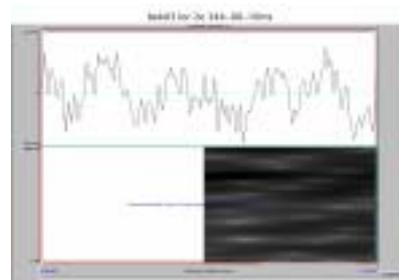
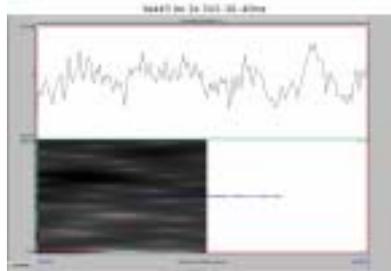
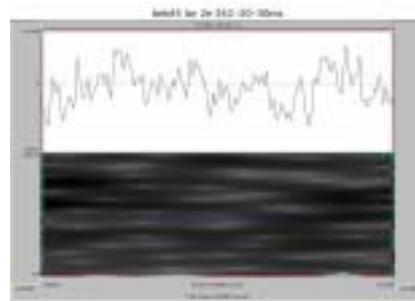
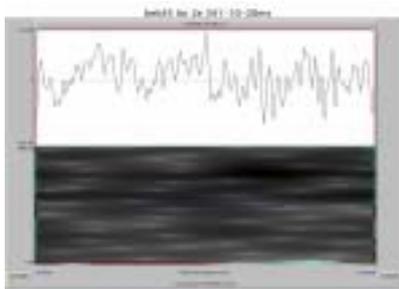
Sans commentaire.

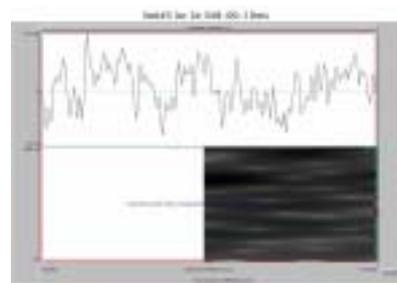
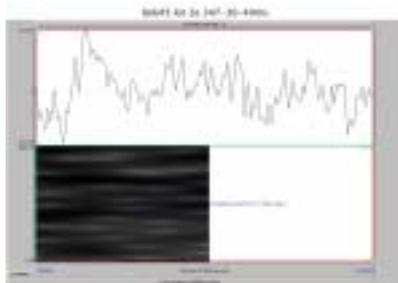
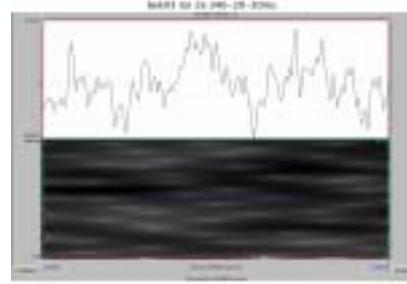
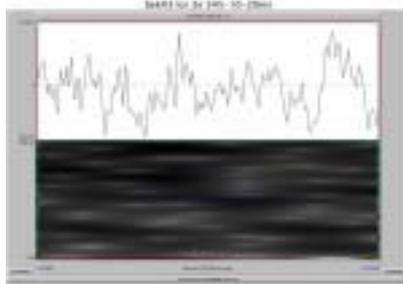
Images 331 et suivantes jusqu'à 354.

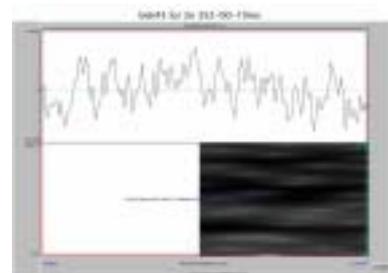
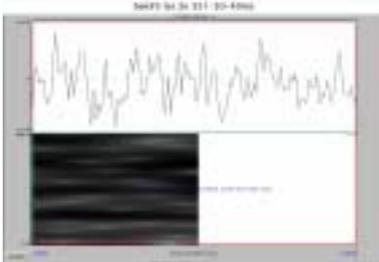
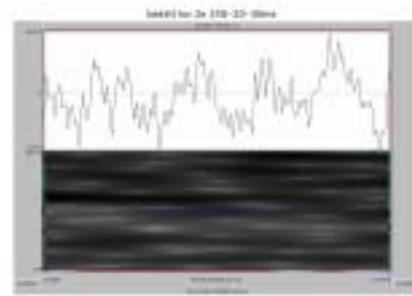
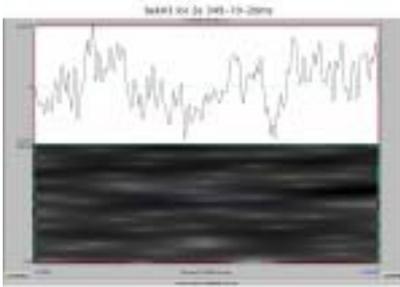


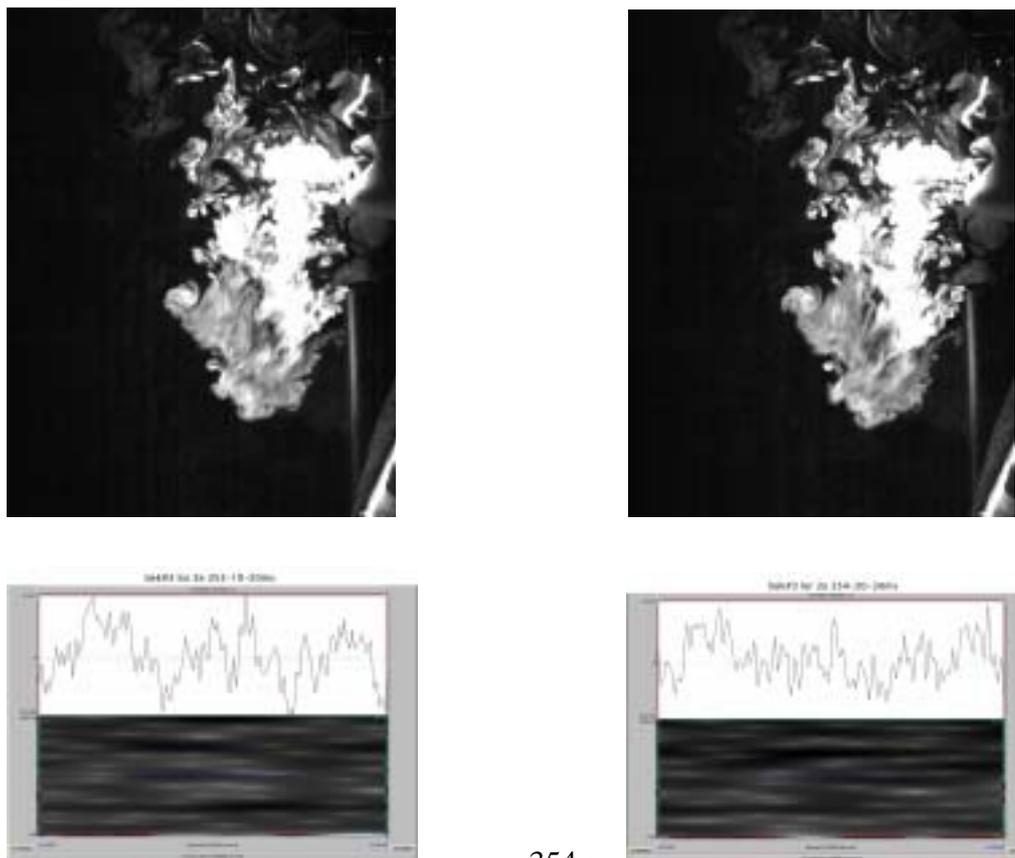












354 :

3.2 : Les quatre autres analyses des syllabes [bak] et [bèk] : voir sur le CD-ROM

4. Bilan de l'analyse des deux syllabes [bak] et [bèk] :

L'utilisation de l'éclairage au laser - à la différence d'un éclairage de cinéaste au tungsten- a rendu possible une visualisation beaucoup plus riche et différenciée des structures tourbillonnaires. Ces structures tourbillonnaires, ces vortex et turbulences, semblent bien constituer le support aérodynamique de la formation des sons.

Dans les syllabes [bak,bèk,bik,bOk, buk] visualisées à 25 images/s et analysées (voir DVD-3^e partie) on pouvait déjà constater une segmentation aérodynamique, morphodynamique naturelle.

Les prises de vue au laser et à 100 images/s ont confirmé ces observations et ont permis de les renforcer et de faire apparaître des détails de transitions très riches.

Le découpage acoustique de la syllabe se retrouve en quasi synchronie avec la segmentation

naturelle de sa morphodynamique. Son articulation est en tout cas corrélaire.

Nous avons pu observer sur toutes les syllabes :

- une fine transition que l'on constate après l'explosion de la consonne occlusive bilabiale sonore initiale [b] et qui apparemment correspond, au niveau temporel et acoustique, à ce que l'on reconnaît comme étant le VO ou la transition initiale de la voyelle.
- Le développement du « noyau vocalique » sur le plan acoustique en correspondance avec le développement de sa morphodynamique.
- un « trou acoustique » qui correspond à *la tenue articulatoire* entre le noyau vocalique [a] et la consonne finale [k] a été aussi constaté de manière très exacte.

A ce stade de notre recherche nous ne serions donner l'explication de l'origine de ce « déploiement », de cette segmentation, de ce « développement aérodynamique » des gestes articulatoires devant la cavité buccale pendant la phonation, mais il me semble bien que toutes les modalités cinétiques, pressionnelles, respiratoires, articulatoires dès la source y soient imprimées, modelées de manière très fidèle et qu'on les « retrouve » à la sortie de la bouche de manière *transformée*.

Rybak l'affirmait puis l'a constaté en strioscopie mais sans en faire la démonstration, c'est-à-dire sans montrer la corrélation entre le développement acoustique et le développement morphodynamique turbulent.

Il se pourrait aussi que les « zones formantiques » aient un impact sur les structures intrinsèques de ses tourbillons, mais aussi que ces processus tourbillonnaires aient eux-mêmes un influence sur la formation des formants, comme le laisse entendre Rybak, en affirmant que les structures cannulaires des circonvolutions de la langue influencent les structures tourbillonnaires au sein de la cavité buccale et par là les qualités et « colorations » acoustiques (Chapitre IV).

5. Remarque du spécialiste en aéroacoustique sur nos syllabes C1VC2 [bak] et [bək], 100 images/s

Remarque : nous redonnons des éléments clés de cet échange de travail sous forme d'un compte-rendu.

La très bonne qualité de nos visualisations au laser nous est confirmée par le spécialiste en aéroacoustique Professeur Michel Roger avec qui nous passons une journée au Centre d'Acoustique de l'Ecole Centrale de Lyon-Ecully pour évaluer nos structures tourbillonnaires des sons du langage et avoir son avis sur ces phénomènes reproductibles.

D'après lui, avec ce mode de visualisation nous arrivons à mettre en évidence des structures aérodynamiques qui pourraient être en accord avec le signal acoustique qui est mesuré.

« À l'échelle de 100 images/s sur laquelle nous travaillons il n'est pas impossible qu'il y ait un effet de l'onde acoustique sur l'écoulement. » (Professeur M.Roger)

M. Roger pense que les structures que nous observons dans ces turbulences phonatoires externes sont une trace de la formation des syllabes à interpréter au sens du transitoire du son, c'est-à-dire de ce qui fait son enveloppe temporelle, et non pas directement la hauteur tonale (ce que l'on aurait avec un son tenu). Si l'on fait le parallèle avec le tourbillon de démarrage d'un objet subitement mis en mouvement dans un fluide (ce qui se passe aux bords d'une cuillère menée dans un bol de liquide, par exemple), il s'agit d'un phénomène avant tout aérodynamique et non pas acoustique. Mais il resterait à démontrer le lien entre cette aérodynamique et le transitoire du son, lien qui doit sans doute exister.

Il est très difficile encore de donner une explication à la formation du son en rapport avec l'écoulement aérodynamique au sein du tract vocal. Le phénomène est très complexe. Et pour pouvoir tout analyser il faudrait des ordres de grandeur de tous les éléments constitutifs : la vitesse de l'air à différents endroits du tract vocal et à ces mêmes endroits l'amplitude de l'onde acoustique. Il faudrait des manipulations avec des capteurs intrabuccaux.

Prenons le jet qui sort de l'orifice labial avec la barre d'explosion du son [b] dans la syllabe [bək].

Nous avons ici un phénomène de jet qui est comme tout jet dans ses parois, son enveloppe, en

relation avec un environnement qui freine (puisque c'est une zone de gradient de vitesse). Nous avons donc une zone instable, de cisaillement, qu'on appelle une zone d'instabilité convective. Celle-ci est emmenée et grandit. Si une telle instabilité interagit avec par exemple une singularité géométrique (objet plus ou moins solide), elle peut produire un son (voir le son de biseau plus loin). Chaque petite turbulence initiale est ici multipliée par le phénomène d'écoulement grandissant.

Le jet considéré ici est bien sculpté, modelé par l'activité articulatoire de la parole. On retrouve dans ce jet une répartition structurelle qui semble correspondre à celle trouvée dans les analyses spectrale et oscillographique.

Le fait *qu'on interrompt ce jet au sein de la cavité buccale** modifie la structure tourbillonnaire de tête qui rencontre l'air extérieur. Nous créons ainsi une suite de tourbillons annulaires- comme ceux des anneaux de fumeur- qui sont alors libérés et se développent dans l'air ambiant. (*C'est une sorte de *jet pulsant* de nature très complexe.)

La difficulté qui se pose à nous c'est bien le problème du couplage entre la propagation des ondes acoustiques et la propagation de l'écoulement de l'air phonatoire. L'interaction entre l'écoulement et la structure d'un côté et l'acoustique de l'autre reste encore fort complexe. Nous avons effectivement une cause commune dans la cavité buccale et nous trouvons ainsi une signature commune dans la répartition structurelle des ondes sonores comme de l'écoulement aérien. Les petites perturbations produites au sein du tract vocal et de la cavité buccale du fait de leur instabilité prendraient de l'ampleur et seraient donc dans une situation amplifiée.

On peut objecter que cet écoulement aérien devant l'orifice buccal n'a rien à voir avec le son. Mais ce champ de phénomènes qui appartient au domaine de l'aéroacoustique est encore très peu exploré et compris.

6. Essai de vélocimétrie par images de particule (PIV) et l'analyse de la syllabe [bak]

Remarque : Le mécanicien des fluides François Lusseyran a fait un travail de calcul et de visualisation des vecteurs de déplacement des particules pour une syllabe [bak] prononcée par la même locutrice que pour [bèk]. Texte refondu avec l'aide de M.Lusseyran.

La vélocimétrie par images de particule (PIV) est devenue une méthode standard de mesure du champ de vitesse en mécanique des fluides. Elle permet d'obtenir le champ de vitesse (deux ou trois composantes) dans un plan complet de l'écoulement, à la différence de la vélocimétrie par effet Doppler, développée dès les années 60, qui donne la vitesse en un seul point de l'écoulement. Par son caractère spatial, la PIV est à priori bien adaptée à l'identification des tourbillons à partir du champ de vitesse.

Son principe est le suivant :

- l'écoulement doit êtreensemencé en particules,
- on éclaire le plan de l'écoulement souhaité à l'aide d'une nappe laser,
- on prend deux images successives séparées par un intervalle de temps court (typiquement de 100 à 10000 μ s),
- on applique un algorithme permettant d'évaluer le déplacement local des particules entre les deux images.

Si le principe de la méthode est simple, sa mise en pratique a nécessité d'attendre le développement des moyens informatiques de calculs et des sources de lumières laser (laser YAG impulsif).

Sa mise en place dans le cas qui nous intéresse, est soumise à des contraintes fortes : éclairage laser au niveau du visage du phonateur, absence de maîtrise de l'ensemencement. Ce dernier point a été contourné en demandant à des fumeurs de parler. La fumée de cigarette est composée de particules extrêmement petites qui forment plutôt un brouillard homogène qu'un champ de particules distinctes. Dans ce cas, la méthode ne permet que l'évaluation du déplacement des gradients de fumée. Dans les zones homogènes ou trop éclairées (sursaturées) le calcul ne peut aboutir. Cependant nous avons obtenu une estimation des vitesses de déplacement des fronts tourbillonnaires. Nous en donnons un exemple sur les turbulences phonatoires engendrées par la syllabe [bak].

Pour la version imprimée seulement: on trouvera cette analyse PIV dans son ensemble, comme animation, dans l'archive de nos annexes : Champ Vitesse Flot Optique PIV (Volume II)

Image 764 à 766 : jet tourbillonnaire de [b] puis transition et apparition de [a]

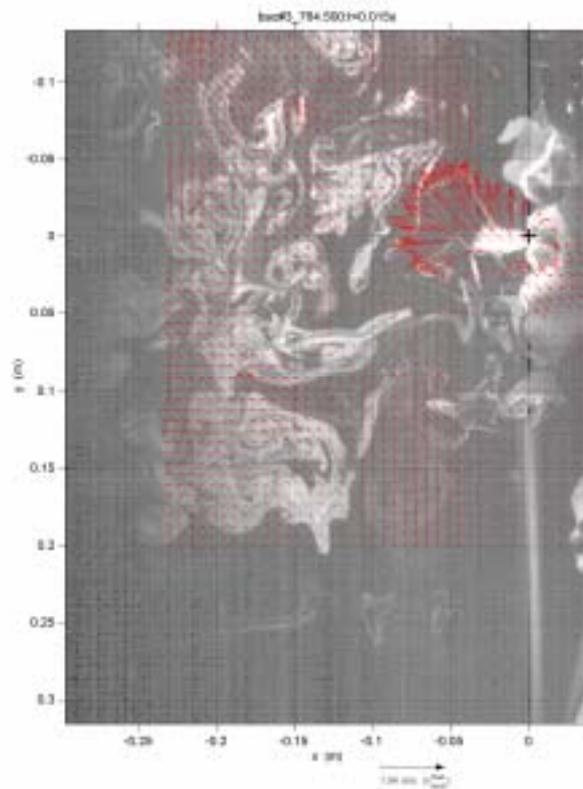


Fig.n° 120 : Le jet tourbillonnaire après l'explosion de [b]

Echelle de vitesse : la flèche à droite suit les changements de vitesse des courants

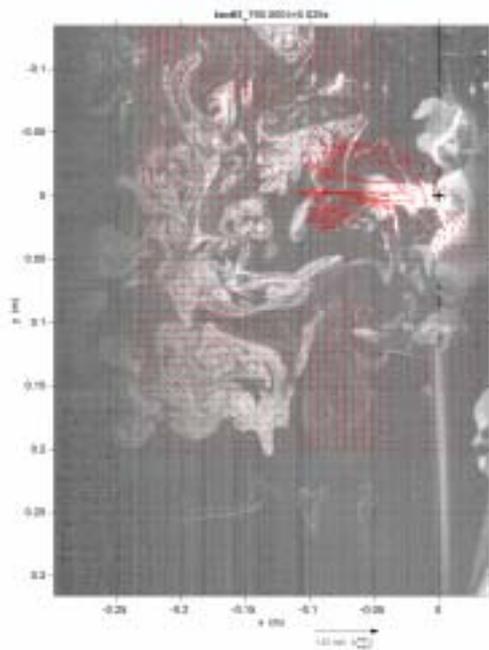


Fig.n° 121: transition de [b]

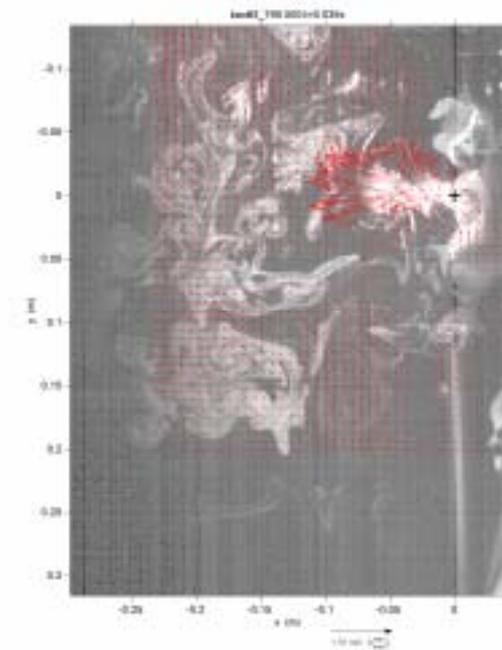


Fig.n° 122 : segmentation de cette transition

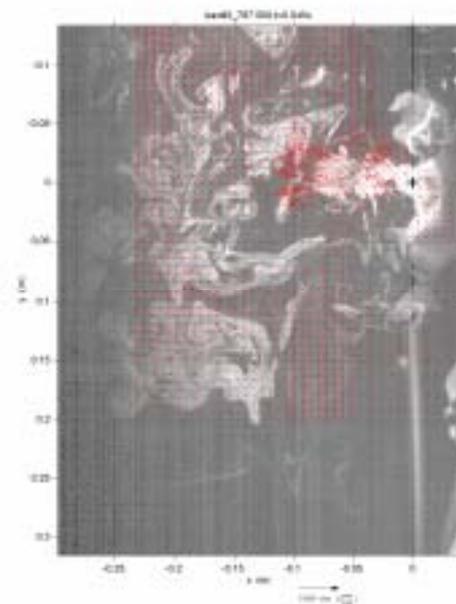


Fig.n° 123: Apparition de la voyelle [a] : ralentissement de l'écoulement (Lusseyran)

7. DVD - 5^e partie : Turbulences et phonétique (7 min)

Remarque: Ce n'est qu'après avoir présenté sur DVD cette démarche progressive d'observations et d'analyses morphodynamiques des sons du langage que nous donnons quelques échantillons des travaux de Rybak et des recherches actuelles de Pelorson qui sont présentés dans la partie théorique. Ces éléments viennent renforcer et confirmer notre étude sur les phénomènes aérodynamiques de la parole.

Contenu de la 5e partie du DVD :

- Rybak: (1980) Strioscopie interférentielle à l'ONERA, 500 images/s : visualisation de la syllabe [pa], sans le son, par deux locuteurs.

Découpage de la morphodynamique de cette syllabe [pa] : Maintier

- Pelorson : (entre 1995-2000)
 - a) Modélisation du flot glottique in vitro : mise en évidence de formations tourbillonnaires déjà au travers de la glotte.
 - b) Visualisation de la syllabe [ba] devant la bouche, sans le son : confirmation de formations tourbillonnaires à bordure globale.

- Maintier (2003) et Zinke (entre 1965-1975) :

Observations surprenantes de Zinke sur des courants intrinsèques complexes de la morphodynamique de la voyelle [e]. Une coupe frontale au laser vient confirmer la justesse de ces observations. Analyse morphodynamique.

Lecture du DVD : 5^e partie : Turbulences et phonétique (7 min) !

7.1. Remarque sur la voyelle [e] : ses structures morphodynamiques intrinsèques

Après avoir visionné le DVD on comprend que c'est un véritable champ de recherche qui s'ouvre ici. Nous aurions aimé pouvoir réaliser avec trois caméras des reconstitutions tridimensionnelles de ces « nuages phonatoires ». Mais cela serait un projet pour une équipe de chercheurs.

Dans le chapitre I nous avons présenté les structures tourbillonnaires comme étant avant tout *des volumes*.

Nous avons le même état de fait en phonétique où l'on travaille depuis des décennies sur des coupes sagittales de la langue. Et pourtant ceci a tout de même rendu possible de retirer de nombreux éléments précieux pour la compréhension et la reconstruction du phénomène de la parole. Mais depuis les dernières années grâce au moyen d'imagerie 3D, voire 4D, on s'approche de détails essentiels pour saisir toujours plus près la réalité de la phonation.

On comprendra notre impatience et curiosité en voulant profiter d'une séance de tomoscopie au laser pour essayer de vérifier une observation particulière de Zinke sur la voyelle [e] en faisant quelques coupes frontales du jet tourbillonnaire de ses voyelles et qu'on aura pu voir dans la 5e partie du DVD. Zinke avait documenté ses observations par des petits dessins riches de détails. C'est en visualisant nos prises de vue *au ralenti* que nous avons constaté l'exactitude ses observations.

Nous trouvons dans la formation de ces *quatre courants*, qui paraissent contrarotatifs sur le film, un cas de figure que nous avons présenté dans le chapitre I au paragraphe 4.6. sur les tourbillons de « contournement » et les turbulences de sillage.

La langue est un peu comme un bateau - un avion - qui flotte dans les courants fluides de la ventilation phonatoire. Le nez du bateau serait ici l'arrière de la langue. L'image paraît simple mais le cas de figure est très homologue.

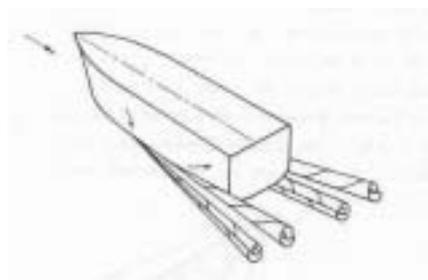
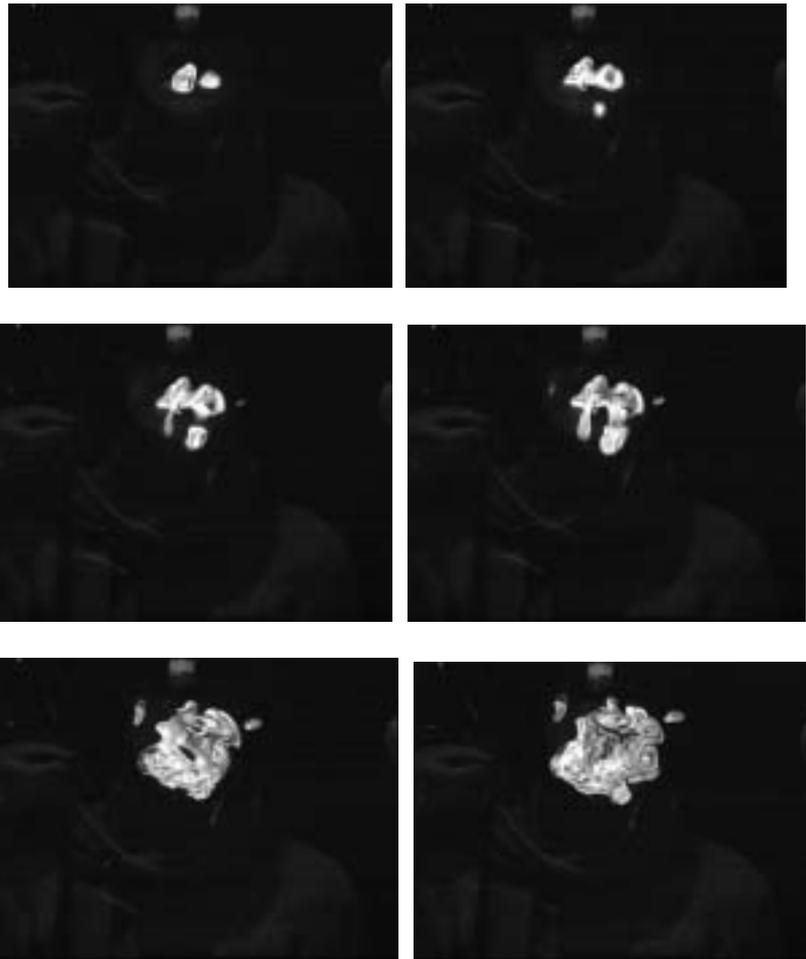


Figure n° 124: Quatre tourbillons de sillage contrarotatifs à la poupe d'un bateau (Lugt, 1979 :148)



Figures n° 125-130 : Deux paires de tourbillons apparemment contrarotatifs au début de la voyelle [e]

Coupe au laser à 10 cm devant la bouche (frontal) (Lusseyran/Maintier, LIMSI, 2003)

7.2. Reconstitutions de la langue en 3D des voyelles [a, è, e] : leur impact sur les écoulements phonatoires

Dans les analyses descriptives morphodynamiques du DVD est fait allusion à une observation sur les trois voyelles [a, è, e]. Effectivement en prononçant spontanément [bèk] et non pas [bek], comme nous l'avions théoriquement envisagé, nos locuteurs nous ont donné l'occasion de voir apparaître devant leur bouche une formation du noyau vocalique qui était un intermédiaire morphodynamique entre les morphodynamiques de la voyelle [a] et de la voyelle [e]. Ce fut pour nous une heureuse découverte.

Suivent trois reconstitutions tridimensionnelles de la langue pour les voyelles anglaises.

D'abord l'orientation topologique : la pointe de la langue qui manque serait en bas, la racine, en haut de l'image.

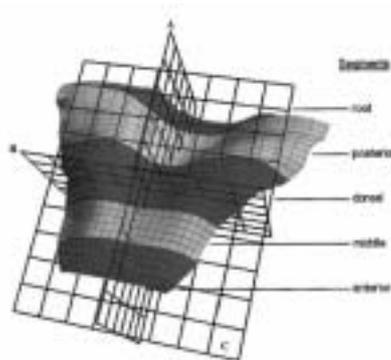
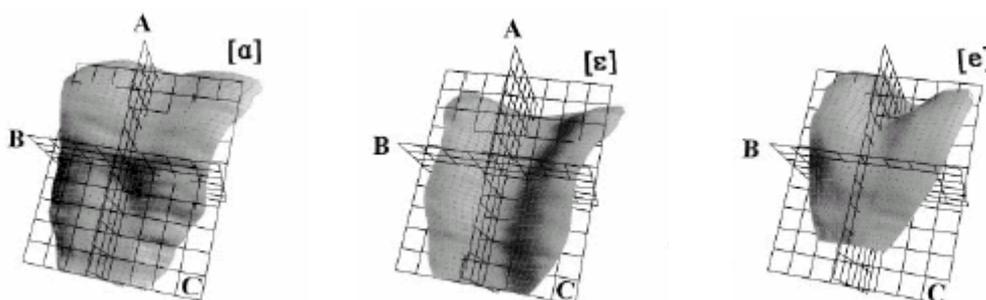


Figure n° 131 : Topographie de la langue, axes mesurés. (Stone and Lundberg, 1996)



Figures n° 132-134: Three-dimensional tongue surface shapes of english vowels. (Stone and Lundberg, 1996)

On peut se représenter différents courants et tourbillons provoqués par de tels reliefs, et volumes si on y intègre le palais et les joues.

La forme intermédiaire de la voyelle du milieu, [è], ressort clairement. Le système de quadrillage permet d'estimer la profondeur. Le creux de la voyelle [a] plus marqué dans la partie antérieure se trouve aussi dans la voyelle [è] ainsi que le creux très marqué, plus abrupt dans son angulation, dans la partie postérieure de la voyelle [e] bien que plus large. C'est un véritable canal qui traverse la langue entière pour cette voyelle [è] et l'on comprend cette formation aérodynamique qui en découle : elle débute comme celle de la voyelle [a]



Figure n° 135 : Voyelle [a] en jaune orangé dans la syllabe [ba] (Maintier)

Puis le jet central traverse cette forme et prend la direction oblique vers le bas dans une forme plus étroite, d'un écoulement plus fluide, plus rapide qui présente les caractéristiques de la morphodynamique de la voyelle [e].



Figure n°136 : Voyelle [e] en jaune orangé dans la syllabe [be] après une transition, en vert.

La consonne [b] est encore formée audessus. (Maintier)



Figure n° 137 : Voyelle [è] dans la syllabe [bèk] (Maintier)

Le jet oblique, allant vers le bas, a traversé, repoussé la morphodynamique située au-dessus. Il est plus rapide et ressemble à celui de [e]. Revoir le DVD 3^e partie pour observer cette morphodynamique de [è] en mouvement dans l'analyse de la syllabe [bèk].

7.3. Un précurseur d'une phénoménologie aérodynamique du langage : Wolfgang von Kempelen.

On peut rappeler que la recherche de la reproduction de la parole humaine avait connu deux précurseurs :

- 1779 (ou 1780) - Christian G. Kratzenstein: Synthèse des voyelles par des résonateurs de formes diverses.
- 1783 - abbé Mical: Les têtes parlantes.

En 1791 Kempelen publia son ouvrage: « *Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung einer sprechenden Maschine* ».

« *Les mécanismes de la voix humaine suivie d'une description d'une machine parlante* »

Nous traduisons directement de l'allemand en utilisant une édition fac-similé publiée en 1970.

Kempelen étudia de manière descriptive et phénoménologique des aspects mécaniques -en partie dynamique- qui conduisent à la formation des sons de la voix et de la parole humaine.

Sa démarche peut aujourd'hui nous sembler naïve mais, aujourd'hui encore, ses observations sont en grande partie incontestées. Elles nous semblent fort utiles pour nous approcher du phénomène des turbulences phonatoires externes et du rôle de la forme de la cavité buccale dans la structuration des bordures globales de ces turbulences phonatoires.

Nous n'aborderons que certaines consonnes décrites par Kempelen. Ces descriptions viendront étayer certaines observations documentées dans le DVD.

Nous avons vu que les morphodynamiques aériennes des sons du langage que nous étudions ont une bordure globale bien délimitée, une « gestualité » spécifique qui semble entre autres refléter la forme et les mouvements de la langue et de la cavité buccale, générateurs principaux de chaque phonème dans la « chaîne -tourbillonnaire- parlée » mais transformés, peut-être amplifiés par les forces qui régissent les processus aérodynamiques.

Dans le paragraphe 43 du chapitre sur les outils de la parole Kempelen écrit :

« Si cette ouverture (S.M. : de la glotte) n'est pas très grande, de sorte que l'air venant des poumons ne puissent pas passer librement mais plutôt avec une certaine force, alors cet air frotte les deux bords de ces membranes et les obligent à vibrer. Ces vibrations se produisent avec une telle rapidité que les coups que l'air reçoit de ce va-et-vient de la membrane se fondent presque en une seule salve ou unité qui ne peut plus être séparée, perçue séparément par notre oreille comme c'est le cas de notre oeil qui ne peut plus percevoir les différents rayons d'une roue tournant très vite mais seulement une sorte de disque. De cette manière les coups répétés dans l'air deviennent un son et c'est ce son qu'on appelle la voix. » (Kempelen, 1791,1970 : 81).

Puis Kempelen décrit la formation des voyelles qui sont différentes modulations de la voix produites par les seuls mouvements de la langue.

Dans le paragraphe 105 Kempelen précise :

« La glotte résonne de la même manière même avec le nez que l'on bouche. La voix qui vient de la gorge est conduite vers les lèvres par un canal que forme la langue. (...) Suivant l'ouverture ou la fermeture de ce canal la voix sera différente. » (Kempelen, 1791,1970 : 189-190).

Effectivement pour la formation des voyelles la langue prend différentes positions créant

ainsi différents espaces de résonance dans la cavité buccale.

Dans le paragraphe 138 Kempelen aborde la question des consonnes d'un point de vue qui est celui de la mécanique des fluides : hydrodynamique comme aérodynamique.

« (...) *La voix n'est rien d'autre qu'un courant **continu** d'air.* (S. M. : Que cet air soit de structure laminaire ou turbulente Kempelen ne pouvait apparemment pas encore faire la différence à cette époque.) *Pour maintenir cette voix, l'air doit aussi jaillir de la gorge de manière continue et faire place à l'air qui arrive. Dès que cet écoulement cesse la voix doit nécessairement s'arrêter, tout comme l'eau s'arrête et se tait quand on ferme la sortie d'où elle s'écoule.*

*Pour cette raison on doit en conclure que la voix, quand la bouche et le nez sont fermés, c.-à-d. quand toutes les sorties lui sont barrées, doit s'arrêter totalement et instantanément. Dans la mesure où l'on se représente la voix comme un courant d'eau cette conclusion serait tout à fait juste. Mais comme il s'agit ici de l'air et que celui-ci possède une propriété foncièrement différente de celle de l'eau à savoir **la compressibilité** nous aurons dans le cas étudié ici (S.M. : la consonne [b]) un tout autre effet.*

On peut aussi avec la bouche et le nez fermés faire entendre la voix mais seulement un court instant et pas très fort. Ceci se produit de la manière suivante. L'espace intérieur de la bouche est rempli d'air qui n'est pas comprimé mais est encore dans son état naturel. La membrane glottale - qui ici fait fonction de ventilation - la coupe de toute communication avec l'air contenu dans les poumons. Quand on doit exprimer la voix l'air contenu dans les poumons doit être comprimé, la membrane glottale s'ouvre un petit peu et forme un passage très étroit. L'air déjà contenu dans la bouche est beaucoup moins comprimé et offre donc encore beaucoup d'espace pour que l'air nécessaire pour une nouvelle sonorité puisse y confluer en comprimant de plus en plus cet espace buccal aérien. Dès que l'air contenu dans la bouche est autant comprimé que celui qui est dans les poumons l'équilibre entre les deux s'établit et le courant d'air s'arrête et avec lui la voix. Ceci est la raison pour laquelle on ne peut maintenir la voix que seulement pour un bref laps de temps, environ une seconde. On conviendra ainsi facilement, comme je l'ai signalé plus haut, que la voix ne peut pas être très forte car elle est emprisonnée et de beaucoup étouffée, chose que l'on connaît par exemple quand on écoute un violon au travers le mur d'une salle où l'on y parle beaucoup et que l'on ne perçoit pas du tout aussi distinctement que si ce mur n'y était pas.

En plus de la compressibilité de l'air la nature se sert encore d'un autre « tour de maître »

*pour faire de la place à l'air provenant des poumons. Les parois qui se trouvent au-dessus de la membrane glottale c.-à-d. les parties charnues immobiles de l'intérieur du cou (S.M. : nous dirions aujourd'hui le pharynx) s'élargissent ou plutôt sont gonflées par l'air qui s'accumule. Il suffit de regarder dans un miroir et de prononcer tout doucement **la sonorité B** pour se convaincre qu'avant l'ouverture de la bouche, le cou et la partie inférieure du menton jusqu'au cou se gonflent légèrement. Mais cet état de fait à ses limites. Quand ces parties, ces parois sont poussées à leur maximum alors la voix doit cesser. Si on gonfle en plus les deux joues on peut encore maintenir la voix un court instant » (Kempelen, 1791 (1970) : 241-244).*

Au-delà de cette limite la résistance des lèvres ne suffit plus et l'air enfermé dans la bouche doit sortir dans une explosion forte. Kempelen fait bien ressortir les différences entre la production des consonnes sourdes et sonores. Mais nous ne prenons ici que les aspects venant confirmer notre approche morphodynamique de la parole.

Dans le paragraphe 142 nous trouvons le tableau 12 suivant :

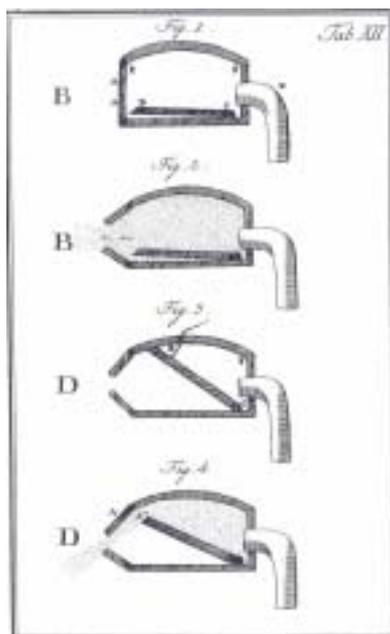


Figure n° 138 : « Tableau n° 12 » (Kempelen, 1791 : 252)

Prenons l'exemple du son [b] que décrit Kempelen: on constate que l'air phonatoire est légèrement compressé le long des deux joues. Le jet tourbillonnaire projeté dans l'espace devant la bouche par l'acte phonatoire développe dans l'espace *une forme globale*, plutôt *ronde et à deux bords*, qui apparemment avait été compressée et modelée dans le « moule » de cette configuration de la bouche.



Figure n° 139 :

[b] phase finale - fumée

(Zinke, 1976)

On pourrait dire que cette consonne occlusive bilabiale sonore à quelque chose d'implosif comparée à sa voisine occlusive bilabiale sourde qui a un caractère plus explosif. (Voir la photographie de [p] en comparaison, chapitre III)

Nous avons même pu observer dans les visualisations au laser *cette bifurcation* de l'écoulement du jet tourbillonnaire de la consonne [b] et ce jusque dans la morphodynamique de la transition initiale de la voyelle [a] dans la syllabe [bak] :

Clichés page suivante.

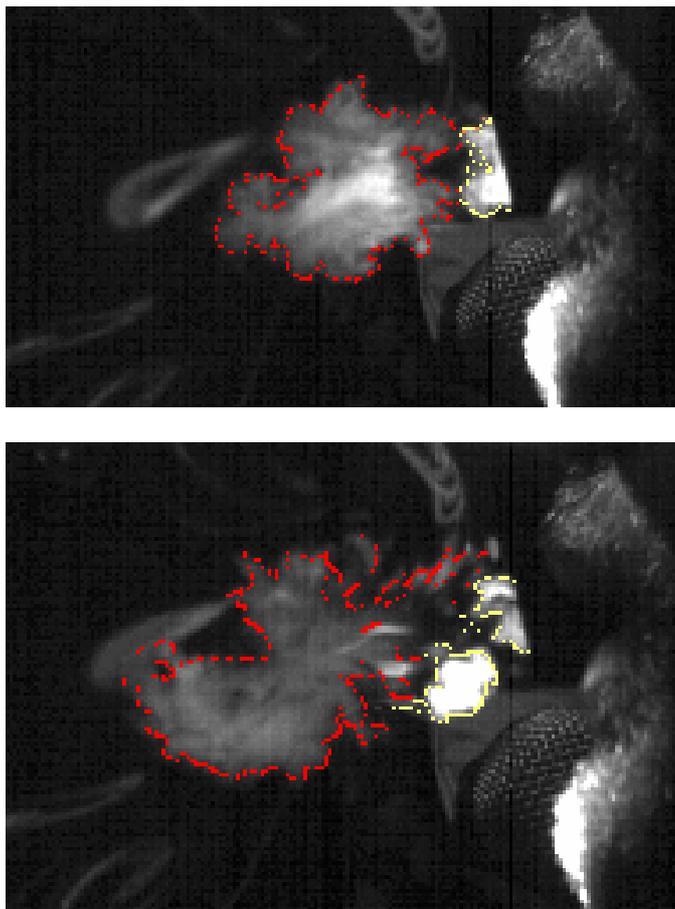


Figure n° 140-141: Syllabe [bak] : [b] en rouge et la transition avant la voyelle [a] (VO) en jaune pâle

*La morphodynamique de la voyelle [a] n'est pas encore sortie de la bouche.
On remarque cette bifurcation dans la structure en rouge comme dans celle en jaune pâle qui forme deux îlots.
(Lusseyran, LIMSI, 2003. Analyse : Maintier)*

Remarques de Kempelen sur la consonne latérale, liquide [l] :

Après avoir décrit trois différents [l] Kempelen ajoute

«... Que la langue sépare la voix en deux parties. (S.M. : Kempelen considère la voix comme intrinsèquement liée au courant d'air, à la ventilation. « sépare la voix » veut dire que la langue sépare réellement le courant d'air phonatoire.) Ceci se produit de la manière suivante. Quand la langue aplatie s'est posée avec sa pointe juste derrière les incisives supérieures contre le palais et qu'elle laisse sa partie postérieure reposée, alors il reste sur les deux côtés, près des prémolaires, de petites ouvertures au travers desquelles la voix peut sortir. De cette manière la description de la sonorité L est complète. Nous avons dit un peu plus haut du son B que quand on lui avait fermé toutes les sorties il pouvait néanmoins

résonner environ une seconde. Or on peut faire résonner la sonorité L dix secondes ou même plus. Ceci est donc un indice certain que la voix doit trouver une sortie quelque part. Ce ne peut pas être par le nez car celui-ci est fermé, comme on peut s'en assurer en le pinçant avec les deux doigts. Cela ne peut pas être non plus par le canal lingual habituel car celui-ci est fermé et devant, par la pointe de la langue elle-même et aussi plus à l'intérieur, ce que l'on peut vérifier dans un miroir. Donc on ne peut chercher cette ouverture qu'à l'arrière de la langue. Si l'on veut s'ôter tous les doutes il suffit de mettre la langue dans la position de la prononciation du L et d'insuffler non pas la voix mais seulement le souffle avec une certaine force. On peut alors ressentir ce souffle sortir par les bordures arrière de la langue et par les parois des joues qu'il frotte. Quand on répète plusieurs fois cette expérience on ressentira au bord de la langue le lieu par lequel sort le souffle comme étant tout sec. Cette sensation durant même un certain temps. Dans ma machine parlante je fais apparaître la sonorité L en mettant le pouce dans la partie qui représente la bouche. Ceci fait un obstacle à la voix qui l'oblige à se fendre en deux. » Voir le tableau 15 fig. 4 :



Figure n° 142 :

« Tableau n° XV »

(Kempelen, 1791 :294)

En comparaison et comme confirmations de ces observations quelques prises de vue de Zinke



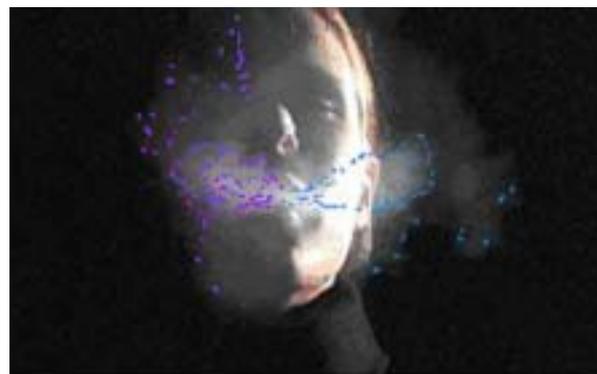
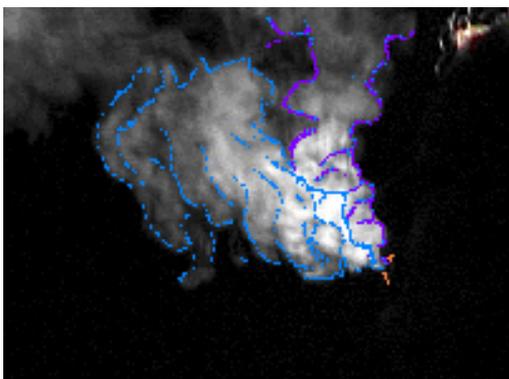
Figures n° 143-144 : [l] vue d'en haut. (Zinke, 1965)
Le nez et la bouche sont en bas de la photo.
Les deux courants latéraux
sortent de chaque côté de la bouche

[l] (Zinke, 1965)
Vue de trois-quarts
de dessous le menton

Et nos prises de vue :



Figures n° 145-148 : [l] de profil [l] de face (Maintier)
Ci-dessous mise en évidence des deux courants latéraux (en bleu et en violet).



La notion de consonne « latérale » pour [l] prend ici toute sa signification : deux **courants tourbillonnaires apparemment spiralés** (bleu et violet) engendrés par la forme de la langue et s'échappant latéralement par les commissures des lèvres.

Quel réalisme pragmatique de la part de Kempelen : mettre le pouce pour fendre le courant et ainsi *former la dynamique de [l]* et faire apparaître le bruit de cette consonne « liquide » par excellence, cette « latérale » [l] comme on la nomme aussi en phonétique. Effectivement *en séparant un courant* on provoque des déchirements au sein de l'air et des tourbillons apparaissent avec des phénomènes de succion, d'aspiration qui produisent ces bruits caractéristiques de l'eau qui joue avec l'air, comme dans un torrent, un ruisseau. C'est ce qu'on connaît aussi acoustiquement du tourbillon de la baignoire avec son bruit de succion.

Conclusion et perspectives

*« Le corps entier, jusque dans les structures microscopiques de la circulation sanguine et ses échanges gazeux, est mobilisé par le dialogue, la communication. Vu que chaque cellule du corps humain est alimentée par le système circulatoire, il est donc possible que chaque cellule soit aussi influencée par le **dialogue humain**. Il en ressort que, dès que nous parlons, tout le corps est activé, que ce soit perceptible ou non par l'œil ou par l'oreille. C'est comme si la nuit, on allumait la lumière dans une maison obscure : toutes les fenêtres s'éclairent alors ! »*
(Lynch, 1985, trad. allemande, 1987 : 238)

Gaston Bachelard dans « *L'Air et les Songes* », citant le poète Milosz, à propos de l'air que nous respirons et dans lequel nous parlons :

« Physiquement, le cosmos court tout entier en nous »

Nous nous étions fixés comme objectif d'abord de vérifier les observations de Zinke sur les formes aériennes des sons du langage. Nous avons retrouvé dans un premier temps les mêmes formes à bordure globale pour les voyelles comme pour un grand nombre de consonnes isolées. Nous avons pu même filmer certains détails que Zinke n'avait fixé qu'au dessin, comme par exemple les tourbillons sortant des narines pour la consonne nasale [m], la structure angulaire rythmique de la consonne [k], tout comme les quatre courants tourbillonnaires qui forment le volume pyramidal de la voyelle [e], chose assez surprenante.

Zinke avait essayé de faire un tableau synoptique, une sorte de typologie de ces formes aériennes. Mais en tenant compte de la coarticulation avec cinq voyelles nous avons pu systématiser et élargir ces observations.

Comme rappel, un montage montrant le comportement de la consonne [k] finale suivant la voyelle qui la précède, donc la mise en évidence de la coarticulation sur le plan aérodynamique. On y retrouve des structures communes de [k] que nous n'avons pas étudiées dans tous les détails, mais aussi des *variantes* qui montrent l'immense richesse d' « informations » contenues dans ces morphodynamiques. Zinke n'est pas allée jusque-là, mais elle a ouvert un champ inexploré jusqu'alors.

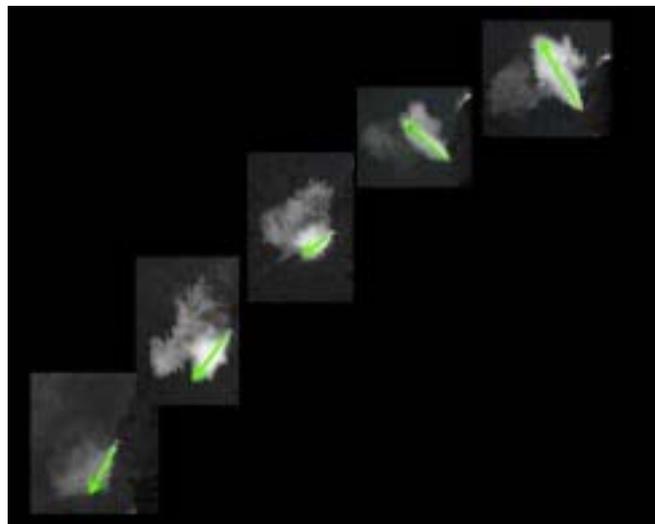


Figure n°149 : De bas en haut, [k] final de [bik, bèk, bak, bok, buk] (Maintier)

Avec seulement 25 images/s, avec les syllabes CVC [bak, bèk, bik, bOk, buk] nous avons déjà pu constater des événements aérodynamiques correspondant aux gestes articulatoires, c'est-à-dire aux événements que l'on retrouve dans un découpage phonétique: barre

d'explosion, une fine transition mais ici pas assez précise, le noyau vocalique, la tenue articuloire puis l'explosion de la consonne finale. Sur la barre de montage la synchronie avec le son se laissait deviner mais de manière encore insuffisante.

C'est grâce aux prises de vue avec 100 images/s et l'éclairage au laser qu'il nous a été alors possible de *mettre en évidence ces structures de transition* encore plus différenciées et pertinentes. Nous avons ainsi constaté alors sur les syllabes CVC [bak] et [bèk] que le déroulement dans le temps de la structure acoustique de ces syllabes se retrouvait exactement dans le déroulement, la segmentation des turbulences phonatoires externes leur correspondant.

Ni Zinke, ni Rybak n'avaient poussé l'observation et l'étude de ces morphodynamiques phonatoires aussi loin et de manière conséquente. C'est bien en les étudiant minutieusement mais en relation avec leurs structures phonétiques acoustiques qu'elles prennent alors toute leur importance. Nous avons agrandi une brèche et espérons que d'autres chercheurs dans un travail d'équipe interdisciplinaire et avec des moyens technologiques plus sophistiqués continueront à explorer ces réalités aérodynamiques et aéroacoustiques de la phonation.

Perspectives sur le plan de la physique et de la phonétique

Nous pensons qu'une analyse encore plus fine de notre corpus ferait ressortir d'autres éléments pertinents, voire peut-être des paramètres. On pourrait systématiser cette étude en se concentrant par exemple sur une seule syllabe prononcée de différentes manières en variant la hauteur, l'intensité, la durée et mesurer les changements observés dans les morphodynamiques correspondantes et en utilisant pour cela un système de logiciel adapté.

Sir Paget avait déjà en 1920 construit des moules de la cavité buccale, des résonateurs en plastiline pour les différentes voyelles et obtenu des sons de résonance très vocaliques et caractéristiques. Si l'on voulait aujourd'hui étudier les voyelles et les sons du langage en général dans *leurs comportements morphodynamiques* on pourrait construire à grande échelle une cavité buccale avec une langue d'un matériau très élastique dans laquelle on ferait passer un courant fluide liquide ou gazeux coloré. On pourrait utiliser pour créer ces « moules » les visualisations 3D obtenues en échographie (Stone, 1996) ou par I.R.M. (Narayanan et Alwan,

1995,1997) et que nous avons déjà présentées. On découvrirait, d'après nous, un nombre limité de *grands types d'écoulement* qui contribuent à la formation des sons. Ces types d'écoulement sont bien entendu en relation étroite avec les modes et lieux d'articulation des sons. Ils sont plus finement structurés intrinsèquement par l'impact des circonvolutions de la langue. Mais la *forme générale* qu'on retrouve dans *les enveloppes* est donnée, d'après nous, par la forme de la langue et de l'espace buccal dans son entier. Mais les lèvres jouent aussi un rôle très important. Rybak n'en parle pas vraiment et il n'a pas tenu compte et n'a pas non plus observé les comportements dus à la coarticulation, n'ayant travaillé qu'avec des syllabes ayant [a] pour noyau vocalique. Des simulations sur ordinateur seraient aussi tout à fait pensables en mécanique des fluides pour réaliser ces visualisations et ces calculs sur les différents types d'écoulement au sein de la cavité buccale.

Quant aux processus aéroacoustiques extrêmement complexes en relation avec ces phénomènes tourbillonnaires au sein de la cavité buccale nous ne saurions encore leur donner d'explications convenables. Ce travail reste à faire par une équipe de la jeune branche scientifique qui est l'aéroacoustique.

Personnellement nous aimerions aussi avoir la possibilité de vérifier les observations de Zinke sur les « perles » d'air phonatoire. Cela nécessiterait de pouvoir faire quelques séries de prises de vue en strioscopie interférentielle et avec le son synchronisé.

Perspectives sur le plan physiologique et psychosomatique

Cette approche morphodynamique permet d'après nous de créer un « pont fonctionnel » entre l'aspect gestuel et l'aspect acoustique de la parole, tout comme entre l'aspect physique et l'aspect physiologique. Tout au long de notre thèse nous nous sommes justement déplacés entre l'aspect physique et l'aspect physiologique, l'aspect fonctionnel de la parole.

Pour montrer l'importance *des phénomènes aérodynamiques* dans la génération des sons du langage nous avons aussi rendu attentif à des phénomènes pressionnels encore peu étudiés de nos jours. Avec la découverte assez récente de récepteurs baro-sensibles ou presso-récepteurs au sein de l'épithèle du *conus elasticus*, juste sous les cordes vocales, on pressent des interactions encore peu comprises *pendant la formation des sons*. Il semblerait que nous accompagnons et dosions d'une manière très subtile la pression aérienne nécessaire à la

phonation par le biais du système neurovégétatif. Ladefoged et Draper avaient fait des études myoélectriques des comportements de la musculature respiratoire pendant l'acte de la parole, que nous connaissons bien - nous avons correspondu à ce propos avec Peter Ladefoged peu avant son décès soudain - mais nous pensons ici à des mesures beaucoup plus fines. (Draper,Ladefoged,Whitteridge, 1959,1960, 2000)

Quand on parle on *s'exprime* au sens profond du mot, on imprime des structures et des images de notre vie intérieure, mentale, jusque dans les couches physiologiques et physiques de notre être, comme nous le constatons dans les formes aériennes des sons du langage. A cette activité expressive correspond simultanément une activité « impulsive » fort différenciée dans notre système musculaire et notre circulation sanguine, comme l'a démontré James Lynch. (Voir Annexe I : sur l'impact cardio-vasculaire de la parole.). Mais c'est aussi tout notre corps musculaire, notre « corps de mouvements » qui est rythmisé par la parole dans des micros mouvements, comme l'ont démontré Condon et plus tard Kato. Parler n'est vraiment pas que cette activité fonctionnelle du conduit vocal, de la langue et ce qui « sort de l'orifice buccal ». Et nous avons bien constaté et mis en évidence que même ce qui « sort de l'orifice buccal » est en fait la « résultante » de tout cet ensemble de mouvements et de gestes exprimant sentiments et pensées. C'est pour cela qu'on retrouve des *formes gestuelles* dans les structures morphodynamiques aériennes des sons du langage, en tout cas des formes reproductibles dans un substrat de nature chaotique.

On peut comprendre aussi que la manière dont nous parlons a en effet sur notre état de santé qui, par la force des habitudes, peut devenir un désordre chronique. Et nous ne pensons pas ici simplement à des maux de gorge, des dysphonies ou des nodules sur les cordes vocales. Ces symptômes seraient liés directement et localement à une mauvaise phonation. Nous pensons surtout au fait que la parole est *une modulation de la respiration* et par ce biais à un impact subtil mais réel sur toute la circulation sanguine et ainsi sur tout l'organisme humain.

En 1990 Rybak écrivait dans « *L'Identité Humaine* » :

« (...) Or, parler nous paraît tout à fait naturel ; cependant, le fait verbal constitue un mode de communication qui aurait pu ne pas exister. En effet la phonation est une modulation de la ventilation, c'est-à-dire que la fonction phonatoire, qui est une fonction motrice, s'est greffée sur une fonction viscéro-végétative qu'est la ventilation et qui intervient dans l'oxygénation de notre organisme ainsi que dans **l'équilibre acido-basique** de son « milieu intérieur »...Donc la

logique de l'évolution des êtres vivants montre ici l'innovation totale qu'est l'air entendu, qui fait que l'on passe d'une régulation grossière à la régulation la plus fine, la plus haute qui soit connue dans la nature vivante, celle de la création des mots, lesquels interviennent dans l'économie extérieure et intérieure de notre être, donc tout le construit dont nous sommes capables, toute l'anagogie. Les choses auraient pu aller autrement par le développement d'un système de communication chromatique, par exemple, par un codage vers l'extérieur de la peau et dans l'obscurité de notre corps par un codage luminescent, mais la logique des systèmes vivants a suivi l'axiomatique de la meilleure énergétique possible, celle de l'oxygénation.»
(Rybak, 1990 : 39)

Nous voyons personnellement dans ces considérations des perspectives immenses quand à l'utilisation de la parole et des sons de la parole humaine dans l'acte thérapeutique. On devrait pouvoir aujourd'hui être en mesure de mettre en évidence de manière non invasive, ce qui serait indispensable, les proportions acido-basiques dans le sang en fonction de différents sons de la parole répétés pendant quelques minutes ou prononcés sous une forme rythmique par exemple.

Le système du fin capteur hygro-barométrique (VAP) qu'avait créé Rybak pourrait être encore plus développé et nous fournir des renseignements différenciés sur la « structure respiratoire » de chaque son prononcé. Mais nous n'avons encore obtenu aucun renseignement sur sa succession après le décès de son inventeur.

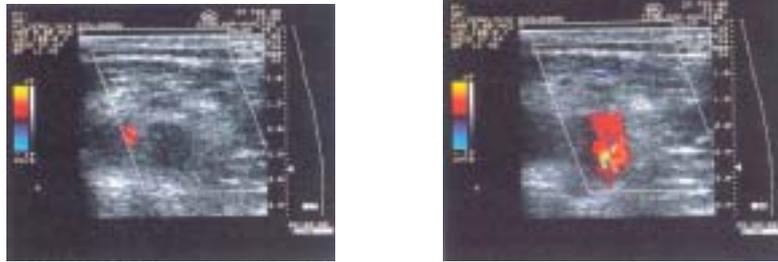
L'orthophonie, comme son nom l'indique, reste souvent limitée à une sorte de « gymnastique corrective » de la langue, de l'appareil buccal, chose bien sûr nécessaire dans un certain nombre de cas. Mais en intégrant la dimension dynamique de « l'homme respiratoire et cardio-vasculaire » nous pourrions développer un art thérapie de la parole qui tiendrait compte de l'impact global de la parole sur l'organisme. Nous aurions surtout un fondement physiologique pour cette thérapie de la parole : la parole comme nourriture, la parole comme médicament. Et ce ne serait pas qu'une belle métaphore.

Des études sur le « réflexe de variabilité des fréquences cardiaques » pendant la récitation de rythmes poétiques et d'exercices de diction en art thérapie, grâce à l'utilisation d'un système de logiciel développé spécialement pour les phénomènes cardio-respiratoires, ont donné des résultats probants qui ont été publiés dans des revues de cardiologie. La respiration normale ou des exercices de relaxation respiratoire n'avaient pas le même effet harmonisant sur les

fréquences cardiaques *qu'une respiration « modulée », structurée par les rythmes poétiques*, surtout par le rythme grec de l'hexamètre qui est en rapport avec le quotient respiro-cardiaques, ce qui faisait écrire dans un numéro de la revue américaine Time : « *Does Poetry Make The Heart Grow Stronger?* ». (TIME magazine, Aug. 02, 2004. Voir les détails physiologiques : Bekkermann *et al.* 2001, 2002, 2004)

A cela s'ajoute une autre piste d'études à laquelle nous avons participé il y a quelques années en tant que récitant. Cette recherche n'en est encore qu'à ses débuts.

Voici un aperçu de visualisations de la circulation sanguine en échographie Doppler modulée par différents sons du langage :



Figures n° 150-151: Voyelle [a] cercle sombre

Consonne [k] rouge orange

Échographie prise à la veine iliaque, à l'aîne droite du locuteur.

(Husemann, Weidemann, in: Zinke, 2001)

Les couleurs de jaune et rouge indiquent que le sang retourne vers la périphérie du corps, la couleur bleue correspond à la remonté naturelle du sang veineux pendant la respiration. Quand le sang est ralenti il s'arrête pour un court instant et la couleur disparaît.

Le point rouge de la première photographie de gauche correspond à l'artère fémorale. L'impact respiratoire pressionnel de l'émission de la voyelle [a] fait ralentir la circulation: on devine un cercle sombre qui signifie dans le code de couleur du système Doppler que le sang s'est arrêté un court instant. Sur la figure de droite on voit à la couleur l'impact de l'occlusive [k] un retour accéléré du sang vers la périphérie.

On peut pressentir toutes les modulations que peuvent exercer les différents sons du langage pendant la parole sur la circulation sanguine et cela signifie sur sa biochimie. Des suites concentrées, rythmiques de syllabes, d'exercices de diction accompagnés de gestes ciblés, de poèmes bien choisis, ont une influence directe sur la respiration et par là sur les fréquences cardiaques et la circulation sanguine. On peut, avec des suites rythmiques d'occlusives,

tonifier une personne en hypotonie, avec d'autres sonorités calmer et détendre une personne en hypertonie. Les gestes que l'on fait faire par l'étudiant ou le patient pour renforcer la production de ces sons du langage, si nécessaire, sont en rapport étroit avec les formes aériennes des sons du langage. (Voir en annexe IV un exemple tiré de nos cours). Une étude *morphodynamiques des mouvements du corps humain* en rapport avec les formes aériennes des sons du langage serait là encore à faire.

Des perspectives d'études longitudinales se laissent ainsi entrevoir et nous pouvons nous réjouir à l'idée que des technologies de mesure non invasives nous permettront de mettre en évidence, de fonder pour systématiser ce que les artistes et les thérapeutes connaissent souvent par la pratique.

Ainsi, après cette esquisse de perspectives, on comprend mieux et dans leur profondeur les remarques d'une poétesse de langue française et d'origine libanaise, André Chédid :

« *Le poème se nourrit de **mouvement** ; mouvement de cet être intérieur de certains appellerait « âme ». Son rythme celui de la vague, son dessein est de **traverser**.* (1956)

*Rien de moins abstrait, de moins factice, que cette préoccupation (la poésie). **Le corps, la circulation sanguine, la respiration s'en ressentent.***» (1979)

Nous pouvons ainsi terminer notre travail avec les paroles d'un philosophe allemand, poète mais aussi ingénieur des Mines, Frédéric de Hardenberg ou Novalis:

« Die Luft ist so gut *Organ* des Menschen, wie das Blut. »

« *L'air est aussi bien organe de l'être humain que son sang.* »

Et c'est avec l'élément de l'air, de l'atmosphère, avec cet *ordre chaotique* créateur de formes vivantes que nous concluons dans le DVD notre travail sur les formes aérodynamiques des phonèmes, des sons du langage :

Lecture du DVD : 6^e partie : ... pour finir ! (4 min)

On pourra lire *ensuite* les dernières pages de remerciements.

... pour finir et avec nos remerciements !



Figure n° 152: Les sept cavernes. Extrait du mythe toltèque de la patrie originelle. (Scwenk 1963 : 133)
Les volutes spiralées représentent le courant des paroles.



Figure n° 153: Frise ancienne représentant par des zigzags la parole humaine qui sort de la bouche.

(Panconcelli-Calzia 1961 : 135)



Figure n°154: Chapiteau bas roman, Tavan, Indre-et-Loire (photo prise et offerte par un ami)

La parole a souvent été représentée comme une épée ou une flamme sortant de la bouche. Ici, de ce visage archaïque et bas roman, sort la langue, cette troisième main !



Figure n°155: Chapiteau bas roman, Tavan, Indre-et-Loire (photo prise et offerte par un ami)

Étranges visages archaïques romans d'où sortent des flots... de parole. Un ruban d'une structure saccadée va de la bouche centrale à celle située dans l'ombre, à sa gauche, qui correspond à la droite sur la photographie. Ce deuxième visage en profil est placé de telle sorte qu'il est toujours situé dans l'ombre. Il est à gauche, du côté sinistre (*sinistra* : la gauche en espagnol) du visage central : sorte de « dialogue de sourds dans l'obscurité ».

L'autre côté, placé pour être toujours dans la lumière, représente un étrange courant en forme de huit, fait de lignes parallèles qui *coulent*, forment un nœud, puis *reviennent à l'oreille* de cette bouche parlante, tel une « boucle audio phonatoire ». Là encore, l'expérience naïve ou intuitive de la phonation de ces époques reculées du Moyen Age est inscrite dans la pierre.

Que représente ce noeud ? Quel est ce retour de la parole dans cette lemniscate ?

Mes remerciements :

Chaleureux remerciements

Besançon

Prof. Jean-François P. Bonnot

Sciences du Langage
Université de Franche-Comté

devenu malgré lui mon nouveau directeur de thèse
Il a repris avec un intérêt grandissant et encourageant
un thésard avec un sujet vraiment atypique

Gabrielle Konopczynski

mon ancienne professeur

qui m'a fait confiance dès le début

LIMSI-CNRS d'Orsay

François Lusseyran

chercheur en mécanique des fluides,

qui s'est de suite intéressé à mon sujet
et m'a spécialement accompagné et soutenu
toutes ces années.

Pour toutes ces séances de visualisation
et son hospitalité au sein de sa famille

Lyon

Prof. Michel Roger

Chercheur en aéroacoustique
Ecole Centrale

pour son réel intérêt, son écoute et ses points de vue

Grenoble

Prof. Christian Abry

Phonétique expérimentale
Université Stendhal, Grenoble

Besançon

Prof. Sylviane Cardey
Sciences du Langage (TAL)
Université de Franche-Comté

Pour la participation au jury de ces deux professeurs
merci pour ce geste collégial
alors que nous ne nous connaissions pas

Paris : LIMSI-CNRS d'Orsay

Pierre Gougat
Thierry Faure
Les mécaniciens des fluides
Collègues de François Lusseyran

Pour leur accueil, le temps investi et leur intérêt

Strasbourg

L'équipe de l'Institut Phonétique de Strasbourg
pour leur accueil collégial

Jean-Pierre Zerling
Rudolf Sock
Phonéticiens

Gilbert Brock
Technicien

Lyon

Christelle Dodanne
Dr en phonétique
Son vif intérêt, son soutien, ses remarques compétentes
son accueil dans son foyer pour travailler sur « une syllabe »

Et encore :

Colmar

Jean Hêches, cinéaste et réalisateur
Laure Keller, locutrice
Nael Keller, locuteur
Alexandre Fonné, locuteur
et trois autres jeunes locuteur restés anonymes

Sélestat

Philippe Trottet
technicien audiovisuel

pour ces centaines heures passées ensemble sur le montage de mon film
à côté de ses tâches de jeune père de famille
pour sa chaleur et sa patience de franc-comtois

Mes remerciements aussi à tous les amis d'Allemagne et de France qui m'ont
soutenu moralement et parfois financièrement pour mener à bien ce travail.

Pour Nicole ma compagne

Table des matières

Sommaire	1
Introduction	3
Première partie : contexte théorique	
Chapitre I – Le phénomène des tourbillons dans la nature	19
1. La turbulence : énigme toujours actuelle	25
2. La turbulence et les tourbillons	26
3. Vortex ou vorticité ? 28	
4. Tourbillons, spirales et vortex	31
4.1. Tourbillons libres dans un milieu fluide	31
4.2. Tourbillons libérés à la sortie d'une embouchure ou d'un ajutage	33
4.3. Remarque sur les jets	34
4.4. Les jets tourbillonnaires pulsants	35
4.5. Tourbillons créés par des obstacles au sein d'un fluide	36
4.6. Un type de tourbillons de « contournement » : la turbulence de sillage	37
4.7. Les allées ou chaînes tourbillonnaires	40
5. Une notion de physique : le nombre de Reynolds et la turbulence	41
6. Le chaos et la turbulence	42
7. Les tourbillons et la turbulence comme moyen de locomotion	44
8. Une autre énigme, encore : le son	44

1. L'énigme des « puffs » glottiques	50
1.1. Le cycle glottique et la vibration des cordes vocales	50
1.2. Le rôle des récepteurs baro-sensibles au sein du larynx	57
1-3 Les oscillations auto-entretenues de la glotte : l'effet de Bernoulli ne suffit pas	62
1.4. La génération du bruit et la turbulence	65
1.5 L'énigme des « puffs » glottiques et les tourbillons : leur actualité	66
1.6 Lafon : La phonation et les tourbillons	70
1.6.1 Les tourbillons et le son	70
1.6.2 La « forme acoustique » de la voix : « pouffs » et tourbillons	71
1.6.3 Impulsion et larynx	73
1.6.4 Impulsion et cavités supra-laryngées	73
1.6.5 Impulsion et phonème	74
2. Modélisations actuelles de la glotte en aérodynamique et aéroacoustique	76
2.1. Pelorson et les phénomènes tourbillonnaires au sein de la glotte	76
2.2. Un autre exemple de recherche sur des modélisations physiques des cordes vocales ..	80
3. Les tourbillons et la génération du son dans l'air	81
4. Les tuyaux d'orgue	85
4.1. Les tourbillons générateurs de son dans les tuyaux d'orgue	85
4. 2. Études récentes au laser sur les structures tourbillonnaires de la lame d'air	
dans la production sonore des tuyaux d'orgue	87
5. La théorie acoustique requestionnée : les Teager ouvrent une brèche sur les tourbillons ..	90
6. Phénomènes pulsatoires et tourbillonnaires à la sortie d'un résonateur	93

Deuxième partie : Rares recherches sur les formes aériennes des sons du langage à la sortie de la bouche et aspects théoriques

Chapitre III – Les recherches de la pionnière Johanna Zinke : les formes aériennes des sons du langage 100

1. La découverte des « formes aériennes des sons du langage »	103
2. Confirmation par la méthode strioscopique	108
3. Un choix de sons isolés du corpus de Zinke	110
4. Directions du souffle et morphodynamiques	116
5. La bonne articulation et son empreinte dans l'aérodynamique	117
6. La constitution psychosomatique du locuteur	118
7. L'impact émotionnel dans les formes aériennes : les genres littéraires	119
8. La voix parlée et la voix chantée	120
9. Les visualisations cinématographiques et la morphodynamique	123
10. La méthode interférométrique et une étrange découverte	128

Chapitre IV – Les recherches de Boris Rybak et les turbulences phonatoires externes 133

1. Le capteur V.A.P et l'aérophonie	137
2. Les turbulences phonatoires externes et l'ordre chaotique	140
3. Le code lingual	146
4. La boîte noire phonatoire	160

Troisième partie : approche expérimentale

Chapitre V – Objectifs, méthode, protocole expérimental	169
1. Objectifs	175
2. Méthode	176
3. Prises de vue	178
3.1 Faisabilité et reproductibilité : un, deux, puis cinq locuteurs	178
3.2. Prises de vues au laser au LIMSI d'Orsay: deux locuteurs	178
3.3 Ensemencement de l'air par la fumée de cigarettes d'eucalyptus	179
4. Matériel et moyens techniques pour les prises de vue des essais de faisabilité et d'études de reproductibilité	180
5. Acquisition du corpus	181
5.1. Première étape : Films 25 im/s	181
5.2. Deuxième étape : visualisations avec 100 images/ seconde et éclairage au laser (tomoscopie)	181
6. Le corpus	182
6.1. Premier film : Essais de faisabilité	182
6.1.1. Deuxième film : Essais n° 1 : [a,e,i,o,u,] isolées , [d, t -,g, k -,b,p,l,m,v] isolées et les syllabes CV [ba,be,bi,bo,bu]	183
6.1.2. Essais n° 2 : Reproductibilité - Les syllabes CV [da,de,di,do,du]	183
6.1.3. Essais n° 2 : Reproductibilité- Les syllabes CV [na,ne,ni,no,nu].....	183
6.1.3.1. [an]	184
6.1.3.2 Essais n° 3 : Reproductibilité - Les syllabes C ₁ V ₁ C ₂ [bak, bèk,bik,bOk,buk]	184
6.1.4.Essais n° 4 : Reproductibilité : Mots de deux syllabes : C ₁ V ₁ C ₂ V ₂ [bato] et ... [pato]	184
6.2 Deuxième film : Reproductibilité et étude dans les trois axes : profil, face, dessous ..	185
6.3. Prises de vue au LIMSI	186
6.3.1. Premières prises de vue	186
6.3.2. Deuxièmes prises de vue	186
6.4. Troisième prises de vue au LIMSI avec son: les syllabes C ₁ V ₁ C ₂ [bak,bèk,bik, bOk,buk]	186
7. Analyses morphodynamiques	188
7.1. Analyses morphodynamiques des films à 25 images/s	188

7.2. Analyses morphodynamiques des films au laser, 100 images/s	189
6.3. Prises de vue au LIMSI	182
6.3.1. Premières prises de vue	182
6.3.2. Deuxièmes prises de vue	183
6.4. Troisième prises de vue au LIMSI avec son: les syllabes C ₁ VC ₂ [bak,bèk,bik,bOk, buk]	183
7. Analyses morphodynamiques	185
7.1. Analyses morphodynamiques des films à 25 images/s	185
7.2. Analyses morphodynamiques des films au laser, 100 images/s	186

Chapitre VI – Analyses descriptives : morphodynamique et acoustique 191

1. Analyses descriptives des morphodynamiques des sons et syllabes sur le support cinématographique du DVD	195
1.1. Visualisations 25 images/s et analyse descriptive des morphodynamiques.....	195
1.2. Visualisations 100 images/s de la syllabe [bèk] à l'aide d'une nappe de laser (ou tomoscopie)	195
2. Analyses descriptives : morphodynamique et acoustique de cinq syllabes [bak] et [bèk] avec deux locuteurs	196
3. Description et analyse morphodynamique et acoustique	198
3.1 la syllabe [bèk] (# 3 ^e lor) par une locutrice	198
3.2 : Les quatre autres analyses des syllabes [bak] et [bèk] : voir sur le CD ROM	228
4. Bilan de l'analyse des deux syllabes [bak] et [bèk]	228
5. Remarque du spécialiste en aéroacoustique sur nos syllabes C ₁ VC ₂ [bak] et [bèk], 100 images/s	230
6. Essai de vélocimétrie par images de particule (PIV) et l'analyse de la syllabe [bak]	231

7. DVD - 5e partie : Turbulences et phonétique (7 min)	235
7.1. Remarque sur la voyelle [e]: ses structures morphodynamiques intrinsèques	235
7.2. Reconstitutions de la langue en 3D des voyelles [a, è, e] : leur impact sur les écoulements phonatoires	237
7.3. Un précurseur d'une phénoménologie aérodynamique du langage : Wolfgang von Kempelen	240
Conclusion et perspectives	249
Table des matières	263
Bibliographie générale	275
Annexes I, II, III, IV intégrées à cette thèse	1 à 83

Bibliographie générale

- Abitbol, Jean (2005). *L'Odyssée de la Voix*. Paris, Robert Laffont, 516 p.
- Aderhold, Egon (1962). Körpermotorik und Sprechmotorik - ein Beitrag zur Sprecherziehung des Schauspielers. In *Wiss. Zeitschrift .d. M. Luther Universität*. Halle, Dez. 1962: 1529-1535
- Ayres, Anna Jean (2002). *Bausteine der Kindlichen Entwicklung*. (Sensory Integration and the Child, 1979) Berlin, Springer, 338 p.
- Barney, A., Shadle, C.H., Davies, P.O.A.L. (1998). Fluid flow in a dynamic mechanical model of the vocal folds and tract. I. Measurements and theory. In *J. Acoust. Soc. Am.* 105(1), pp. 444-455
- Barrault Jean-Louis (1972). *Mise en scène de Phèdre*. Paris, Editions du Seuil, 222 p.
- Bekkermann, Henrik, von Bonin, Dietrich, Fruehwirth, Matthias, Cysarz, Dirk and Moser, Maximilian, (2001). Effects of speech therapy with poetry on heart rate rhythmicity and cardiorespiratory coordination. In *International Journal of Psychophysiology*, March 2001
- Bekkermann, Henrik, von Bonin, Dietrich, Fruehwirth, Matthias, Cysarz, Dirk and Moser, Maximilian, (2002). Oscillations of heart rate and respirations synchronize during poetry recitation. In *International Journal of Cardiology*; 84:77-88
- Bekkermann, Henrik, von Bonin, Dietrich, Fruehwirth, Matthias, Cysarz, Dirk and Moser, Maximilian, (2004). Oscillations of heart rate and respiration synchronize during poetry recitation. In *American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology*; 287:H579-H587
- Berthoz, Alain (1997). *Le Sens du Mouvement*. Paris, Odile Jacob, 345 p.
- Best, Catherine (1993). Learning to perceive the sound pattern of english in C.Rovee-Collier and L. Lipsitt (Eds) : *Advances in Infanc~ Research*, Ablex Publ. .p. 99 Annexe 1 : p. 29:
- Best, Catherine (1994). Développement de la perception des sons de parole de différentes langues au stade préverbal. In : G. Konopczynski et S. Vinter (Eds): *Colloque: Le Développement Langagier*. Besançon: L'Ortho-Edition, 19-29
- Bouasse, Henri (1931). Tome I, *Tourbillons (Forces acoustiques et circulations diverses)*. Paris, Librairie Delagrave,
- Bouasse, Henri (1932). Tome II, *Tourbillons (Forces acoustiques et circulations diverses)*. Paris, Librairie Delagrave,
- Bourdet, Julien (2005). Les dix grandes énigmes de la physique. In *Journal du CNRS*, n° 180 1:
- Boysson-Bardies de Bénédicte (1999). *Comment la Parole Vient aux Enfants*. Paris: Odile Jacob, col.Opus, 302p. .
- Cavaillé-Coll Aristide (1895). *Tuyaux d'orgues*. Institut de France, Académie des Sciences. Paris, 28 janvier 1895.
- Clute, John (1995). Science-Fiction. In *Die illustrierte Enzyklopaedie, Munich*,
- Cole, Jonathan (1998). *Ueber das Gesicht*, Munich, Verlag Antje Kunstmann, trad. de l'anglais, Cambridge, MIT, 1999.
- Condon, William and Ogson W.D. (1966). Sound Film Analysis of Normal and Pathological Behavior Patterns. In *The Journal of Nervous ans Mental Disease*, Vol 143, n° 4. 338-347
- Condon, Williams and Sander L.W. (1974). Neonate movement is synchronized with adult speech. interne interactional participation and language acquisition. In *Science*, 183 : 99-101
- Cornut, Guy (1983). *La Voix*. Paris, PUF, coll. Que sais-je, 125 p.
- Cosnier, Jacques et Brossard, Alain (1984). *La Communication Non Verbale* Paris: Delachaux & Niesdé, 244 p.
- Cytowic, Richard (1993). *Farben hoeren, Toene schmecken*. Édition allemande, Munich, DTV, 1993, 301 p.

Deverge, Mickael (2002). *Comparaison de modèles théoriques simples aux résultats de mesures sur modèle in-vitro rigide*, Rapport de stage de DEA : Acoustique Appliquée, 16 Juillet 2002, Université du Maine, Laboratoire d'Acoustique

Dramble, D.M. and Carrier, D.R. (1983). Running and breathing in mammals. In *Science*, 219, 251-256

Dupon-Martin (1995). Les modalités d'évaluation objective dans le domaine de la communication non verbale. LIMSI d'Orsay. (Copie incomplète).

Engwall, Olov (2000). A 3D tongue model based on MRI data. In : Yuan, B., Huang, T., & Tang, X. (Eds.), *Proc of ICSLP 2000, 6th Intl Conf on Spoken Language Processing* (pp. 901-904). Beijing.

Fadiga, Luciano, Craighero, Laila, Buccino, Giovanni and Rizzolatti, Giacomo (2002). Speech listening specially modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study. In *European Journal of Neuroscience*, Vol. 15, pp. 399+402,

Floel, Agnes, Elger, Tanja, Breitendtein, et Caterina and Knecht, Stefan (2003). Language perception activates the hand motor cortex : implications for motor theories of speech perception. In *European Journal of Neuroscience*, Vol. 18, pp 704-708,

Frisch, Uriel (2000). *La turbulence*. Texte de la 177e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 25 juin 2000 par Uriel Frisch, Directeur de recherche au CNRS, 25 juin 2000. Internet : www.obs-nice.fr/etc7/utls/

Gentilucci *et al.* (2001). Grasp With Hand and Mouth: A Kinematic Study on Healthy Subjects. In *J Neurophysiol* . Vol 86 • October 2001, 1685-1699

Grimm, Jacob (1851). Über den Ursprung der Sprache. In C.Hutton : *18th and 19th Century German Linguistic*-London :Roudedge/Thoemmes Press, 1985 :103-140

Heuillet-Martin, Geneviève, Garson-Bavard, Hélène, Legré, Anne (1997). *Une Voix pour Tous*. Marseille, SOLAL, 204 p.

Huygue, René (1971). *Formes et Forces*. Paris, Flammarion, 443 p.

Jacquin Laurent, Tabelaing Patrick (2006), *Turbulence et Tourbillons* .Ecole Polytechnique.

Janke, Reiner (1997). Der Einfluss von Kernstichen auf Klang und Luftblattströmung. Source Internet: <http://members.aol.com/ReinerJank/emden.htm>

Jonas, Doris and David (1979). *Das Erste Wort. Wie die Menschen sprechen lernten*. Hamburg, Uhlstein, 1982, 234 p.

Kato, Takaaki *et al.* (1983). A computer Analysis of Infant Movements Synchronized with Adult Speech. In *Pediatr.Res.* 17 : 625-628

Kempelen von, W (1791). *Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung einer Sprechenden Maschine* ». Réédition fac-similé, Stuttgart, Friedrich Frommann, 1970.

Koike Y, Hirano M., Leden H. (1967) Vocal Initiation: Acoustic and Aerodynamic Investigation of Normal Subjects. In *Folia phoniat.* 19 : 173-182 p.

Kolzowa, Mariela, (1975). Untersuchungen zur Sprachentwicklung. In: *Der Kinderarzt, 6.Jahrg. (1975) Nr.6, p. 643-648; Nr. 7 : 757-758*

Konopczynski, Gabrielle (1990). *Le langage Emergent : Caractéristiques Rythmiques*. Hamburg, Helmut Buske Verlag, B.60, 362 p.

Konopczynski, Gabrielle 1991 : *Le Langage Emergent : Aspects vocaux et mélodiques*. Hamburg, Helmut Buske Verl., B.61, 425 p.

Ladefoged, Peter (2005). Preliminary studies on respiratory activity in speech.

Nouveau titre: The control of speech. In *A Figure of Speech : a Festschrift for John Laver*. Source : Homepage de Ladefoged : <http://www.linguistics.ucla.edu/people/ladefoge/>

- Lafon, Jean-Claude (1961). *Message et Phonétique*. Paris, PUF, 165 p.
- Lafon, Jean-Claude (1971). Essai sur la physiologie du son laryngé. In *Compte-rendu d'un colloque en présence de Abramson, Linqvist, Smith,.....*, 17-28 (source inconnue)
- Lenneberg, E.H. (1967). *Biological Foundations of Language*. New York, John Wiley. Édition allemande *Biologische Grundlage der Sprache*. Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1972. , 597 p.
- Leroi-Gourhan, André (1964). *Le Geste et la Parole.. Techniques et Langage*. Paris, Albin Michel, 323p.
- Leroi-Gourhan, André (1965). *Le Geste et la Parole: La Mémoire et les Rythmes*. Paris, Albin Michel, 285p. 1
- Lesieur, Marcel (1994). *La Turbulence*. Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble, 262p.
- Liberman, Alvin M. et Mattingly, Ignatius G. (1985). The motor theory of speech behavior revised. In *Cognition* 21.: 1-36
- Llorca, Régine (1994). Techniques de travail oral pour l'intégration sensorielle d'une langue étrangère .In *Die Neueren Sprachen* 93. Frankfurt, Diesterweg, 587-606
- Llorca, Régine (1995). Le rapport geste/parole sous l'angle rythmique. *Actes du Colloque « Verbal- Non verbal: Frères Jumeaux de la Parole »* CLA Besançon/ ANEFLE. Juin 1995, 29-43
- Lugt, Hans J.(1979). *Wirbelstroemung in Natur und Technik*. Karlsruhe, G. Braun.
- Lutzker, Peter (1996). *Der Sprachsin*. Stuttgart, Fr.Geistesleben, 325 p.
- Lynch, James J. (1985). *The Language of the Heart*. New York: Basic Books Inc. Traduction allemande utilisée : 1987: *Die Sprache des Herzens - Wie Unser Koerper im Gespraeh Reagiert*. Paderborn, : Junfermann, 477 p.
- MacNeilage, Peter F.(1998).The frame/content theory of evolution of speech production. In *Behavioral and Brain Sciences*,21,499-546
- Mehler, Jacques, Dupoux, Emanuel (1995). *Naître humain*. Paris : Odile Jacob : 281 p.
- Meyer von, G. H. (1880). *Unsere Sprachwerkzeuge und ihre Verwendung zur Bildung der Sprachlaute*. Leipzig. Les organes de la parole et leur emploi dans la formation des sons du langage. Paris, F. Alcan, 1885, 248p., traduit de l'allemand par O.Claveau. PDF gratuit de cet ouvrage admirable sur Internet : <http://gallica.bnf.fr/>
- Minnigerode, B. (1966). Bau und Funktion des Sinus Morgagni fuer die menschliche Stimmbildung in neuer Sicht. *Arch.klin.exp.Ohr-, Nas-u. Kehlk. Heilk.* 187, 845 p. Cité par Wendler (voir plus bas)
- Mongeau, Luc and Thomson, Scott. (Sans date,). *Analyse du flux énergétique dans la modélisation physique et numérique des cordes vocales*. Internet : www.sfa.asso.fr/en/gsam/manifestations/levres/mongeau.pdf
- Moore, P. (1991). A short history of laryngeal investigation. In *Journal of Voice*,5(3), 266-281
- Nagel, W.(1908). *Handbuch der Physiologie des Menschen* ,Braunschweig,Verlag von Friedrich Vieweg,(696-697)
- Narayanan, S., Alwan, A., and Haker, K.(1995). MR Images of Fricatives, *JASA* 98 (3), September 1995, pp. 1325-1347
- Narayanan, S., Alwan, A., and Haker, K. (1997). MR Images of the Laterals. In *JASA*, Vol. 101, No. 2, 1064-1077
- Negus, V.E. (1949). *The Comparative Anatomy and Physiology of the Larynx*. New York, Hafner Publishing Company, 230 p.
- Neppert, Joachim M.H. (1999). *Elemente einer Akustischen Phonetik*. Hambourg, Helmut Buske, 349 p.
- Ormezzano, Yves (2000). *Le Guide de la Voix*. Paris, Odile Jacob, 432 p

- de Rosa, Oliveira, Pereira, Marcelo and Carlos; José, Grellet, Marcos, Alwan, Abeer (2003). A contribution to simulating a three-dimensional larynx model using the finite element method. In *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 114, No. 5, 2893-2905
- Panconcelli-Calzia, Giulio (1961). *3000 Jahre Stimmforschung*. Marburg, Elwert, 146 p.
- Pelorson, X., Hirschberg, A., van Hassel, R.R., and Wijnands A.P.J. (1994). Theoretical and experimental study of quasisteady-flow separation within the glottis during phonation. Application to a modified two-mass model. In *JASA*, 96 (6), 3416-3431
- Pelorson, X., Hirschberg, A., Wijnands A.P.J. and Bailliet, H (1995). Description of the flow through in vitro models of the glottis during phonation. In *acta acustica*, 3, n° 2, 119-232
- Pelorson, Xavier (...). Une approche intuitive de la phonation (plus particulièrement la production de sons voisés comme les voyelles. Internet : www.sfa.asso.fr/fr/gsam/manifestations/levres/pelorson.pdf
- Recondo de, Jean (1995). *Sémiologie du Système Nerveux*. Médecine-Sciences, Flammarion, Paris, 483 p.
- Roehmer, W (1987). Hrsg: *Grundzuege des funktionalen Stimmtrainings*. Koeln, Verlag O.Schmidt, 249 p.
- Rybak, Boris (1977). Mécano-électronique ventilatoire et topoélectronique. In *L'onde électrique*, 57, n° 6-7, 455-456.
- Rybak, Boris (1978). La phonétique, la dialectologie et la linguistique analogiques ventilatoires. In *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 47e année, n° 1, 17-33.
- Rybak, Boris (1979). Principe pour contribuer à la mise en évidence d'universaux phonatoires par phonétique analogique ventilatoire. In *Actes du Colloque de la Sorbonne Nouvelle* (Paris III), 169-174.
- Rybak, Boris (1979). Ventilomètre portable. In *Advanced Technobiology*. Edited by Boris Rybak, Sitjhoff et Noordhoff, 276-286.
- Rybak, Boris (1980). Film : *Turbulences phonatoires externes : 16mm, muet, couleur, 480 im/sec*. ONERA, mars 1980.
- Rybak, Boris (1980). Turbulences phonatoires externes. Note de Boris Rybak présentée par Pierre Lépine. In *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 291, série D, 533-535.
- Rybak, Boris (1980). Principes propédeutiques pour les sciences des langages. In *Bulletin de psychologie*, 480- 492.
- Rybak, Boris (1982). Résultats préliminaires d'échotomographie phonatoire. Note de Boris Boris Rybak et François Duchâtel. In *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 294, série III, 855-857.
- Rybak, Boris (1987). *L'ordre chaotique*. Disponible sur Internet : www.burcomm.net
- Rybak, Boris (1988). Correspondances morphologiques entre les mouvements linguaux et les écoulements d'air buccaux pendant la phonation. In *Revue européenne de technologie bio-médicale*, 10, n° 6, 292
- Rybak, Boris (1990). *L'identité humaine*. Paris, Jean-Michel Place ; coll. Surfaces : 99 p.
- Rybak, Boris (1991). Le code lingual. (*Communication au Centre de Phonétique et de Sémiologie Scientifiques*). In *Bulletin du Conseil Scientifique*, 9, juillet 1991, 4.
- Rybak, Boris (1993). Le code lingual (conf. 27 janvier 1992). In *Innovation et Technologie en Biologie et Médecine*, vol. 14 n°1, 113-123.
- Rybak, Boris (1993). Le code lingual: récents progrès. In *Nouvel Art du Français*, 7-8.
- Rybak, Boris (1994). Le code lingual : récents progrès II. In *Nouvel Art du Français*, 11.
- Rybak, Boris (1994). La boîte noire phonatoire. In *Nouvel Art du Français*, 32.
- Rybak, Boris (1995). Mise en évidence d'homotopies surfaciques de la langue en cours de phonation. Lettre à l'éditeur. In *J.E.M.U.* Paris, Masson, 16, n°4, 170-171.
- Rybak, Boris (1995). De la vie au verbe (conf. 11 février 1995). In *Nouvel Art du français*, 23-26.
- Rybak, Boris (1997). Le code lingual de la parole. In *Bulletin de l'Académie Nationale de Chirurgie Dentaire*, 43, n° 3, 107-114.

- Rybak, Boris (2001). *Le code lingual. Conférence au Conservatoire National des Arts et Métiers*. Disponible sur Internet : www.burcomm.net
- Saks, Oliver (1989). *Seeing Voices :A Journey into the World of the Deaf*. Berkeley, University of California Press
Edition allemande utilisée: *Stumme Stimmen*, Hamburg : Rowolt T.B., 1992, 253 p.
- Sampaio, E., S. Maris and P.Bach -y-Rita (2001). Brain plasticity: 'Visual' acuity of blind persons via the tongue. In *Brain Research* 908, July, 13: 204.
- Schubert von, Gotthilf Heinrich (1850). *Die Geschichte der Seele*. Hildesheim, Georg Olm Verl., Reprint 1961 : 574p.
- Schwartz, Jean-Luc (2007). Du Contrôle Orofacial des Gestes dans la Communication chez les Primates. OG - Speech project. Internet : www.icp.inpg.fr/OHLL/lesPages/gestAff.php?&page=5 -
- Schwenck, Thedor (1963). *Le Chaos Sensible*. Paris, Triades, 213 p.
- Sciamarella, D., d'Alessandro C. (... ;). Caractérisation acoustique d'un modèle d'écoulement glottique avec un point de séparation mobile. (<http://www.limsi.fr/RS2003FF/MECA2003/DFT2003/DFT8/dft8.html>)
- Shadle,C.H., Barney,A., Davies,P.O.A.L. (1998): Fluid flow in a dynamic mechanical model of the vocal folds and tract. II. Implication for speech production studies. In *J. Acoust. Soc. Am.* 105(1), pp. 456-466
- Smith, Svend (1953). Remarks on the Physiology of the Vibrations of the Vocal Cords. In *Folia Phoniatica : Vol. 6, N 3 ; 166 -178*.
- Stone, Maureen and Lundberg, Andrew J. (1996). Three-dimensional tongue surface shapes of English consonants and vowels.
In *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 99, No. 6, June,3728-3733 , Internet: speech.umaryland.edu/Publications/issp.pdf –
- Takemoto, Hironori (2001). Morphological Analyses of the Human Tongue Musculature for Three-Dimensional Modeling. In *JSLHR*, 44(1), 95-107
- Teager, H. M., and Teager, S. M. (1990). Evidence for Nonlinear Sound. Production Mechanisms in the Vocal Tract. In *Speech Production and Speech Modeling*, edited by W. J. Hardcastle and A. Marchal, NATO Advanced Study Institute Series D, Vol. 55,
- Thom, René (1990). *Apologie du logos*. Paris, Hachette, 643 p.
- Titze,Ingo R (2000). *Principles of Voive Production*.Iowa City, National Center for Voice and Speech, 409 p.
- Verhulst, Jos (1999). *Der Erstgeborene: Mensch und hoehere Tiere in der Evolution*. Stuttgart, Verl. Freies Geistesleben, 408 p.
- Vogt, Hans-Heinrich (1966). *Der Nuernberger Lernrichter,Lernmaschinen fuer ihr Kind ?* Stuttgart.
- Vygotsky, Lev (1997). *Pensée et Langage*. Paris, La Dispute, 537 p.
- Wallon, Henri (1949). : *Les origines de caractère chez l'enfant*. Paris, PUF, 1983, 301 p.
- Wendler,Juergen, Seidner, Wolfram, Kittel, Gerhard und Eysholdt, Ulrich (1996) *Lehrbuch der Phoniatrie*. Stuttgart, Georg Thieme, 427 p.
- Zartarian, Vahé (1997). *Vie. des Formes et Formes de Vie*. Sur le site de Zartarian : co-creation.net
- Zenner ,H.P.(1994). Physiologie und biochemische Grundlagen des normalen und des gestoerten Gehoers. In Naumann, H.N.,Helms, J., Herberhold, C. (Hrsg.).*Oto-Rhino-Laryngologie in Klinik und Praxis.Bd.1*, Ohr, Stuttgart:Thieme,1994:81-259
- Zinke Johanna (1965). Das Sichtbarmachen strömender Luftlautformen. In: *Jahrbuch des Museums Hohenleuben-Reichenfels*. Heft 1 in 4, 103-125

Zinke F. Johanna (1970). Schlierenoptische Untersuchungen an Luftlautformen. In: *Nachrichten von Zeiss*. Jena, 10. Folge, Heft 6/8, 246-252

Zinke F. Johanna (1972). Sprachlaute werden sichtbar. In: *Zeitschrift für Phonetik, Sprachwissenschaft und Kommunikationsforschung*. Berlin, Bd. 25, Heft 1-2, 126-139

Zinke F. Johanna (1978). Luftlautformen. In: *Beiträge zu einer Erweiterung der Heilkunst*. Gerabronn, Hohenloher Verl., 32 p.

Zinke F. Johanna (2001). *Luftlautformen sichtbar gemacht*. Stuttgart, Verl. Fr. Geistesleben, 160 p.

Zumthor, Paul (1983). *Introduction à la Poésie Orale*. Paris, Éditions du Seuil, 300 pages.

Sommaire des annexes

Sommaire des annexes	1
Annexe I - Cadre général : le larynx et la parole de l'homme en mouvement La longue « marche » vers la manifestation de la parole...oralisée	3
Annexe II - Bandes ventriculaires, ventricules de Morgagni et phonation	64
Annexe III - Morphogénèse - Réflexions	70
Annexe IV - Travail de la voix, de la parole et des gestes en rapport avec les morphodynamiques	78

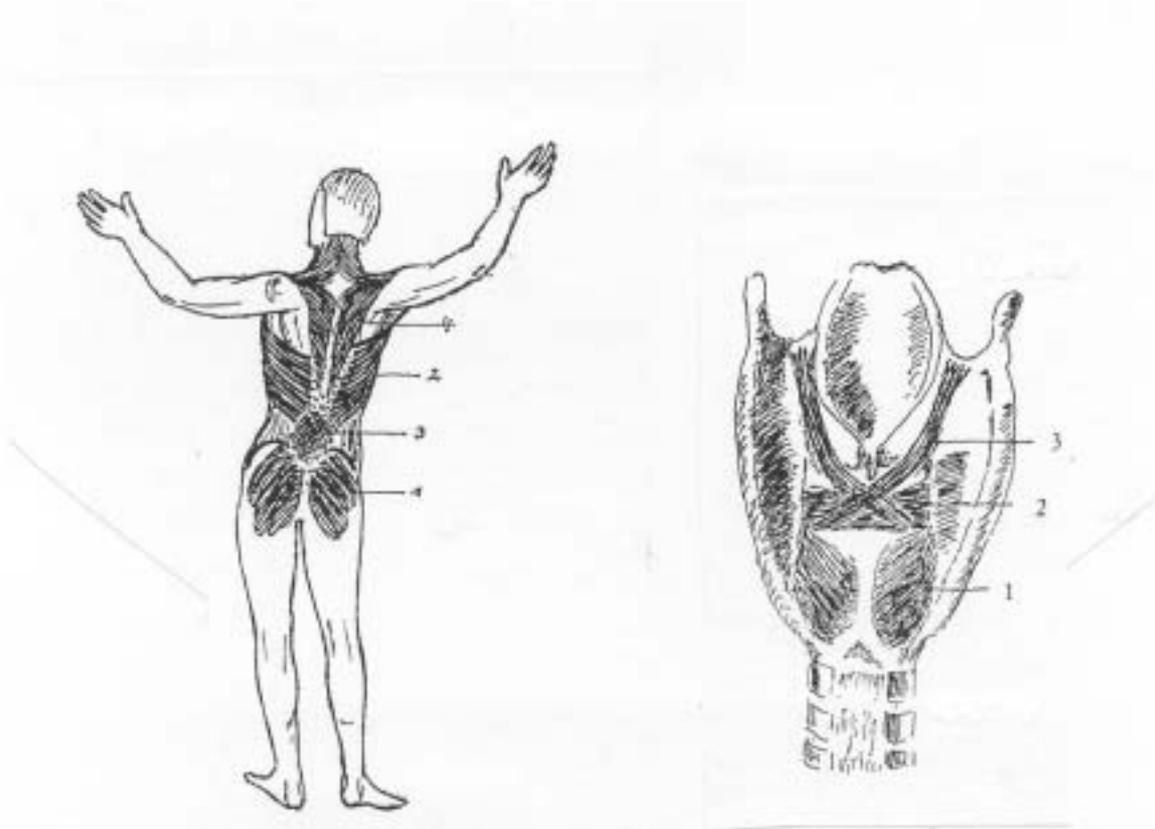
Annexe I

*Cadre général :
le larynx et la parole
de l'homme en mouvement*

Table de l'annexe I

1 La longue « marche » vers la manifestation de la parole...oralisée.....	7
1.1. Aspects phylogénétiques.....	7
1.2 Le rôle des rythmes	9
1.3. Tout le corps participe à la parole : la microkinésie	11
1.3.1 L'auto-synchronie	13
1.3.2 La « synchronie interactionnelle »	13
1.3.3 Les nouveaux nés et la synchronie microkinésique	14
1.3.4 Un support neuro-physiologique à la synchronie micro-kinésique ?.....	15
1.3.5 L'aspect pathologique	16
2. L'organisation des bras et des mains.....	18
2.1. Aspect phylogénétique	18
2.2 Le geste et la nature du langage	20
2.2.1. Les consonnes ne sont pas que des « bruits »	20
2.2.2. Les gestes et les « gestes articulatoires »	23
2.3. Développement de la motricité manuelle et langagière chez le bébé : une étude longitudinale faite en Russie	28
2.3.1 Signification de la faculté de parler.....	29
2.3.2 Conditions pour le développement langagier précoce	29
2.3.3 Développement du langage et motricité générale	30
2.3.4 Evolution des mouvements de la main et de la parole	31
2.3.5 Des faits connus en pathologie.....	32
2.3.6 En quoi est fondée cette relation entre les mouvements des doigts et la ... parole ?	33
2.3.7 Mesures électroencéphalographiques.....	33
2.3.8 L'entraînement des doigts	34
2.4. La motricité articulatoire dépendante de l'agilité manuelle et digitale	34

2.4.1 Troubles de coordination manuelle et digitale et troubles de co-articulation.....	35
4. « Le dialogue des cœurs » : la parole et son empreinte cardio-vasculaire.....	36
4.1. Les organes phonatoires et l'organisation de la parole chez l'être humain	41
4.2. Le larynx : un homme en miniature	43
Son lien avec la stature verticale et la mobilité gestuelle de l'organisation des bras.....	43
4.3. L'organe de la langue : cette troisième main	46
4.3.1. La langue : cette troisième main	47
4.3.2. L'organe de la langue et les doigts : une piste par la pathologie	57
4.3.3. L'écoute de la parole provoque chez l'auditeur une excitabilité différenciée des muscles de la langue	59
4.3.4. Le pouce et son rapport avec la bouche et le visage : symptômes pathologiques	60
4.3.5. Différents types de préhension influencent la production des sons du langage	62



Ceci n'est pas une analogie mais une homologie fonctionnelle.
(Source et explications dans le texte)

1 La longue « marche » vers la manifestation de la parole...oralisée

1.1. Aspects phylogénétiques

« *Le geste et la parole* » est le titre d'un ouvrage fondamental de l'anthropologue français, André Leroi-Gourhan, qui reste encore aujourd'hui un ouvrage de référence. Leroi-Gourhan commence avec une citation de Grégoire de Nysse (379 après J.C.) :

« Ainsi, c'est grâce à cette organisation que l'esprit, comme un musicien, produit en nous le langage et que nous devenons capables de parler. Ce privilège, jamais sans doute nous ne l'aurions, si nos lèvres devaient assurer pour les besoins du corps la charge pesante et pénible de la nourriture, mais les mains ont pris sur elles cette charge et ont libéré la bouche pour le service de la parole ».

Leroi-Gourhan :

*« On pourrait considérer la **mobilité** comme le trait significatif de l'évolution vers l'homme. Les paléontologistes ne l'ont pas ignoré mais il était spontané de caractériser l'homme par son intelligence plutôt que par sa mobilité et les théories ont porté d'abord sur la **proéminence du cerveau**, ce qui surtout à partir des primates, a souvent faussé l'interprétation des fossiles. La conquête de l'air libre, l'affranchissement par rapport à la reptation, l'accession à la bipédie sont des thèmes très bien étudiés depuis plus d'un demi-siècle. Mais il est tout de même caractéristique de voir qu'il y a dix ans à peine (donc en 1954), on aurait presque plus facilement accepté un quadrupède à cerveau déjà humain qu'un bipède aussi en retrait cérébralement que l'australopithèque. Cette vision "cérébrale" de l'évolution paraît maintenant inexacte et il semble que la documentation soit suffisante pour démontrer que le cerveau a profité des progrès de l'adaptation locomotrice au lieu de les provoquer » (Leroi-Gourhan, 1964 : 41-42).*

Nous ne faisons que résumer les conclusions de Leroi-Gourhan sans passer par toute sa démarche d'explications nécessaires pour y arriver.

Leroi-Gourhan montre que la plus grande libération de la main (« *c'est une main très archaïque et très peu spécialisée* », dit-il ailleurs) permet ensuite l'apparition du changement crânien et, par là, la place au cerveau qui intègre aussi ces nouvelles facultés.

« La quantité de neurones affectées à chaque région du corpus est proportionnelle à la finesse du jeu à en tirer. L'homme actuel offre à peu près les proportions suivantes : 80% de l'aire 4 (d'après les aires de Brodmann, 1908) sont voués au contrôle moteur de la tête et du membre

supérieur. En d'autres termes, les deux pôles du champ de relation mobilisent les 8/10 du dispositif moteur-primaire. La langue, les lèvres, le larynx, le pharynx et les doigts à eux seuls représentent presque la moitié du total de l'aire 4 qui reflète dans le cortex les contrôles de la motricité...» (Leroi-Gourhan, 1964 : 119).

Puis Leroi-Gourhan amène le fameux « homunculus » qui, même si on sait aujourd'hui que les fonctions cérébrales sont plus interactives qu'on ne le pensait, est quand même un « reflet » utile pour comprendre certains rapports de la conscience au schéma corporel.

« L'expansion préfrontale reste très incomplète jusqu'à l'Homo Sapiens, mais la présence des aires d'association verbale et gestuelle est parfaitement concevable dès l'Australanthrope (qu'on appelait autrefois Australopithèque). A une station bipède et une main libre, donc à une boîte crânienne considérablement dégagée de sa voûte moyenne ne peut correspondre qu'un cerveau déjà équipé pour l'exercice de la parole et nous croyons qu'il faut considérer que la possibilité physique d'organiser les sons, les gestes, existe dès le premier anthropien connu. (...) A partir de là peut-être, une paléontologie du langage pourrait être tentée, paléontologie toute squelettique d'ailleurs, car il n'y a guère d'espoir de retrouver jamais la chaire des langues fossiles. Un point essentiel peut toutefois être dégagé : il y a possibilité de langage à partir du moment où la préhistoire livre des outils, puisque outils et langage sont liés neurologiquement et puisque l'un et l'autre sont indissociables dans la structure sociale de l'humanité. » (Leroi-Gourhan, 1964 : 127 et 163).

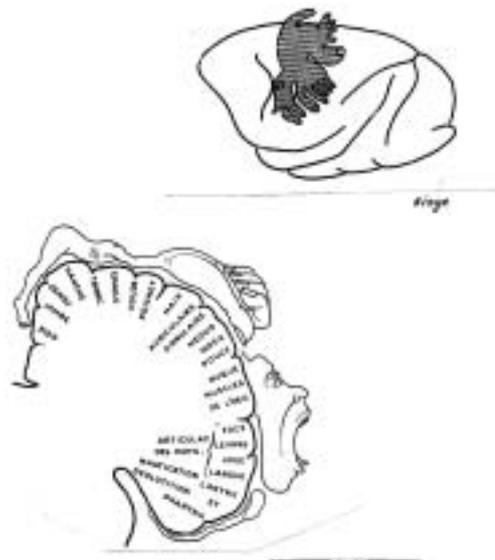


Figure n°1: La projection du schéma corporel dans la zone motrice et cerveau chez le singe et chez l'homme. (tiré de Leroi-Gourhan, 1964 : 121)

On notera l'immense place *du pouce et de la main mais pas du pied* comme chez le singe. Pour la compréhension des facultés humaines, de la parole, de l'intelligence, les remarques des anthropologues sont les suivantes et nous semblent très importantes : **le pouce est le sommet d'une évolution motrice**. Seul l'être humain développe et utilise l'opposition (l'opposition du pouce aux autres doigts jusqu'au petit doigt) ce qu'on appelle aussi « la prise de précision », et cela de manière aussi libre. Nous essaierons de montrer plus loin en quoi cette prise est liée à la possibilité de produire des syllabes et surtout de relier différentes consonnes comme fle, bre, gr, etc. On observe chez des jeunes chimpanzés des possibilités du pouce et de la main qui rappellent un peu celles de l'homme. Mais M.L. Tuttle (1969), spécialiste en la matière, conclut que la main de l'homme comme celle du singe africain viennent d'une forme originelle qui était plus proche de celle de l'homme que de celle du singe.

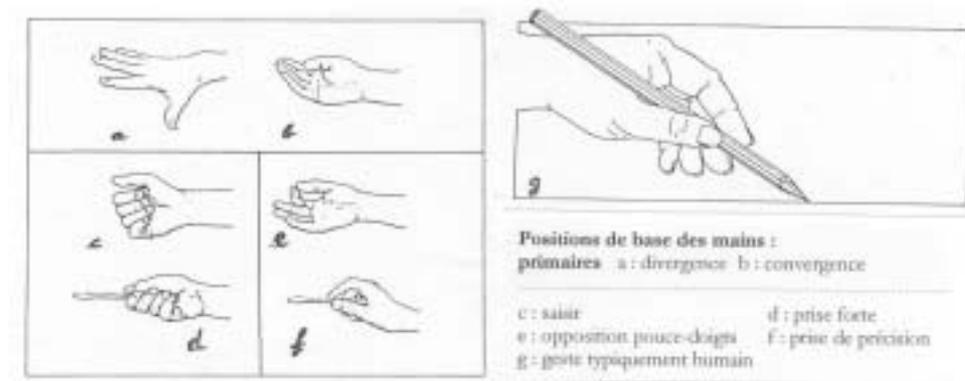


Figure n° 2 : La main et la préhension. (Verhulst, 1999 : 138)

1.2 Le rôle des rythmes

Leroi-Gourhan aborde aussi le rythme :

« Espace et temps n'existent que comme vécus que dans la mesure où ils sont matérialisés dans une enveloppe rythmique [...] L'une des caractéristiques opératoires de l'humanité dès ses premiers stades a été l'application de percussions rythmiques longuement répétées. Cette opération est même la seule qui marque l'entrée dans l'humanité des Australantropes puisqu'elle a laissé comme trace les choppers de galets éclatés et les boules polyédriques nées d'un long martèlement. Dès le départ, les techniques de fabrication se placent dans une ambiance rythmique à la fois musculaire, auditive et visuelle, née de la répétition de gestes de choc (S.M.: on pense au babillage et aux gestes frappés rythmiquement des jeunes enfants) (...)

Au piétinement qui constitue le cadre rythmique de la marche s'ajoute donc chez l'homme l'animation rythmique des bras ; alors que le premier régit l'intégration spatio-temporelle et se trouve à la source de l'animation dans le domaine social, le mouvement rythmique du bras ouvre une autre issue, celle d'une intégration de l'individu dans un dispositif créateur non plus d'espace et de temps, mais de forme » (Leroi-Gourhan, 1965: 135-136).

Là apparaît alors ce que Leroi-Gourhan appelle « *l'espace esthétique* ».

« Le rythme technique n'a pas d'imagination, il n'humanise pas les comportements mais de la matière brute. Alors que l'espace esthétique, lui, correspond à la musique, à la danse, au théâtre, etc. (...) »

Les premiers témoins d'une expression rythmique sont des fragments d'os ou des pierres marquées d'incisions régulièrement espacées qui apparaissent vers la fin du Moustérien et qui vers 30.000 au Chatelpéronien sont déjà très abondantes. Parmi toutes les hypothèses qu'on peut ici formuler à leur égard, on a vu (volume 1) que celle qui me semble la plus vraisemblable est que ces séries de traits répondaient au rythme des paroles (...) Il n'est pas impossible, mais il est indémontrable, que ces séries de traits aient représenté le rythme régulier de la vie animale, celui du cœur. Le monde naturel n'offre guère comme rythme régulier que celui des étoiles, celui des saisons et des jours, celui de la marche et celui du cœur qui, à des degrés variés, donne à la notion de temps la priorité sur celle de l'espace. A ces rythmes donnés se superpose l'image dynamique des rythmes que l'homme crée et façonne dans ses gestes et ses émissions vocales, puis finalement les traces graphiques fixées par la main sur les pierres et sur l'os » (Leroi-Gourhan, 1965 : 143-144).

Grâce à sa stature verticale par l'équilibre dynamique instable, l'être humain peut libérer ses bras et sa cage thoracique de la pesanteur et par là *sa respiration*. Les bras peuvent lui servir alors pour saisir et changer le monde matériel qui l'entoure, créer des formes et des objets mais aussi pour exprimer des mouvements psychiques de manière encore plus différenciée que les singes, par exemple. Par ce déplacement bipède en station verticale, la respiration se voit aussi presque toute détachée, libérée de la locomotion. L'être humain peut faire jusqu'à 4 pas sur une respiration. Le cycle typiquement animal par contre est cette synchronisation de la respiration avec les déplacements des membres pendant la marche : un pas, une inspiration (ce que nous connaissons seulement quand nous faisons par exemple de l'escalade).

Boysson-Bardy (de) (1999) parle du " *tube coudé* ", du larynx humain et de la descente du larynx qui se fait chez le nouveau-né. Vers cinq mois, l'enfant contrôle sa respiration – grâce aux cris entre autres - et son palais a pris la forme de celui de l'adulte, ce qui lui donne la

place pour sa langue. C'est d'ailleurs par cette forme de la voûte du palais, qui rend compte de la forme de la langue, que l'on peut, en paléontologie, savoir si un hominien fossilisé avait eu la possibilité de parler et comment. On peut aussi le savoir par la topographie des empreintes du réseau des veines méningées sur la face interne de la voûte crânienne fossilisée.

Ainsi c'est toute la stature verticale, la faculté locomotrice bipède et la préhension qui semble être la base de l'activité langagière humaine.

1.3. Tout le corps participe à la parole : la microkinésie

Remarque : Dans l'introduction de notre doctorat nous avons mentionné notre rencontre personnelle avec Condon. Il nous a offert un des rares films qui donne un aperçu de ses recherches sur la microkinésie. Kato avait vérifié les observations de Condon sur des nouveaux nés en 1984. Grâce à des caméras numériques et un traitement des images par ordinateur il a pu, avec ses collègues, affiner et confirmer les résultats de Condon. Nos tentatives de nous procurer un extrait vidéo auprès de Kato au Japon sont restées infructueuses malgré l'aide d'un ami médecin japonais. Ainsi ces recherches reposent dans les archives d'une université et attendent un jour pour être mises en valeur.

D'après William S. Condon (1976), la démarche méthodologique est fondamentale pour la recherche, mais pas simplement au sens d'une chose méthodique, c'est-à-dire ordonnée, linéaire. Par « démarche méthodologique », il entend la méthode employée et l'attitude du chercheur, sa vision du monde. Celle de Condon a été élaborée par des entretiens et des échanges avec Bateson et Birdwhistell. Ce dernier a été en 1950 le fondateur d'une nouvelle branche de la science comportementale : *la kinésie*.

Cette vision du monde ressemble à celle de Gibson et son courant de la psychologie de la perception appelée « psychologie écologique ».

C'est tout le problème des parties et du tout qui est repris ici, ce qu'on résume depuis 20 ans environ sous le nom de « systémisme ». Le point de vue adopté par Condon « *est qu'il y a une cohérence intrinsèque parmi les choses que nous percevons et sur lesquelles nous pensons, et que cette cohérence n'est pas créée par nous, mais découverte par nous.* » D'après Condon une telle démarche « *phénoménologique* », au sens d'Husserl, nous permet de ne pas briser le monde « *en fragments qui ne peuvent plus jamais être remis ensemble* ». Nous respectons

1.3.1 L'auto-synchronie

« Le comportement du locuteur se déroule selon une "hiérarchie" rythmique précise et intégrée qui semble être le cadre de base pour le discours du corps. [...] Nous utilisons le terme "hiérarchie" à contrecœur car, pour beaucoup, il connote des entités séparées contenues dans une succession de niveaux discontinus. La "hiérarchie rythmique" du comportement du locuteur a été analysée jusqu'à maintenant en 5 dimensions (Condon 1973). Celles-ci sont :

1. Les unités de processus qui correspondent en gros au phone,
2. Les syllabes,
3. Les mots,
4. Un cycle d'une demie seconde,
5. Un cycle d'une seconde.

Le cycle d'une seconde semble être une forme de base du rythme du locuteur. Différentes cultures organisent de différentes manières des sous-variations à l'intérieur de la hiérarchie rythmique. Ceci suggère que des cultures différentes ont des rythmes différents, ce qui peut provoquer des difficultés dans les communications interculturelles. Dans l'approche discontinue ou atomiste, on pense que les petites unités sont d'une certaine façon collées ensemble pour former des unités plus larges. Le concept d'un continuum organisationnel tel qu'il est présenté postule que les organisations d'un ordre inférieur sont intégrées dans des organisations plus larges qui les circonscrivent et qu'elles se déroulent simultanément [...] Le matériel qui précède concerne en premier lieu l'ordre qui règne dans le comportement du locuteur. La motricité corporelle n'est ni continue ni discontinue. Il semble qu'elle soit organisée à travers plusieurs dimensions. Ceci semble intrinsèque à l'organisme et le comportement linguistico-kinésique paraît suivre ces rythmes plutôt que l'inverse. Cela veut dire que la parole semble suivre les appels du rythme » (Condon, 1976 : cités par Cosnier, 1995 : 45-46 ; 56).

1.3.2 La « synchronie interactionnelle »

La deuxième découverte que fit Condon et qui est tout aussi fascinante c'est le phénomène de « synchronie interactionnelle » chez le locuteur.

« Parler et écouter sont tout deux des processus du même organisme biologique [...] En substance l'allocutaire bouge en synchronie presque aussi parfaite avec le discours du locuteur que le locuteur lui-même. La microanalyse suggère que tous les comportements humains normaux au niveau minimal se passent probablement en terme de formes, « d'unités de processus » (process unit) ...Ce comportement apparaît aussi bien quand la personne parle que quand elle écoute. La structure en « unités de processus » peut être la forme de base du

comportement. Pendant l'écoute, la durée des unités de processus de l'auditeur sont isomorphiques avec les durées des segments articulatoires de la parole du locuteur. Ainsi c'est dans les 50 ms que le changement d'organisation motrice de l'allocutaire reflète l'organisation du changement de la parole qu'il reçoit. Avec le flux continu des « différentes » formes sonores qui émergent dans la chaîne parolière, il y a une émergence parallèle de mouvements maintenus et organisés dans le corps de l'allocutaire. Il y a un processus de poursuite incroyablement précis et délicat. Métaphoriquement, c'est comme si le corps entier de l'allocutaire dansait en accompagnant la parole du locuteur avec précision et fluidité » (Condon, 1976 : cités par Cosnier, 1984 : 57-58).

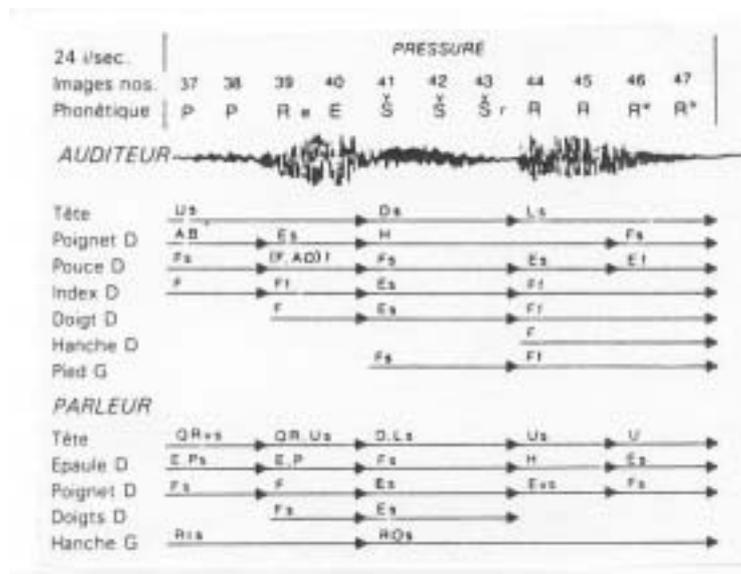


Figure n° 4 : Synchronie interactionnelle (Condon 1976, in : Cosnier, 1984 : 59)

1.3.3 Les nouveaux nés et la synchronie microkinésique

Condon étudia ces phénomènes encore plus précisément sur des nouveau-nés. Toutes ses expériences qui avaient été d'ailleurs contestées ont été refaites avec précision au Japon par Kato (1983: 625). Ce dernier fait les remarques suivantes:

« Nos recherches ont montré que les nouveau-nés, dès la première semaine, reconnaissent les voix et que non seulement leurs mouvements étaient en accord avec ceux de la voix de leurs mères mais aussi avec ceux de la voix du médecin ou de l'infirmière qui s'occupaient d'eux.(...) Nos résultats n'indiquent pas seulement que l'organisation du comportement moteur du nouveau-né réagit aux comportements langagiers, paroliers de l'adulte et cela de manière synchronique, mais aussi que les mouvements du nouveau-né influencent le flot et la structure de la parole des adultes » (Kato, 1983: 625).

Au cours de ces expériences, on a observé que ce phénomène de synchronie ne se produisait pas avec des sons qui n'avaient rien à voir avec du vrai langage, par ex. des syllabes réparties de manière hasardeuse. On a même mis en évidence que des bébés américains de deux jours montraient une réaction synchronique à la langue chinoise alors qu'ils ne répondaient aucunement à des sons frappés ou des voyelles qui n'avaient aucun rapport en elles.

Mais d'autres expériences ont été faites depuis et leurs résultats aussi très surprenants vont nous être utiles au cours de notre recherche :

« Les mouvements du nourrisson s'accélèrent quand les sons sont prononcés plus fortement, particulièrement les voyelles. Ceci est aussi caractéristique chez les adultes : ils accélèrent leur mouvement sur les voyelles. C'est comme si l'organisation des mouvements corporels du nourrisson était mise en place par la structure de la langue. » (Condon (1974), cité par Lutzker, 1996 : 185).

1.3.4 Un support neuro-physiologique à la synchronie micro-kinésique ?

« Une caractéristique du comportement des neurones dans le cortex primaire et leur remarquable sensibilité aux sons complexes tels que les clicks et la voix. Dans le cortex non anesthésié, jusqu'à 20% des neurones rencontrés ne répondent qu'à ces stimuli. Pour ces neurones, les stimuli tonaux simples ne font pas d'effet. Evans et Whitfield (1964) ont trouvé que 10% des neurones qui répondent aux stimuli tonaux n'y répondent que si la fréquence tonale varie. Ces stimuli à fréquence modulée ont été très efficaces pour la majorité des neurones qui répondaient aux tons. Des réponses vives et régulières ont été obtenues sur des neurones stimulées de façon régulière par des sons non modulés...De plus, beaucoup de ces neurones, et tous les neurones stimulés uniquement par des sons à fréquence modulée ont donné des réponses préférentielles à certaines directions de changement de fréquence. Ainsi quelques cellules ont répondu seulement ou mieux lorsque la fréquence sonore montait vers les tonalités hautes, d'autres lorsque la fréquence descendait. Certaines cellules ont donné des réponses orientées dans une direction de changement de fréquence à certaines fréquences, et dans l'autre direction à d'autres fréquences (Evans, 1968). » Condon ajoute : *« Parler et écouter pourraient utiliser tous les deux les mêmes processus organisateurs rythmiques du cerveau [...] Nous postulons cette organisation centrale pour les raisons suivantes : les parties du corps de l'allocutaire qui sont en mouvement entretiennent ensemble des relations parallèles à l'émission du son. »* (Condon, 1976, cité par Cosnier, 1995 : 60,62).

On peut voir combien Condon lui-même s'efforce de comprendre le phénomène surprenant et compliqué qu'il a découvert. Il dit :

« La question n'est pas de savoir s'il est nécessaire que le corps soit en synchronie avec le locuteur pour que l'écoute se fasse, mais plutôt que le corps se comporte caractéristiquement de cette façon pendant l'écoute. L'organisation isomorphe des changements moteurs de l'allocutaire avec la parole ne peut être relié au discours que secondairement. La synchronisation du mouvement de l'allocutaire peut n'être qu'un reflet périphérique d'un traitement neurologique central.

Ceci implique que la réception de la parole et du son ne peut se faire que si l'auditeur suit la structure du signal grâce à des processus neuro-biologiques organisés. [...] Le processus qui consiste à maintenir- isomorphiquement- avec peut être un format épistémologique de base de la perception. [...] En général, plus les deux interactants partagent les mouvements et les postures, meilleure est leur relation. [...] Ceci se passe naturellement en dehors du champ de la conscience.» (Condon, 1976, cité par Cosnier, 1995 : 63-65).

1.3.5 L'aspect pathologique

Condon finit la supervision de son travail par des remarques sur l'aspect pathologique de la « synchronie interactionnelle »:

« L'analyse de films d'enfants présentant des dysfonctions a conduit à l'observation que ces enfants étaient entraînés par le son plusieurs fois, comme si le son se réverbérait. [...] Nous avons étudié aussi des films sonores d'enfants aphasiques, retardés ou victimes d'une paralysie cérébrale. Tous présentent la même réponse multiple au son, caractéristique commune à diverses formes de dysfonctions de l'enfant, allant de la plus légère à la plus sévère »

(Condon, 1976, cité par Cosnier 1980: 66-67).

Ce qu'on observe c'est que l'enfant perturbé réagit avec un retard d'environ une seconde, correspondant à peu près à 23 images sur le film, ce qui montre bien la perturbation au niveau neuro-sensoriel.

Nous pensons que ce phénomène est de plus en plus répandu sous des formes connues comme celles des enfants qu'on appelle hyper-kinétiques, hyper-moteurs ou enfants agités.

Du temps où nous étions enseignant de français langue étrangère, nous avons eu de tels enfants. Ce sont surtout des garçons. On en comptait par exemple 30 à 40% dans chaque classe en Allemagne en 1999.

Ecouter la parole humaine c'est être en interaction synchronique, pour cela il faut se mettre dans un état de « *relâchement actif* ». Ces enfants ont souvent des déficiences au niveau du sens de l'équilibre, de la coordination, du schéma corporel, de la « confiance originelle » (pour parler avec le psychologue de l'enfance Éric Erikson) et ils ont des tensions musculaires. C'est comme si l'enfant ne peut pas bien écouter parce qu'il fait du « bruit musculaire ». Il semble bien que ces enfants aient manqué d'éléments qu'on reçoit et développe normalement dans la prime enfance et qui sont sous-jacents à l'installation et l'élaboration de l'organisation langagière.

Nous avons travaillé avec de tels enfants de manière rythmique, en leur donnant ce que nous appelons une « nourriture de mouvements » (jeux d'équilibre, saynètes mimées ou jouées avec les paroles). Il s'agissait de *rattraper* des choses qu'ils n'avaient souvent pas assez reçues dans leur petite enfance.

« Le tympan de l'allocutaire oscille rapidement et synchroniquement avec ses ondes sonores qui le frappent. Les cellules reprennent et transmettent l'ordre plus avant par le moyen des assemblages neuroniques isomorphiques. La traduction commence et déjà 50 ms plus tard, toute l'organisation motrice de l'allocutaire reflète un entraînement de certains aspects de cet ordre. L'entraînement précis de l'allocutaire met en évidence une interface organisationnelle qui module la structure de la parole en cours » (Condon, 1973).

Condon parle de traduction qui se fait en l'espace de 50 ms. Quel en est l'organe traducteur ?

Si déjà le nourrisson vibre à la parole humaine - tel un « *superdiscriminateur* » (Konopczynski (1990) I : 34, citant Trehub (1987)) - maîtrisant la perception catégorielle par exemple, et ce, bien avant l'installation neurologique porteuse du jugement perceptif conscient, c'est qu'il semble que son corps entier, en tant que « corps de mouvements », soit comme les oreilles ou les yeux : un organe des sens. L'oreille et ses organes voisins (canaux semi-circulaires et vestibules) qui ont des connexions avec le cervelet (centre qui gère entre autres le tonus musculaire et la coordination de toute la stature) qui semble aussi être la transition pour cette « traduction » où « toute l'organisation motrice » se met en mouvement synchronique. Nous citons deux chercheurs pour appuyer nos dernières remarques :

*« Notre système moteur est construit dans des temporalités très courtes, temporalités que **pratiquement seule l'oreille est capable de structurer** pour le système nerveux ; c'est la raison pour laquelle la motricité du sourd est perturbée au premier âge... »* (Lafon, 1986).

« *Le système de l'équilibre est une des forces structurantes des plus importantes pour toutes les sensations rassemblées par les autres canaux sensoriels. C'est pourquoi l'équilibre participe largement à l'évolution de la compréhension des mots et du langage en général* ». (Ayres, 1992) .

Ayres fait remarquer aussi que des dérangements au niveau spatial et statique ont été constatés chez la majorité des enfants qui avaient des problèmes d'articulation, d'expression et de compréhension.

Résumons ce travail de Condon avec Dupont-Martin (1995) :

« *La fonction exacte de cette tendance du corps à se mouvoir synchroniquement n'a pas été éclaircie [...] Malgré le caractère déjà ancien des travaux de Condon, il semble que l'on n'en a saisi ni la signification, ni la portée exacte.* ». (Dupont-Martin, 1995 : 53)

2. L'organisation des bras et des mains

2.1. Aspect phylogénétique

Une chose surprenante sur le plan phylogénétique humain, c'est l'asymétrie frappante du cerveau. Le fait que chez 97% des humains - en tous cas pour la civilisation occidentale – tout comme chez la majorité des gauchers, les aires cérébrales qui correspondent aux activités langagières soient à gauche peut demander une explication. La prédominance du bras droit et de la main droite chez l'être humain est aussi universelle. L'explication qui revient le plus souvent est celle avec laquelle Doris et David Jonas terminent leur ouvrage *Das erste Wort (le premier mot)* (1979) :

« *Le langage est apparu au cours de l'évolution dans le dialogue mère enfant. Celle-ci devait porter son enfant du côté du cœur comme la majorité des mères le font instinctivement et pouvait cueillir, travailler de la main droite. Chez les singes, il n'y a pas de répartition du travail d'après la différenciation sexuelle mâle et femelle, chacun se débrouille de son côté. Chez les anthropoïdes, la femelle fait la cueillette, c'est elle qui porte le bébé et qui lui apporte les premiers éléments de communication. Là serait l'origine de l'émergence de la langue.* ». (Jonas, 1979 : 202)

Mais d'autres théories disent que le langage est venu par les mâles puisque ce sont eux qui protègent, vont à la chasse et surtout qui fabriquent les outils, donc qui développent une activité manuelle et musculaire, surtout avec le bras droit. Jonas montre aussi que « *comme c'est l'hémisphère gauche qui contrôle la main droite, les facultés de la coordination*

musculaire complexe se renforcent : l'agilité manuelle stimule les centres nerveux qui stimulent alors à leur tour (en rétroaction) l'agilité des doigts » (Jonas, 1979 : 203)

Plusieurs théories de l'origine de la parole, du langage ont vu dans la gestualité, la gesticulation, une source pour l'expression parlée. Darwin (1872) est l'un des premiers à avoir entrepris une étude comparative systématique des gestes expressifs dans le monde animal : « *The expressions of the emotions in man and animals* ». En 1890, Sayce montre que les gestes existaient avant le langage et servaient déjà pour la communication. On pense même aujourd'hui que les gestes sont venus avant les sons et ont formé peu à peu le langage. Ceci est renforcé par les études de Trevarthen (1975) qui a filmé des mères et leurs nouveau-nés. Il observa une forme d'activité de la part des nourrissons qu'il appelle « pré-langage » (pre-speech) formé du mouvement de la langue, des lèvres, avec accompagnement de bruits et de gestes.

La preuve capitale que *la langue gestuelle* ou gesticulée est vraiment une « *langue naturelle* » a été faite par les études de Laura Ann Petitto, de l'Université McGill à Montréal.

Elle a suivi l'évolution de nombreux enfants sourds et montré que leur évolution langagière et cognitive se fait dans les mêmes étapes que celle des enfants entendant et donc oralisant. (1987,1996, cité par Wilson, 1998, édition allemande, 2002 :218)

Oliver Sacks avançait déjà :

« De fascinantes études sur une communication gestuelle entre des mères entendant et des jeunes enfants avant l'âge de la parole ont été publiées en 1978 (Tronick, Brazenton et al.). Il semble bien que, si l'ontogénèse répète d'une certaine manière la phylogénèse, nous avons ici une indication qui nous montre que le premier langage humain était gestuel, motorique. »
(Sacks, 1989 :).

Il ne faudrait pas penser que ce langage ne soit que la suite du langage des émotions des animaux, comme Darwin a essayé de le faire. De plus il faudrait faire la différence entre sentiments et émotions. Chez les animaux, les gestes comme les expressions orales de cris ou même de sons sont liés aux émotions dont le répertoire *est fixé génétiquement*. On ne peut donc trouver un lien de l'expression animale qui mènerait ensuite **directement** à la parole humaine. Par contre chez de nombreuses espèces d'oiseaux chanteurs, à la différence des appels et des cris innés, les *chants s'apprennent* ! Un œuf d'oiseaux chanteurs couvé par des parents non chanteurs verra naître un oiseau qui n'atteindra pas son répertoire mélodique.

Boysson-Bardies (de) écrit dans l'introduction de son livre : « *Comment la parole vient aux enfants.* » (1999) :

*« Le langage est un don, c'est un cadeau de l'évolution. Phylogénétiquement, l'homme ne préexiste pas au langage. Phénomène subtil, abstrait et culturel, le langage s'est sans doute ancré tardivement dans le système biologique [...] On pense que c'est entre l'Homo Habilis et l'Homo Sapiens, notre ancêtre le plus sûr, que s'est inscrit dans le code de l'espèce cette aptitude à la parole. Elle a alors fondé l'univers mental et biologique de l'homme. **L'appareil physique permettant la parole articulée a évolué avec la station debout.** Celle-ci a permis au système respiratoire et phonatoire de prendre une orientation verticale. Dans le même temps, la partie postérieure du système articulaire devenait verticale, mais non la partie antérieure. Il en résulte ce fameux "tube coudé" qui distingue l'homme des autres primates dont le tube vocal est diagonal. Cette évolution a eu pour conséquence d'augmenter considérablement la possibilité de produire des sons nouveaux et d'en accroître le rythme et le contrôle. Mais toute autre est la question de savoir comment organiser les possibilités phonatoires ainsi dégagées. L'accroissement du volume cérébral et son remodelage ont accompagné ces changements. C'est à partir d'eux essentiellement que doivent s'imaginer les séquences de changement génétique qui ont abouti à inspirer dans notre code génétique l'aptitude au langage parlé ».* (Boysson-Bardies (de), 1999 : 14)

Mais de Boysson-Bardies laisse une des étapes intermédiaires et fondamentales dans cette évolution : *l'apparition*, grâce à la station verticale, **de la main et de la préhension**. C'est la libération des mains qui a rendu aussi possible la formation du visage et l'apparition de la mimique, des lèvres, etc. En étudiant la littérature anthropologique spécialisée, mais aussi des études en pathologie neurofonctionnelle on trouve des détails importants pour comprendre les rapports entre les gestes et la parole. C'est pour cette raison que nous développons ces aspects aussi longuement.

2.2 Le geste et la nature du langage

2.2.1. Les consonnes ne sont pas que des « bruits »

Amstrong, Stokoe et Wilcox (1995). Ces auteurs comparent le langage sonore et gestuel, celui que nous connaissons, nous, entendants, avec celui des signes des non-entendants. La rencontre de ces deux aspects du langage permet d'après eux *d'éclairer l'un à la lumière de l'autre* et de concevoir le langage comme une réalité gestuelle, comme « *gesture* ». Un

chapitre de leur livre est intitulé : « *La parole comme geste* ». On y cite le psychologue Neisser (1976) pour qui « *la parole peut être décrite comme une gestualité articulatoire et sa perception comparable à la perception d'autres sortes de gestes* ». Studdert-Kennedy, des laboratoires Haskins, pense la même chose (1987). Ils se détachent ainsi d'une vision classique statique qui « *réduit les sons à des unités linguistiques abstraites (discrètes, statiques, sans contexte)* ». Dans le phénomène de la coarticulation, ils montrent la *dimension temporelle* qu'il faut intégrer pour comprendre le phénomène de la parole. On cite Strange (1987) qui, prenant un mot comme / bab / puis atténuant de manière électronique jusqu'au silence les 2/3 de la voyelle médiane, mais en laissant le cadre consonantique et ses transitions articulatoires, constate alors que toutes les personnes testées n'avaient pas plus de difficulté à reconnaître ce mot que s'il y avait toute la voyelle. Par contre, quand on atténuait les transitions coarticulatoires, ces mêmes personnes avaient bien de la peine à identifier la voyelle. Ces résultats amenèrent Strange à dire que les voyelles sont des gestes.

Browman et Goldstein (1985) sont les pionniers dans le domaine du modèle articulatoire gestuel de la phonologie. (On retrouve cela dans la description des travaux de Best un peu plus loin.) Browman et Goldstein écrivent :

« La majeure partie de la recherche phonétique a caractérisé les paramètres phonétiques en termes de paramètres mesurables ou en traits. Basé sur cette vision des choses, la description phonétique consiste en une séquence linéaire de mesures physiques statiques autant pour les configurations articulatoires que pour les paramètres acoustiques. Il y a encore quelques années, on considérait les mouvements d'une configuration à l'autre comme secondaires. Nous avons proposé donc une approche alternative en qualifiant et étudiant - comme patron (modèle) - le mouvement articulatoire - ou geste - au lieu de la configuration statique. Les approches traditionnelles ont toujours considéré le mouvement continu du tract vocal comme du « bruit » ce qui avait tendance à obscurcir les structures segmentales de la parole (...) En considérant directement les mouvements articulatoires, cela ne nous conduit pas au « bruit » mais à des structures spatio-temporelles organisées qui peuvent être utilisées pour donner la base à des généralisations phonologiques aussi bien qu'une description physique peut le faire. D'après nous, on peut dire alors qu'une représentation (phonologique) phonétique est une caractérisation du comment. Comment un système physique, ici le tract (conduit) vocal, change dans le temps. ». (Browman et Goldstein, 1985:35 cité par Armstrong et al. 1995: 9-10)

Les auteurs en arrivent à une conclusion qui rappelle les remarques de Leroi-Gourhan -dès 1964- que nous avons citées plus haut.

*« Nous ne partageons pas l'avis de beaucoup (comme Libermann en 1971 et Edelman en 1992) que le langage tire son origine d'un système tripartite composé du cerveau, du tract vocal et du système auditif. Nous croyons plutôt que **tout l'organisme**, et spécialement les systèmes visuel et moteur, sont impliqués dans le langage »* . (Amstrong et al. 1995: 19)

Amstrong montre comment la syntaxe existe déjà dans tout acte de préhension (le geste manuel brachial). Attraper son pouce gauche avec la main droite et regarder quelqu'un : c'est déjà une phrase transitive complète sujet, verbe et objet. (par exemple pour dire : « on va attraper cette proie »). Ici on symbolise des relations entre les choses. C'est en ce sens qu'on peut montrer en quoi l'être humain est différent de son « plus proche parent » le chimpanzé qui en reste au stade prélinguistique. Ce dernier ne peut pas relier les signes entre eux de manière libre, ni relier deux modes sensoriels différents. Il ne peut pas saisir une métaphore, comme le fait remarquer Richard Cytowic. (Cytowic, 1993,1996 :110-120)

Ces auteurs pensent que dans les stades précoces de l'apparition de la formation langagière dans l'évolution hominienne, les gestes visibles étaient les premiers à s'engager sur le chemin vers le langage, la stature verticale, la marche, les bras libérés et l'apparition de la vision binoculaire frontale en étaient les étapes préparatoires.

Ces auteurs citent aussi Givón (1989) qui rappelle les « postulats pré-empiriques » :

1. Le langage est un module séparé de l'esprit-cerveau et non pas une partie de la cognition dans son ensemble.
2. Le structuralisme dans l'analyse du langage : les structures du langage peuvent être analysées indépendamment de sa fonction communicative.
3. La relation sémiotique entre le code linguistique et la représentation mentale qu'on lui fait correspondre est arbitraire à la différence de l'iconicité qui caractériserait la communication pré-humaine.

Une autre affirmation qui circule aussi est que le mental, le psychique est indépendant du physique.

Ces auteurs prennent un point de vue cognitiviste évolutionniste. Pour eux, le langage ne peut pas être séparé de manière dualiste de ses réalisations physiques. Au contraire, il est profondément enraciné - ontogénétiquement comme phylogénétiquement - dans les bases corporelles. Person (1924) avait déjà fait cette remarque :

« *L'essence du langage est l'activité humaine, activité d'une part d'un individu qui veut se faire comprendre par un autre et activité d'autre part de l'autre qui veut comprendre ce qui est dans l'esprit du premier* ». (Amstrong et al. 1995: 35)

C'est peut-être dit un peu trop concisément, car avec le mot *activité* on résume en fait des niveaux fort complexes dans l'être humain.

2.2.2. Les gestes et les « gestes articulatoires »

« *Une théorie linguistique doit reconnaître le fondement de l'incorporation physique du langage dans un sens très réel : le corps étant dans l'esprit (Johnson 1987). L'essence du langage est l'activité corporelle.* » (Amstrong et al. 1995: 36)

Nous ne sommes personnellement pas d'accord avec le contenu trop *unilatéral* de la dernière phrase citée, mais *un aspect fondamental* est mis en relief : le lien de la parole, de la pensée humaine avec le corps entier, avec *l'activité corporelle*. Ceci élargit notre compréhension du langage et ne le réduit pas à une activité uniquement cognitive et cérébrale. Pour donner un exemple où ce genre de conception « *cérébraliste* » du langage ont mené, il suffit de se souvenir de la génération de jeunes élèves qui est passée dans les méthodes « *audiovisuelles* » de l'enseignement des langues étrangères. Tous ces « *laboratoires* » très coûteux ont fini dans la poussière des débarras des écoles. On ne faisait appel qu'à la tête des enfants et le reste du corps était immobile. On sait entre-temps qu'une langue vivante ne s'apprend pas par un dressage fait de « *pattern drills* » mais par le mouvement, le rythme, la prosodie, des essais variés fait aussi d'erreurs et surtout par l'interaction.

Comme élément anecdotique pour étayer nos propos aussi deux illustrations: l'une datant de 1900 et l'autre de 1965.



Figures n° 5 et 6 : «Utopie électrique» de 1900 vers l'an 2000 et la réalité « irréaliste » des années 1965. (Clute,1995 :p.10)

(Vogt,1966 :p.52)

On voit clairement ici qu'on n'a considéré que l' « homme-tête », par une démarche « cérébro-centriste » : les bras, les mains, le système respiratoire, les jambes n'ont rien à faire et la réalité de « la langue vivante » n'entrent donc pas dans les têtes. Chaque élève est *isolé* et doit reproduire un soit disant modèle parfait, prononcé de manière excellente par des « native speakers » dans des dialogues souvent stériles ou peu *motivants*, accompagnés de dessins animés ou de films, donc de nouveaux d'éléments auxquels ils manquent la troisième dimension, celle de la *profondeur*, au sens spatial, et qui est celle qui nous inscrit dans la réalité par qu'elle touche la volonté, le mouvement. L'utilisation de tels moyens technologiques est utile comme documentation par exemple, mais se voulant *méthode globale* « audio-visuelle » elle est restée infructueuse. Les gestes, *les actions et interactions*, la respiration modulée n'étaient pas pris en considération. Cette méthode reflétait les théories linguistiques de la communication dominantes de l'époque et était de plus, marquée par les théories de l'apprentissage de Skinner.

Kimura (1976) rendait déjà attentif à la nécessité d'étudier le langage humain avec « *la clé de ce qui unit le langage parlé au langage des signes : les gestes.* » (Amstrong *et al.* 1995: 36)

Studdert-Kennedy (1985) montre comment en linguistique la phonologie moderne s'est isolée elle-même des autres disciplines qui lui sont voisines. L'approche nécessaire selon lui doit se faire plus sur la « substance » que sur le « formel ». Si nous voulons trouver les bases biologiques de la parole, il nous faut aller les dépister dans ses racines : l'anatomie, la physiologie et l'environnement social.

Amstrong *et al.* en arrivent par ce chemin à la question : qu'est-ce que le geste ? Pour certains chercheurs ou auteurs, les gestes sont les mouvements des bras ou du haut du corps ; pour d'autres, il faut y ajouter les expressions faciales ou le séparer de la parole ; d'autres auteurs considèrent la parole comme gestuelle.

Le geste réfère donc à différents types de mouvements et de comportements chez les animaux comme chez les humains.

Le geste peut être compris comme :

- une activité neuromusculaire (à but communicatif ou non)
- un signe (l'aspect sémiotique du spontané au conventionnel)

- un élément linguistique (signe conventionnel, articulation vocale...)

Ces auteurs s'attaquent aussi aux arguments de Burling (1993) qui cherche à opposer strictement le langage aux gestes. Pour ce dernier, les gestes n'offrent pas de contrastes, de « traits distinctifs » comme dans le langage.

Mais d'autre part Bybee (1992) explique que sur le plan phonologique les « *distinctive features* » (traits distinctifs) ne sont pas d'une grande aide. Nous devrions, selon elle, étudier des formes phonétiques d'unités linguistiques concrètes parce que « *les mots consistent en une substance phonétique réelle, dans le dictionnaire, c'est-à-dire dans notre représentation mentale des mots comme dans notre production et perception.* » (Amstrong *et al.* 1995: 40)

Une remarque personnelle. Tout comme Llorca (1995), nous avons constaté dans nos activités de formateur, que la grande majorité des gens d'aujourd'hui, marqués depuis leur tout jeune âge par une éducation intellectuelle trop fixée sur l'écrit, avaient une représentation primaire scripturale, visuelle des mots entendus. Il leur faut donc du temps pour retrouver l'élément musical, prosodique, le « corps sonore » des mots. Cette écoute plus musicale, «phonoplastique» les gens simples de la campagne la possédaient. Ils goûtaient encore les mots en les parlant.

Greenfield (1991) montre l'aspect hiérarchique des gestes. Pour lui, les plus complexes étant engendrés par les plus simples (ceci reviendra dans la description du modèle de Best).

Deux choses fondamentales ressortent :

«1) *L'organisation hiérarchique du langage comme celle de la manipulation combinatoire des biens est doigts, (par ex. billes, cubes,...) sont intimement liées et interdépendantes très tôt dans l'évolution onto -et phylogénétique aussi.* (S.M.: On repense ici aux remarques de l'anthropologue Leroi-Gourhan)

*L'ontogenèse des circuits du lobe frontal gauche est impliqué comme la base corticale pour l'organisation de la parole et de la **combinaison des objets manipulés.*** » (Amstrong *et al.* 1995: 41)

Greenfield montre que cette similitude n'est pas analogique mais homologique. L'aire de Broca est le lieu où cette homologie ressurgit. Shewes (1973,-74,-76) est l'un des premiers défenseurs modernes de cette origine gestuelle du langage. Kendon pense de même, comme beaucoup de chercheurs. Mais presque tous opposent encore le langage vocal au geste.

Kendon (1991) : « *Si le langage a commencé comme gestualité, pourquoi n'est-il pas resté dans cette voie... ?* ». (Amstrong *et al.* 1995: 42) Armstrong et ses collègues renvoient la question à Condon en argumentant que cloisonner et séparer le langage vocal des gestes n'est pas productif. Pour eux, la réponse est que le langage s'est détaché de la gestualité. En étudiant vraiment le langage oral, on retrouve sa nature primaire qui est gestuelle.

Studdert-Kennedy (1987) a bien précisé : « *Le geste est une unité fonctionnelle, une classe équivalant de mouvements coordonnés qui réalisent un but* ». (Amstrong *et al.* 1995: 43) Cette remarque est basée sur des études de Fowler *et al.* (1980), Kelso, Salzman et Tuller (1986) « *qui ont développé une approche dynamique-utilitaire de la parole* ». Pour eux la clé de cette approche est la « *structure coordinante* ». C'est là qu'apparaît la notion de synergie qui a été d'abord décrite par le physiologiste russe Bernstein (1966) : « *Berstein a bien montré qu'il n'y a pas de relation univoque entre les types d'impulsions motrices et les mouvements provoqués* (Edelmann 1989). *Ce manque d'invariants est très important* ». (Amstrong *et al.* 1995: 44) Browman et Goldstein (1990) font la remarque que naturellement tous ces gestes se superposent dans le temps. Or ce même phénomène apparaît dans le langage des signes épelés ou dactylologiques : de la coarticulation jusqu'au lapsus.

Armstrong et ses collègues précisent bien qu'ils sont partis de la grammaire (la syntaxe) pour montrer les liens entre gestes et langage. Ils citent Langacker (1991) qui montre qu'il y a trois types de structure formant la linguistique :

- La sémantique
- La phonologie
- L'aspect symbolique (sémiotique)

(qui lui relie les deux autres aspects).

Ces auteurs finissent leur étude en citant Coleridge :

« Est-ce que la pensée est impossible sans les signes arbitraires et dans quelle mesure le mot « arbitraire » n'est-il pas une méprise ? Les mots ne sont-ils pas des parties, des germinations de la plante ? Quelle est leur loi de croissance ? Dans ce sens je chercherais à détruire la vieille antithèse des mots et des choses et réinstaurerais comme cela fût déjà les mots en choses et même en choses vivantes » (Amstrong *et al.* 1995: 234 citant Shattuck, 1995). De

Cette citation est là pour renforcer leur idée que l'arbitraire du signe et la symbolisation ne sont pas aussi nécessairement importantes que Saussure et de nombreux linguistes l'ont affirmée. En fait, les expériences de Pawlow montrent bien que la faculté de répondre à des symboles arbitraires est loin de n'être qu'une faculté humaine. La faculté de l'individu est de conceptualiser et celle du groupe de conventionnaliser. Ces facultés par contre sont fondamentales. Notre monde mental et le langage lui-même sont parcourus de métaphores; ces représentations des métaphores viennent de notre rapport à notre propre corps et à son interaction avec l'environnement. Bien sûr, il y a d'autres métaphores et puis la pensée est possible aussi sans le langage comme en témoigne par exemple la célèbre réponse d' Albert Einstein :

« Les mots de la langue, qu'ils soient écrits ou parlés, ne semblent jouer aucun rôle dans mon mécanisme de pensées. Les entités psychiques qui semblent servir d'éléments de pensée sont certains signes et des images plus ou moins claires qui peuvent être reproduites et soulignées volontairement (...) Les éléments dont je parle plus haut, dans mon cas, sont de type visuel et musculaire. Les mots conventionnels ou d'autres signes doivent être envisagés pour travailler dans une seconde étape, quand le jeu associatif dont j'ai parlé est suffisamment installé et qu'il peut être reproduit à volonté ». (Cité par Amstrong *et al.* 1995: 235)

Amstrong conclut ainsi :

« Ce qui est constant dans les métaphores des pensées humaines et du langage humain c'est qu'elles nécessitent l'emploi de symboles et l'usage de la syntaxe (on reconstitue les symboles pour créer de nouvelles relations) (...) Nous croyons avoir montré que cette activité cérébrale dérive directement des interactions musculaires et corporelles avec le monde visible ». (Amstrong *et al.* 1995: 235)

Ici une question reste pour nous en suspend : quelle est la signification des consonnes et des voyelles dans le langage et l'expression des pensées humaines ?

Nous tirons les détails suivants de Sacks (1989).

Si le langage des signes est une forme d'expression, de réalisation de toutes les facultés humaines qui se réalisent autrement par la voie de l'oralité, où sont consonnes et voyelles ? Il semble qu'elles soient sous-jacentes au travers des gestes-signes. Les gestes signes sont des genres de verbes-noms, « les kinèmes », qui correspondent à peu près à des noms, des morphèmes, pour les entendants mais avec un « champ de signifiante », une

« multifonctionnalité » plus large. Tout le contexte, l'expression, l'intensité faciale, les yeux, la mimique ajoutent mille nuances et changent, à la signification de ces mots-gestes.

Beaucoup de choses dans le langage des non-entendants sont comprises dans le « non-dit », c'est-à-dire le non-montré (ex : toutes les terminaisons). Mais la question reste essentielle. Si le langage des gestes-signes n'a pas de consonnes et de voyelles, pourquoi apparaissent-elles dans le langage parlé, dans la parole humaine ?

Nous ne pouvons pas encore répondre à cette question entièrement. Nous n'avons trouvé qu'un seul élément chez Stokoé (1965). Celui-ci est convaincu que les gestes-signes ne sont pas des « images » mais plutôt des symboles abstraits complexes avec une structure interne tout autant complexe. Il avance que chaque geste est constitué de trois parties indépendantes l'une de l'autre :

- l'ordonnance spatiale
- la position de la main
- le mouvement (analogue au phonème de la langue des sons).

et que chaque partie un nombre limité de combinaisons. Il trouva 55 unités distinctives non significatives, les « cherèmes » : 19 formes de la main, 12 ordonnances spatiales et 24 sortes de mouvements, et il créa une forme d'écriture pour cela, chose qui n'existait pas encore jusque là. Cette « écriture » n'est utile que pour la recherche.

2.3. Développement de la motricité manuelle et langagière chez le bébé : une étude longitudinale faite en Russie

C'est nous qui traduisons de l'allemand.

Nous consacrons ce chapitre à une étude apparemment peu connue du médecin Mariela Kolzowa, directrice du centre de recherche pour les fonctions cérébrales des nourrissons et des bébés à l'Institut de physiologie des adolescents de l'Académie des Sciences de l'Evolution de Petersbourg (1975).

On a beaucoup étudié le développement langagier des jeunes enfants. Ce développement n'est pas toujours sans retard et sans dysfonctionnement bien que parfois les enfants touchés soient sains, sans trouble du système nerveux central ou des conduits auditifs.

Les enfants étudiés ici passent la plupart de leur temps dans les garderies, dans les crèches. Si le personnel était débordé et ne pouvait s'occuper suffisamment de chaque enfant, on comprendrait cet état de fait. Mais, ces enfants, suffisamment entourés, à qui on consacre du temps, présentent des retards langagiers tels que les parents s'en alarment et en parlent à leur médecin ! Parfois un enfant de deux ans ne dit que trois, quatre mots !

2.3.1 Signification de la faculté de parler

Jusqu'à maintenant on était d'avis qu'il fallait parler le plus possible à l'enfant, que celui-ci imitait et que par cette voie là il reproduisait ce qu'il entendait. Les parents faisaient tout pour entourer leur enfant de leur langue. Pourquoi ces enfants en restaient à quelques mots et gestes seulement ?

Sacha (20 mois) un enfant sain, éveillé, comprend beaucoup d'énoncés. Si on lui montre des objets, il les apporte ; lui-même ne dit que «mamie, mama, mjan » et / aï /pour tout ce qu'il fait, montre, etc. Les mois passent et il en reste à ces gestes et à ces quelques vocalisations.

Pour aborder ces phénomènes, Kolzowa fait alors, dans un « Foyer de l'Enfance », quelques observations en coopération avec un orthophoniste Rudnewa. Ils suivent alors 20 enfants âgées de 13 à 16 mois. Les enfants, qui étaient en bonne santé, présentaient un retard du langage très marqué. Au petit ordre : « Prends la cuillère ! » ils ne peuvent réagir que dans la situation du repas à table. Seulement deux enfants reproduisent quelques syllabes. Avec ce groupe on fait quotidiennement, pendant 2 minutes, l'exercice suivant : on montre un jouet à l'enfant, par exemple un chien et on dit « Oua, », une vache « Meuh, meuh », etc. et on essaye d'inciter l'enfant à imiter cela. Le personnel s'occupe spécialement de ces enfants en les habillant, les lavant ; il leur parle, commente ce qu'ils font. Il s'occupe d'eux presque une heure par jour ce qui est beaucoup. Les résultats sont médiocres.

2.3.2 Conditions pour le développement langagier précoce

Il semble donc que ce n'est pas la quantité et l'intensité du contact parolier qui soit déterminante. Bien sûr, cela est important, mais il y a apparemment d'autres facteurs dont on doit tenir compte.

Les proprioceptions musculaires et l'appareil phonatoire

Les célèbres physiologues russes J.M. Setschenov et J.P. Pawlow avaient déjà très tôt rendu attentifs à ce phénomène. Setschenov dit de lui-même : « *Il me semble même que je ne pense jamais en mots mais en proprioceptions musculaires* ».

Pour aider des enfants en difficulté de langage, on devrait donc utiliser les fines perceptions musculaires de leurs organes phonatoires. On sait que les jeunes nourrissons observent exactement le jeu mimique des adultes : ils imitent et ils s'approchent de l'articulation de cette manière. L'imitation mimique se retire vers sept mois. Les enfants dont on ne s'était pas assez occupé avant cet âge présentent d'énormes difficultés au niveau articulatoire. Kolzowa prend une « autre porte d'accès ».

2.3.3 Développement du langage et motricité générale

Kolzowa commence par une expérience pour comprendre la place de la motricité dans son ensemble.

Elle prend 19 enfants en bonne santé, âgés de 13 à 15 mois, mais qui présentent des retards ou des lacunes dans leur fonction langagière.

Groupe 1 (9 enfants)	Groupe 2 (10 enfants)
20 min/jour : mouvements, évolutions libres au sol	Enfermés dans leur parc, plusieurs avec peu d'espace

Avec chaque groupe on fait quotidiennement deux minutes d'entraînement du langage.

Résultats :

Groupe 1	Groupe 2
Après 7 jours : ou, aa pour oua	Après 13 jours : premières réactions vocales
Après 20 jours : déjà mieux	Après 30 jours : peu de progrès

Ceci montre que la motricité générale n'apporte pas encore de solution. Certes, la libre évolution par terre avait eu un léger impact sur la motricité et le développement mais c'était tout.

En regardant exactement la projection du contrôle moteur dans « l'homunculus » de Penfield, on voit que l'aire qui est occupée par la zone motrice des mains et des doigts est à proximité de l'aire de Broca (revoir le schéma p.9). Kolzowa pense alors que l'entraînement de la motricité fine des doigts devrait avoir une plus grande influence sur le développement actif du langage chez l'enfant que celui de la motricité grossière en général.

Avec L. W. Fonina, Kolzowa entreprend alors une seconde étude :

2.3.4 Evolution des mouvements de la main et de la parole

1er groupe	2ème groupe	3ème groupe
Exercices de langage quotidiens (2 min ½ /jour)		
Sans autres jeux ou exercices	Liberté d'évolution au sol, 20 min/jour	Entraînement quotidien de la motricité fine des doigts. 20 min/jour - (enfiler des boutons, - constructions de pyramides avec des cubes etc.)

Résultats

1er groupe	2ème groupe	3ème groupe
- Après 20 jours environ : Réactions vocales faibles, stéréotypées	- Après 6 jours : début d'imitations des sons - Après 15 jours : 10% des enfants reproduisent correctement les morphèmes	- Dès le 3ème jour : réactions vocales - 7ème jour : 41% des enfants... - 15ème jour : 67,3% des enfants manifestent une imitation exacte des morphèmes proposés

Ainsi donc, *par l'entraînement de la motricité fine des doigts*, on arrive à une production plus rapide des sons - 7 fois plus vite que dans le premier groupe - mais surtout plus qualitative quant à leur prononciation !

Le fait aussi que les enfants du troisième groupe continuèrent d'eux-mêmes à développer une activité manuelle en dehors du temps d'exercice est significatif. Certains enfants saisissaient leur poupée, touchaient délicatement leur nez, leurs yeux, prenaient des miettes de pain sur la table, etc. Les enfants des groupes 1 et 2 ne percevaient pas ces petits détails dans les objets ou ne s'y intéressaient pas. Ils saisissaient les objets, les frappaient par terre ou les mettaient dans leur bouche, mais sans plus.

Encouragés par ces résultats L.W. Fomina suit alors 500 enfants dans différentes crèches. Elle constate les faits suivants :

Développement des mouvements des doigts	Développement langagier	Développement de la motricité dans son ensemble
d*. normal	d. normal	d. normal
d. normal	d. normal	d. au-dessous du d. normal
d. au-dessous du d. normal	d. au-dessous du d. normal	d. normal
d. au-dessus du d. normal	d. au-dessus du d. normal	d. normal
d. au-dessous du d. normal	d. au-dessous du d. normal	d. au-dessus du d. normal

*d : développement

Pour ces chercheurs on ne peut pas parler ici de hasard mais d'une loi de l'évolution, du développement. Le fait que l'évolution de la motricité générale n'entre pas en ligne de compte directement semble aussi intéressant.

Kolzowa fait alors quelques diagnostics *sur l'agilité manuelle*. Elle demande à des enfants de montrer un doigt puis l'autre etc. Les enfants qui parlent bien montrent toujours qu'ils peuvent différencier chaque doigt de leur main. Ceux qui, par contre, laissent un doigt recourbé ou en montrent plusieurs à la fois, ceux-là justement sont ceux qui ont des retards au niveau langagier.

2.3.5 Des faits connus en pathologie

Kolzowa et ses collègues se souviennent alors qu'on connaît déjà certaines de ces choses en neuro-pathologie, en défectologie. Par exemple, on sait depuis longtemps qu'une hémorragie dans l'aire de Broca (hémisphère gauche) entraîne aussi une diminution ou une disparition de

la motricité fine de la main droite, même quand la zone du contrôle moteur des doigts n'est pas directement touchée !

Chez les vrais gauchers par exemple, on a pu observer qu'une hémorragie à l'hémisphère gauche ne perturbe en rien la faculté langagière. (On sait aussi que forcer un vrai gaucher à passer à la main droite entraîne des troubles importants du langage). Kolzowa ajoute : « *Si nous parlons de la période de préparation à la production active du langage de l'enfant, nous ne devons pas seulement entraîner l'appareil articulatoire, les organes de la parole, mais penser aussi et avant tout aux mouvements différenciés des doigts.* » (Kolzowa, 1975 : 757)

2.3.6 En quoi est fondée cette relation entre les mouvements des doigts et la parole ?

Il fallait pour cela étudier l'évolution de la préhension.

« L'évolution des hommes primitifs vers le langage a dû se faire par une communication gestuelle accompagnée d'interjections, de cris, de vocalisation pour, peu à peu, conquérir la langue articulée qui fut encore longtemps accompagnée ou reliée à la langue gesticulaire (gesticulée). De générations en générations, les êtres humains ont perfectionné leur motricité manuelle et pouvaient faire des travaux, des objets de plus en plus raffinés. Parallèlement à cela, les zones de plus en plus structurées pouvaient se tisser dans le cerveau. L'évolution du langage allait toujours de pair avec l'évolution de la main ». (Kolzowa, 1975 : 257)

Kolzowa fait remarquer qu'on peut voir l'ontogénèse d'une manière semblable: le développement de la motricité fine semble être la base pour l'évolution du langage.

2.3.7 Mesures électroencéphalographiques

Kolzowa prend aussi des mesures électroencéphalographiques (EEG) après l'entraînement des doigts des nourrissons. Avec des nourrissons de six semaines, on fait des exercices de doigts de la main droite puis de la main gauche. Cela consiste en de petits massages des poignets et des doigts que l'on tend et replie. Après un mois, on refait des mesures et on constate une résistance électrique plus grande et l'apparition d'ondes ultra-courtes dans la région du contrôle des muscles de la main. Après deux mois, les mêmes ondes apparaissent dans la

région du langage ! Chez les autres enfants avec qui on n'avait pas exercé, ces courants n'apparaissent que deux mois plus tard dans ces régions cérébrales.

2.3.8 L'entraînement des doigts

Kolzowa et ses collègues proposent de commencer avec des bébés de six, sept semaines. On leur caresse les mains, on plie et on tend chaque doigt. Cela suffit 2 à 3 minutes par jour. Vers le dixième mois, on devrait donner des jouets de couleurs fortes assez gros pour les enfants, plus tard des plus petits : des billes, des anneaux que l'on peut enfiler par exemple, etc.

Les chants folkloriques, les jeux de doigts, les comptines, les « théâtres de doigts » (avec de petites poupées ou animaux tricotés qu'on enfle au bout des doigts) sont d'une importance vitale pour les enfants. Même 5 minutes par jour suffisent à stimuler l'activité langagière des enfants.

Nous n'avons pas eu connaissance d'observations semblables ou même plus poussées dans ce domaine. Nous ne savons pas non plus si Kolzowa poursuit ces recherches.

2.4. La motricité articulaire dépendante de l'agilité manuelle et digitale

Il existe différentes branches du monde du mouvement et du langage où depuis longtemps des observations ont été faites sur les rapports étranges entre mouvement et parole. Nous pensons surtout aux acteurs, aux chanteurs, aux orthophonistes et formateurs de la voix.

Les thérapeutes font de nouvelles découvertes sur le terrain face aux patients. Ces découvertes concernent en fait aussi l'être humain dans sa constitution normale car c'est elle qui fait jour grâce aux symptômes. Aderhold (1962) dans un court article sur « *la formation de l'acteur et les rapports entre la motricité corporelle et la motricité phonatoire* » dit à ce sujet : « *On peut considérer le dialogue spontané comme « une évolution », une suite de mouvements qui se produisent surtout dans la musculature phonatoire pendant que les mouvements du reste du corps sont plus ou moins retenus* ». (Aderhold, 1962 :1532) Pour lui, on en trouve des preuves phylo- et ontogénétiques. Il cite Pickenhain pour qui le langage est apparu en rapport direct avec le travail humain et le développement de la main, de la préhension. Pickenhain (1959) fait remarquer que le centre du larynx et celui du contrôle de la main sont très proches de la zone auditive et visuelle. Aderhold voit aussi des relations entre l'évolution motrice du

jeune enfant et ses productions vocales et langagières : des premiers cris où les gestes sont encore incontrôlés, au babillage où la préhension, les gestes plus ciblés sont alors installés, puis au langage formé quand la station assise, les déplacements et le toucher dirigé des objets sont maîtrisés par l'enfant.

Le babillage des enfants est toujours lié au départ à l'activité des mains (on peut le voir aussi dans le langage des enfants non-entendants) et c'est peu à peu seulement que l'enfant apprend à retenir, réduire ses mouvements corporels pendant l'acte du parler.

L'enfant apprend à parler en accompagnant ses efforts de mouvement et des gestes. Le « système pyramidal » laisse peu à peu cela au « système extrapyramidal » qui lui, contrôle le tonus et la coordination musculaire : les gestes articulatoires devenant habituels et moins fatigants. Homburger (1956) avait fait une étude de la motricité de l'enfant en la caractérisant comme suit :

- le « regor » du nourrisson, la raideur observable quand il crie, ou sur tout le corps quand il est saisi par l'émotion.
- la période où l'enfant marche encore en tâtonnant, titubant, parce qu'il répartit son tonus par à coups, entre tension et détente.
- le jeune enfant avec sa grâce, sa fluidité qui voit vers 10-11 ans son maximum d'harmonie.
- La puberté et les changements morphologiques, hormonaux où l'on observe une sorte de retour en arrière, c'est-à-dire une chaotisation, une dys-rhythmie. Il faudra alors que le jeune se refasse sa place, qu'il réapprenne « à marcher » pourrait-on dire. C'est un processus d'individuation nécessaire.
- La vieillesse où l'on retrouve le « rigor » des nourrissons, la raideur, etc.

2.4.1 Troubles de coordination manuelle et digitale et troubles de co-articulation

Aderhold se tourne aussi vers la pathologie et cite Luchsinger (1948) qui rendait attentif aux rapports entre les difficultés de langage et la motricité fine. Il étudia 250 enfants de 4 à 6 ans. Chez les enfants avec une agilité, une mobilité de la motricité fine, l'articulation et la prononciation étaient fluides. Chez les enfants à difficultés motrices, il observa presque toujours un retard, souvent une sorte de balbutiement, de bredouillement. Dès qu'il travaillait

avec des jeux sur l'agilité des mains et des doigts des enfants, leur articulation et leur prononciation s'amélioraient et se normalisaient. Nous n'avons pas trouvé d'études plus récentes sur des enfants en âge scolaire mais des expériences telles que Gentilucci *et al.* (2001) et que nous résumons un peu plus bas viennent entièrement étayer ces observations.

Ce même phénomène a été constaté dans des écoles de théâtre. C'est sur cette base de constatations plus ou moins pathologiques qu'Aderhold décrit des méthodes d'éducation, de diction, de théâtre où l'on utilise des mouvements rythmés, des gestes, précédant ou accompagnant les exercices de parole et de diction.

Nous ajoutons par notre expérience : on cherche dans le processus artistique ou thérapeutique des mouvements du corps, des bras de la main correspondant de manière directe ou indirecte aux gestes articulatoires pour produire ces sons. D'où le lien aussi avec les formes aériennes sur le langage. On fait en grand ce qui sera ensuite reproduit en petit dans l'espace buccal qui est cette partie si spéciale où converge tout l'organisme humain musculaire et de mouvements, un peu comme le réseau nerveux converge vers le cerveau. Certains exercices ressemblent beaucoup à ce qu'on a fait inconsciemment quand on était bébé ou jeune enfant pendant cette période fascinante, véritable « embryologie psycho-phonique », où « *l'enfant construit sa voix, en même temps qu'il construit son langage* », comme le dit la spécialiste Konopczynski (1990 : II : 128) C'est le travail artistique : redevenir consciemment comme un enfant. Un sorte d'exploration consciente de processus physiologiques et psychologiques par lesquels nous avons, dans une « sage inconscience », construit notre personnalité tout comme notre voix et notre comportement en interaction bien sûr avec le monde des humains qui nous entourent, en interaction aussi avec la substance phonétique, prosodique de la langue, car la langue nous construit aussi ! C'est une sorte « d'investigation psychosomatique » que réalise l'artiste ou le thérapeute.

4. « Le dialogue des cœurs » : la parole et son empreinte cardio-vasculaire

C'est nous qui traduisons de l'allemand.

Lynch, professeur en psychologie et co-directeur de la clinique de recherche en psychophysiologie à Maryland a publié le fruit de ses recherches en 1985 dans un ouvrage intitulé : « *The Language of the Heart* ». Son premier livre : « *Le cœur brisé* » (The Broken Heart) était consacré aux infarctus du myocarde et parlait des effets de l'isolement.

Lynch apporte des éléments importants pour compléter notre vue d'ensemble du phénomène : « écoute – parole » et de *ses rapports avec le corps entier*. Ses études l'ont mené à développer une forme de traitement complètement nouvelle qui se base sur une compréhension des rapports entre la *communication humaine et le système cardio-vasculaire*. La technologie des ordinateurs modernes rend possible l'observation de phénomènes passés inaperçus jusqu'alors, à savoir par exemple que la pression sanguine, la tension, augmente de manière radicale dès que quelqu'un commence à parler, que son cœur bat plus rapidement et que les vaisseaux sanguins dans toutes les parties périphériques de son organisme changent aussi. Par contre, la pression sanguine, les fréquences cardiaques baissent en général et ce, souvent en dessous du niveau de la normale – chez celui qui *écoute* la parole d'une autre personne ou qui *se concentre d'une « manière détendue »* sur son entourage !

Dans son premier livre, Lynch avait montré que

« toutes les tentatives scientifiques de comprendre le corps humain, mais détaché d'un aspect qui est fondamental pour toutes les facultés humaines, à savoir du fait de parler, conduisent certes à mettre en place une thérapie efficace et brillante pour les parties isolées du corps humain, mais mènent par là même à négliger sérieusement l'individu dans sa totalité (...). Nous ne pouvons comprendre la maladie et la traiter que si nous sommes capables de nous voir nous-mêmes comme partie d'un tout, d'un monde complexe qui dépasse l'étroite limite de notre peau. Les réponses de notre cœur, de nos vaisseaux sanguins, de nos muscles pendant nos échanges langagiers avec notre partenaire, nos enfants, nos amis, nos collègues et la société en général ont tout autant d'impact sur la santé de notre système circulatoire que les facteurs dus à l'entraînement sportif exagéré ou à la mauvaise nutrition » (Lynch, 1985, édit. allemande, 1987 : 23).

C'est en étudiant la pathologie qu'il en vint alors à découvrir un phénomène qui est propre au fonctionnement quotidien de la « communication » et qui se montre dans son extrême, justement en pathologie.

« Cannon, le grand physiologue américain, avait déjà fait remarquer qu'il n'y a pas seulement des « signes extérieurs » pour l'expression des émotions, mais aussi des correspondances internes que nous ne pouvons pas voir et souvent que nous ne pouvons même pas (consciemment) ressentir » (Lynch, 1985, édit. allemande, 1987 : 133).

En étudiant des patients dans une salle d'attente chez un médecin, salle dotée d'un joli aquarium avec des poissons, Lynch observa que

« la tension, le pouls des personnes observées était à son maximum quand celles-ci parlaient, à son minimum quand elles regardaient les poissons dans l'aquarium, mais surtout que la tension était plus basse quand elles regardaient les poissons que quand elles étaient assises confortablement dans un fauteuil et qu'elles fixaient un mur vide. Il y avait une différence si on était détendu passivement ou si, dans un état de détente, on était tourné activement vers son entourage. Ce phénomène est connu sous le nom de « réflexe d'orientation du cœur ».. »
(S.M. : C'est ainsi que Lynch l'avait nommé dans des travaux antérieurs).

(Lynch, 1985, édit. allemande, 1987: 215)

Lynch a, de plus, étudié la respiration. L'expiration entraîne une augmentation de la pression intra pleurale (la pleure est cette fine double peau remplie de sérum qui entoure les poumons) et une diminution du volume dans les alvéoles pulmonaires. Ceci provoque l'augmentation du débit cardiaque, de son volume, ce qui entraîne par réaction l'augmentation de la tension, du pouls dans le début de la phase d'inspiration, pouls qui se calme ensuite au cours de cette inspiration. Cette augmentation de la pression sanguine pendant *la respiration* est donc un *phénomène naturel normal*. Mais alors, pourquoi chez les patients à tension, ce phénomène augmente-t-il plus qu'à la normale ? En installant un tube très fin avec un ballon par le conduit nasal, puis l'œsophage jusqu'au-dessus du diaphragme, Lynch put mesurer ce qu'il voulait comprendre. Mais, à sa grande surprise, ce n'étaient pas les variations du volume pulmonaire ainsi mesurées qui expliquaient la forte augmentation de pression dès que les personnes étudiées parlaient. C'était donc *la résistance périphérique* qui déterminait la pression cardiaque sanguine ! Lynch et son équipe se tournent alors vers celle-ci :

« La résistance des artérioles est surtout déterminée par le système nerveux autonome qui, lui, est influencé par le stress, la tension psychique. La question est donc : est-ce que la résistance périphérique change quand quelqu'un parle. Pour cela on prit la pression sanguine au pouce avec un "photo-plethy-myographe" (cet appareil envoie un rayon lumineux à travers la peau dans le réseau capillaire et l'intensité de la lumière réfléchi montre la quantité de sang qui circule dans la zone étudiée)» (Lynch, 1985, édit. allemande, 1987 : 234).

On put alors de nouveau observer chez les volontaires en bonne santé *une augmentation* de la pression sanguine en rapport *avec la vitesse de la parole* mais aussi une grande *baisse de tension dans le pouce* ! ? Lynch continua à approfondir ses observations sur le système circulatoire périphérique avec un PCO₂-Monitor (un appareil qui mesure le taux d'oxygène dans les tissus cellulaires).

Ces remarques viennent élargir notre compréhension du rôle du pouce dont nous sommes sur les traces depuis longtemps.

Lynch connaissait les descriptions d'un phénomène observé par Abramson et Ferris (1940) et le constatait aussi:

*« L'avant-bras est une région qui réagit très sensiblement au stress, aux tensions. De plus, quand sous l'effet d'un stress, la pression sanguine **des doigts baisse**, celle des avant-bras **augmente** ! Quand les étudiants parlaient, pression et fréquences cardiaques augmentaient de celles de l'avant-bras. Mais les expériences précédentes avec les mesures sur **le pouce** montraient le contraire. Cette contradiction n'est que relative et montre justement que quand une personne parle différentes parties du corps réagissent de différentes manières »* (Lynch, 1985, édit. allemande, 1987 : 234-236).

Lynch montre aussi que ce phénomène est connu dans les migraines où les mains peuvent se refroidir pendant que l'intérieur des avant-bras se met à transpirer. Le sang se répartit en volume vraiment de manière très différenciée et sensible dans les différentes parties du corps.

A ce moment charnière, celui de la signification du pouce par rapport aux autres doigts et son origine musculaire dans l'avant-bras – nous apportons une étude d'anatomie comparative dans le schéma ci-dessous. Nous avons déjà rencontré le pouce et la place énorme qu'il prend dans l'aire corticale 4 (motrice) et nous le retrouverons plusieurs fois dans les études sur les bébés.

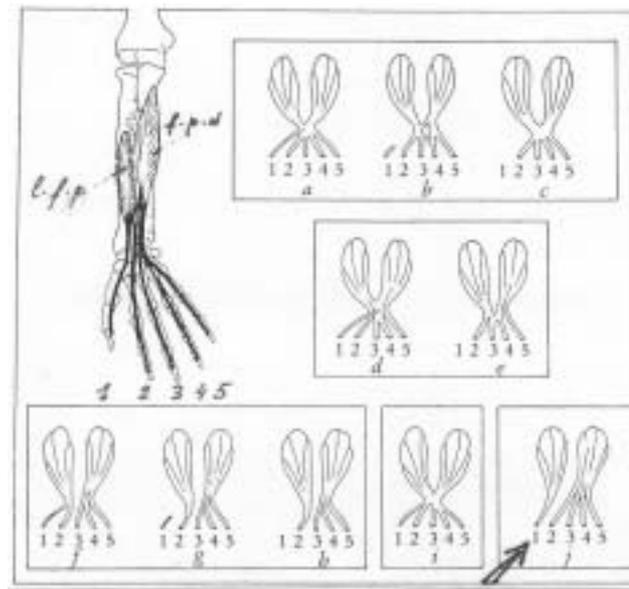


Figure n° 7 : Les fléchisseurs profonds des doigts
 En grand, à gauche : l'avant-bras humain de vue de la face ventrale
 l.f.p : long fléchisseur du pouce l.f.d : fléchisseurs profonds des doigts
 comparé à celui de divers primates :
 a : capucin ; b et c : tarsiers ; d : macaque ; e : singe araignée ;
 f : gorille ; g : chimpanzé ; h : orang-outang ; i : gibbon ; j : être humain

« **L'être humain est le seul à avoir pouce séparé indépendant des autres doigts** ». (Verhulst, 1999: 148)

Lynch résume ses recherches ainsi :

« Le corps entier, jusque dans les structures microscopiques de la circulation sanguine et ses échanges gazeux, est mobilisé par le dialogue, la communication. Vu que chaque cellule du corps humain est alimentée par le système circulatoire, il est donc possible que chaque cellule soit aussi influencée par le dialogue humain. Il en ressort que, dès que nous parlons, tout le corps est activé, que ce soit perceptible ou non par l'œil ou par l'oreille. C'est comme si la nuit, on allumait la lumière dans une maison obscure : toutes les fenêtres s'éclairent alors ! »
 (Lynch, 1985, édit. allemande, 1987 : 238)

Notons cette remarque de Lynch sur **les non-entendants en dialogue** :

« Ce phénomène d'augmentation de la pression sanguine chez celui qui parle et de baisse de la tension au-delà de la normale chez l'auditeur a été mesuré (par son équipe) chez des non-entendants jeunes ou âgés qui **parlaient en langue de signes !** » (Lynch, 1985, édit. allemande, 1987 : 222)

Ceci est fondamental pour comprendre l'origine gestuelle du langage.

Lynch conclut :

« *Quand on ouvre la bouche pour parler, on essaye de mener l'auditeur dans son propre monde. On a tendance couramment à se représenter la parole comme des mots qu'on projette vers quelqu'un. Si on réfléchissait un peu plus, on s'apercevrait que lorsqu'on parle vraiment, c'est le contraire qui se produit, car quand quelqu'un parle, il invite l'autre à entrer dans son monde, dans sa réalité, cela veut dire aussi dans son corps et finalement, dans le pouls profond, dans le fort de sa vie intérieure. Parler réellement, c'est la communiquer au sens premier du mot : un acte de communauté, de communion. En ce sens, parler est une action hautement intime, une forme très personnelle de partage* » (Lynch, 1985, édit. allemande, 1987: 333-334).

Personnellement nous ne pensons pas, comme Lynch semble le dire, que parler ne soit que « *le contraire* » de ce qu'on pense couramment, mais qu'il a, par ses découvertes, rendu attentif à l'autre pôle d'un rythme, *d'un double courant* que nous devons intégrer pour comprendre la totalité du phénomène : parole – écoute. Cela complète les recherches de Condon par exemple.

4. Le larynx et la bouche

4.1. Les organes phonatoires et l'organisation de la parole chez l'être humain

Dans son ouvrage « *Die Geschichte der Seele* » (*L'histoire de l'âme*), paru en 1850, et qui est un traité d'anthropologie qu'on pourrait nommer aujourd'hui de psychosomatique, le médecin G.H. von Schubert dit dans un chapitre intitulé : « *Les organes vocaux et l'organisation de la parole* »:

« (...) *Chez les animaux inférieurs, la carapace extérieure est dure et située juste à la rencontre de l'air duquel il est si facile de tirer des vibrations sonores. La cigale qui chante- ou un autre insecte - fait striduler l'air en grande partie par un mouvement répété de ses membres contre la carapace. C'est souvent là où sont accrochés les muscles les plus puissants.*» (S.M. : Schubert insiste sur le fait que les mouvements musculaires deviennent mouvements sonores audibles.) *Dans le corps des animaux supérieurs et de l'homme, c'est une partie spécialisée du squelette osseux et cartilagineux qui assume la fonction sonore. Cet organe est formé comme un tout, un sous-système autonome du squelette et n'est pas entouré de muscles, de nerfs et de peau épaisse et n'a pas de moelle en son intérieur. Il est juste à "fleur de peau", recouvert par une fine couche cutanée au contact de l'air Il enveloppe le système de la production de la voix. (...) L'intensité et la hauteur des sons sont dépendantes du nombre de vibrations des cordes vocales*

donc de l'activité du corps vivant autonome pour cette fonction qui lui donne la tension aux cordes vocales et la force à la colonne d'air expirée... (...)

C'est en fait une seule et même force corporelle par laquelle l'animal se meut et par laquelle il fait apparaître sa voix, ses cris. La force musculaire puissante du lion, on l'entend dans son rugissement qui effraye tous les autres animaux ; chez l'oiseau, la voix du chant rappelle son mouvement principal : son vol et ses évolutions flottantes sur les vagues de l'air ; chez l'être humain, la voix est remplie de tonalités tout aussi variées que les mouvements et les gestes de ses membres. Et c'est avec justesse que l'on a considéré la voix humaine en voyant en elle une sorte de gestualité intérieure, intériorisée.

Le lien entre la voix et les mouvements des membres se montre entre autre dans les gestes mimo-dansés avec lesquels certaines espèces d'oiseaux accompagnent leur chant et leurs variations musicales.

Les organes avec lesquels les animaux supérieurs produisent leur voix sont – comme nous l'avons suggéré plus haut – un système squelettique en soi, avec une partie tête, des vertèbres et des membres mobiles, le tout dans une reproduction en miniature, une répétition du squelette dans son entier». (von Schubert, 1850 : 167-168)

Dans les notes supplémentaires à ce chapitre, Schubert dit encore :

« (...) Dans la production de la voix et des sons participe encore le puissant système musculaire du thorax qui, en plus de son rôle respiratoire, doit répartir pour chaque son produit, la force et la vitesse de l'air expiré nécessaire. Mais surtout tous les muscles provenant de différentes directions et qui touchent et maintiennent les organes phonatoires se retrouvent là au point d'indifférence (le cou) de tout le corps (...) Le fait que cet organe soit la reproduction en petit de son modèle, de son original qui est le corps dans son entier, permet justement de comprendre que les mouvements de l'acte phonatoire provoquent (en retour) l'étrange participation du corps entier, et pas seulement par une sorte de complexe vibratoire (pensons à la micro-kinésie découverte par Condon !), mais par l'accompagnement de gestes et de mouvements - comme nous l'avons dit plus haut - des hommes et des animaux». (von Schubert, 1850 : 172-173)

On peut comprendre le lien entre les mouvements des membres supérieurs et inférieurs et la production de la voix autrement que dans le sens où Schubert l'entend. Mais ce qui est certain, c'est qu'il a rendu très tôt attentif à un lien fondamental entre ces deux modes de production et d'expression et cela d'une manière très différenciée.

Kendon (1986) dit, 116 ans plus tard: « *The coordination of gesticulatory phrases and speech phrases is so close that it is clear that they are under the governance of the same guiding principle.* »

Llorca (1994,1997), qui le cite, dit aussi « *le même principe énergétique ou organisateur* ». Elle a créé une méthode artistique et pédagogique de "théâtre rythmique" où l'on utilise ce principe. Elle a développé la correspondance entre la hauteur, la durée et l'intensité sonore donc entre les qualités prosodiques et rythmiques et celles des mouvements les accompagnant. « *La voix se voit* » dit-elle. D'après nous, en suivant cette démarche liée à ce principe organisateur commun on aboutit aussi aux qualités des voyelles, des consonnes, des syllabes qui forment le « corps sonore », phonoplastique des mots dans lesquels vivent les significations. Nous touchons par là au problème de l'arbitraire et de la motivation des signes.

4.2. Le larynx : un homme en miniature

Son lien avec la stature verticale et la mobilité gestuelle de l'organisation des bras

Nous référons dans ce chapitre toute la substance d'une conférence d'un médecin, le Dr. Husemann, conférence à laquelle nous avons personnellement assisté en 1986.

Husemann veut démontrer qu'on ne peut comprendre la place particulière du larynx humain qu'en comprenant comment la stature verticale intègre et surmonte la pesanteur terrestre permettant ainsi au système musculaire de se libérer. Les « chaînes musculaires » dont on parle en « anatomie fonctionnelle » sont comme des traces cristallisées, des « lignes de force », liées à la répartition mobile de la pesanteur. Pour la mobilité des bras par exemple ces chaînes musculaires commencent par des réseaux fibreux déjà sous les genoux pour finir aux avant-bras opposés. C'est-à-dire que si l'on fait le geste de donner quelque chose à quelqu'un ou d'indiquer avec la main droite, on peut voir, précéder, anticiper un « mouvement » en arrière plan comme support dans le mollet gauche. *Le lieu de croisement* des muscles fessiers et du grand dorsal n'est en fait tissé que de tendons. Il est situé juste derrière le lieu où le *centre de gravité* de tout le corps est concentré. Tout se joue autour de cette région. Le contrepoint, le point polaire lui correspondant, est **le larynx** qui lui se trouve au maximum de ce qu'on appelle en mécanique, en statique : **le point d'indifférence** (dont parle Schubert dans la citation plus haut). Husemann fait remarquer que les animaux tombent rarement ou qu'ils tombent toujours bien, car ils ont un centre de gravité stable, à l'extérieur de leur corps, ce qui fait aussi qu'ils sont d'une certaine manière riviés à la pesanteur. L'être humain, lui,

possède un *équilibre instable*, ce qui lui donne cette liberté jusque dans son anatomie et sa physiologie. Mais l'être humain est aussi de cette manière vraiment sur terre (ce qu'on pourrait prouver par l'organisation du pied) et c'est comme cela qu'il surmonte la pesanteur, joue avec elle. C'est dans la parole que ressort **de manière audible** cette liberté d'évolutions, de déplacements rythmiques, de mouvements. Le larynx est donc tendu dans une région où la pesanteur est surmontée. Les muscles qui s'y trouvent, surtout les muscles intrinsèques, sont les plus petits muscles volontaires que nous possédions. Ils sont libres de tout travail dans le champ de la pesanteur, de toute tâche mécanique, d'où leur mobilité, leur grande liberté pour concentrer les possibilités « motiles » **du tonus musculaire du corps entier** qui y devient **ton** (tonos en grec, tension), son, **mouvement sonore**, geste.

Le larynx est tendu entre des muscles extrinsèques et pas n'importe lesquels.

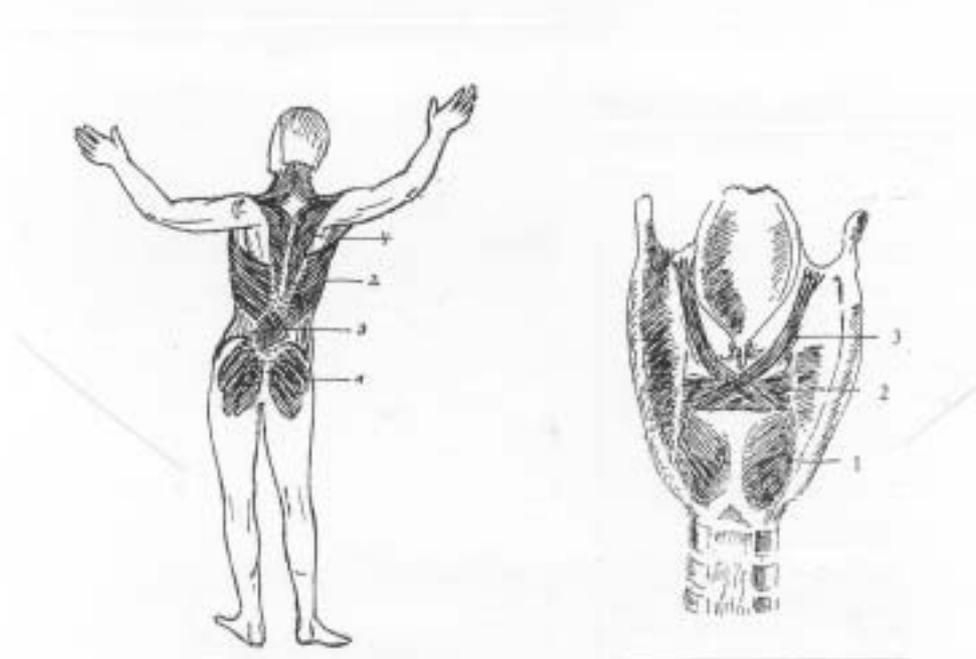


Figure n° 8 :

Homologie fonctionnelle

Dessin de Husemann (1986)

Musculature du dos :

1. *Glutaeus maximus*
2. *Latissimus dorsi* :
3. *Croisement des chaînes musculaires*
5. *Trapezius* (d'après Hoepje 1961)

Muscles extérieurs du larynx :(vue de dos)

1. *M. cricoarytaenoideus*
2. *M. arytaenoideus, pars transversa*
3. *M. arytaenoideus, p. obliqua*
(d'après Spalteholz 1940)

On comprend vraiment les remarques de Schubert, dès 1850, à la lumière de ces correspondances qu'on pourrait, d'après Husemann, développer sur le plan fonctionnel entre les omoplates et les cartilages aryténoïdes par exemple.

A notre connaissance les omoplates et les minuscules cartilages arythénoïdiens - qui nous permettent de moduler les positions et la tension des cordes vocales - *sont les deux seules « articulations flottantes »* dans notre organisme. Déjà en 1880 H.von Meyer avait fait une étude anatomique très poussée des muscles qui déterminent les minuscules mouvements des cartilages arythénoïdiens , et donc des cordes vocales, et avait comparé leur unité fonctionnelle avec le réseau musculaire qui fait *glisser* les omoplates, chose qui nous permet l'extrême mobilité des bras et des doigts. Nous ne connaissions pas à l'époque cette description très précise de von Meyer et n'avons pas pu demander au docteur Husemann si cette source lui était connue. (Meyer von, 1880:voir notre bibliographie pour un PDF gratuit.)

Vus de dos, les muscles du larynx reproduisent, naturellement d'une manière métamorphosée, la musculature dorsale dans ses grands principes. Le croisement est ici juste devant les cartilages aryténoïdiens où sont attachées les cordes vocales. (Voir la figure n° 8 ci-dessus)

La force de verticalité - cette volonté de se dresser et de surmonter la pesanteur ou plutôt de l'intégrer devient ici force de la voix et du langage : les sons étant des modulations, des variations musculaires gestuelles et des formes en mouvement audibles, puisque se réalisant avec et dans l'air. L'être humain peut marcher, saisir et parler dans l'air comme l'oiseau peut voler et chanter.

Nous insérons ici pour compléter les remarques de Husemann un passage de Jacob Grimm dans sa conférence : « Sur l'origine du langage », donnée en 1851, en l'honneur de Herder :

« (...) Le développement ordonné des sons s'appelle chez l'être humain l'articulation et la parole humaine apparaît comme une parole articulée. Une chose essentielle pour cette articulation est la stature verticale avec laquelle l'être humain peut produire calmement les différentes sonorités, les lier entre elles alors que l'animal, lui, est penché et rivé à la terre (...) Quelques espèces animales s'apparentent à la stature humaine par le fait de pouvoir tendre le cou ou de s'en rapprocher d'une tension du cou qui rappellerait la station verticale humaine. Etrangement ce n'est pas chez les mammifères mais chez les oiseaux que l'on voit cette possibilité. C'est justement chez ces oiseaux comme les perroquets, les corbeaux, les étourneaux, les pies, les pics verts qu'on voit cette possibilité d'imiter de façon presque parfaite des mots de la parole humaine ». (Grimm, 1851 : 112-113)

(Nous avons nous-même en tant qu'enfant, entendu un « geai bleu des chênes » en captivité dans une ferme répéter les mots : « minou, minou » que lui avait appris le paysan.)

Avec les éléments que donne Husemann nous pourrions comprendre le phénomène des oiseaux « parleurs » ou « imitateurs » ainsi : la position verticale approximative de l'oiseau déplace son centre de gravité vers la ligne médiane du corps détendant ainsi les muscles pour un instant, les libérant d'une tension qui est normalement en lutte constante avec les forces de pesanteur. Cette force libérée du tonus musculaire est alors utilisée par l'oiseau pour se glisser dans la suite des **mouvements** des quelques mots qui lui sont prononcés. Il peut ainsi répéter ces mots.

Des études sur les perroquets gris ont été réalisées par Perperberg (2002, in : Abitbol, 2005:463-470). Effectivement on peut observer chez le perroquet *une mobilité de la langue* et la possibilité de saisir des objets dans ses pattes. Il peut même imiter certains mouvements du corps et de la tête de ses propriétaires. Il serait intéressant de mettre cela en rapport avec la position verticale à laquelle Grimm faisait allusion. Ces capacités hors du commun chez les perroquets gris d'Afrique se reflètent dans leurs structures cérébrales d'après les études de Perperberg.

Sans entrer dans tous les détails anatomiques et biomécaniques d'Husemann, nous terminons ce chapitre par ses conclusions :

« Les cordes vocales sont comme des bras fixés et métamorphosés dont les mains se retrouvent dans la cavité buccale jusqu'aux lèvres. Celles-ci, avec la langue, jouent sur les cordes du courant aérien et le modulent ».

C'est l'idée de Paget de « la langue comme troisième main » mais développée dans toutes ses conséquences.

4.3. L'organe de la langue : cette troisième main

Remarque : Les éléments de physiologie et d'anatomie fonctionnelle que nous apportons sur la langue viennent en partie d'entretiens avec des kinésithérapeutes et des ostéopathes lors de congrès de dentisterie.

Nous faisons allusion à quelques détails de neurophysiologie mais sans les approfondir car cela dépasserait nos compétences et le cadre de cette étude.

Pour nous il est important de montrer que l'activité phonatoire et la résultante de tout « le corps de mouvements », de la « dynamosphère », aussi bien sur le plan phylogénétique qu'ontogénétique. L'organe de la langue étant celui qui modèle la « pâte sonore », il nous importe donc de comprendre sa place particulière et ceci dans ses liens fonctionnels avec le corps entier. Nous avons laissé de côté toute la partie cognitive et psycholinguistique qui devrait aussi s'ajouter à cette approche.

4.3.1. La langue : cette troisième main

Ce n'est que depuis les quelques dernières décennies, grâce surtout aux méthodes échographiques et I.R.M., que des observations plus précises ont pu être faites pour mieux comprendre la cavité buccale, la langue et surtout le palais qui a été encore peu exploré sur le plan neurophysiologique (Voir des clichés en I.R.M., Chapitre III).

Dans les bases théoriques de notre travail, abordées déjà dans notre D.E.A., nous avons rendu attentif à l'importance de la situation de *quasi apesanteur* du larynx. Le larynx est effectivement situé *au point d'indifférence*, comme on le nomme sur le plan de l'anatomie fonctionnelle et de la statique. C'est le point opposé au centre de gravité, situation donnée par les chaînes musculaires, ou le point « complémentaire ».



Figure n° 9: À l'opposé du centre de gravité le point d'indifférence.
(Benninghof und Goertler, 1961, cité par Roehmer, 1987)

Ces choses sont très bien connues en posturologie et orthodontie où l'on constate la « résultante » de ces lignes de force des chaînes musculaires dans la position avancée ou

reculée de la dentition. C'est souvent dans les pieds ou dans le bassin qu'on trouve l'origine de tensions qui s'expriment alors dans les maxillaires.

Comme le font aussi fort justement remarquer les orthophonistes qui ont publié l'ouvrage « Une voix pour tous » : « *Le larynx est suspendu, en équilibre. L'image des anciens micros est assez intéressante pour illustrer le larynx en équilibre.* ». (Heuillet-Martin *et al.*, 1997:135)

Dans nos cours de formation de la voix et de la parole nous rendons souvent attentif au fait que des tensions musculaires au niveau du cou et du dos influencent négativement le larynx et la langue ce qui ressort dans la production sonore et phonique. Effectivement un muscle fléchisseur du larynx (*M. sterno-hyoideus*) relie l'*os flottant* hyoïde, en passant sous la clavicule, à la partie supérieure de l'omoplate. Un deuxième muscle fléchisseur du larynx relie aussi l'*os flottant* hyoïde mais à l'épiphyse proximale de la clavicule. C'est donc la ceinture scapulaire entière qui est en jeu et intègre le larynx. C'est-à-dire que tous les mouvements des bras et des doigts influencent légèrement les mouvements du larynx et donc la voix, chose bien connue surtout des chanteurs et qu'on peut observer dans leur manière de tenir les bras dans une attitude de flottement. On peut comprendre par ces liens fonctionnels en quoi les « jeux de doigts » peuvent avoir une influence dans le développement langagier, spécialement l'élocution, la formation des sons. Plus un enfant est capable de différencier ses doigts et de les relier entre eux différemment (là aussi les deux hémisphères cérébraux sont constamment mis en relation) plus cet enfant est capable de mieux différencier, de former et de combiner les sons du langage.

Ce principe de quasi apesanteur se retrouve aussi dans les muscles du visage qui sont en partie entrelacés entre eux, de telle sorte qu'ils ne s'accrochent plus au squelette facial. Ils n'ont (presque) plus - de fonction musculaire mécanique, liée au fait de surmonter la pesanteur. Ils sont ainsi dans leur tonus entièrement au service des expressions de la vie psychique, des sentiments et des émotions. (Cole, 1998 : 68)

Il se trouve que la langue, cet organe formé essentiellement de 17 muscles en synergie, vit aussi quasiment en apesanteur. Pendant le sommeil la langue en repos est collée au palais par un effet de succion. Ce principe d'apesanteur ou de quasi apesanteur est confirmé par le fait que nous sommes aussi incapables de différencier des poids de valeurs inégales posés sur la région apicale. Par contre, cette même région apicale est 7 fois plus sensible sur le plan tactile

que la pulpe des doigts. Ainsi nous pouvons identifier les irrégularités les plus subtiles de la surface d'un objet dans notre bouche, mais en exagérant l'impression de sa taille.

C'est la sensibilité tactile extrême de la langue qui a mené à la création de cette « seeing tongue » pour les aveugles et les chirurgiens. Elle a été aussi présentée dans certaines émissions télévisées qui ont fait sensation. On place une sorte de bandeau muni d'une caméra au front d'un aveugle né. Les pixels de l'image sont transposés en impulsions électriques sur environ 400 minuscules pointes métalliques intégrées à un ruban en résine que l'aveugle prend dans la bouche et maintient sur sa langue.



Figure n° 10: *The seeing tongue* (Sampaio, E., S. Maris., and P. Bach-y-Rita. 2001)

Avec cet appareillage l'aveugle peut déjà reconnaître des lettres, des silhouettes, la distance approximative de certains objets. Cette technique est en plein essor.

De la même manière qu'on peut écrire sur le dos d'un jeune élève des lettres de l'alphabet, des chiffres ou dessiner la silhouette d'un arbre par exemple et qu'il peut ainsi « visualiser » dans sa représentation mentale le résultat, de la même manière, avec la surface de la langue, par laquelle on peut différencier deux points éloignés d'un millimètre à peine, l'aveugle peut visualiser les formes des lettres ou des silhouettes.

De plus nous pouvons très facilement identifier la forme, le volume d'un objet avec la langue. Ceci est dû au fait que les muscles de la langue sont entrelacés dans les trois axes de l'espace : les axes sagittal (longitudinal), horizontal (transversal) et frontal.

Les études toutes récentes de Takemoto (2001) mettent de plus en évidence cinq couches internes de fibres musculaires ainsi que leur entrelacement dans les trois axes spatiaux. Elles viennent ainsi confirmer entièrement ce que l'on peut trouver dans certains ouvrages d'anatomie fonctionnelle. (Rohen, 2001 :116)

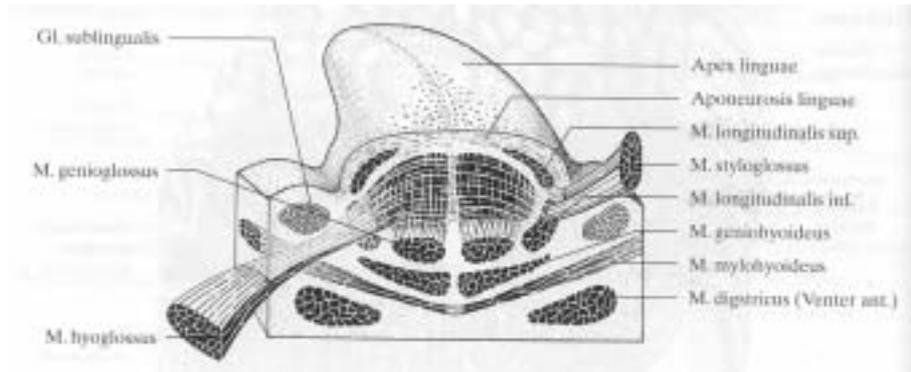


Figure n° 11 : M.hyoglossus : plan transversal , M.styloglossus :sagittal, M.genioglossus :vertical

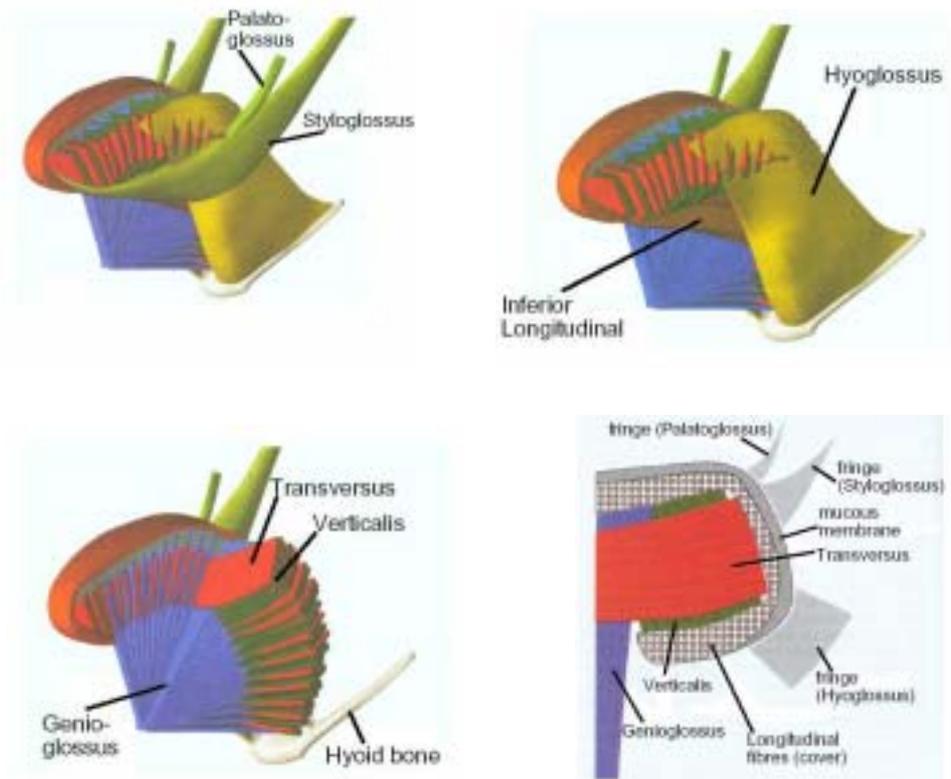


Figure n° 12: Les couches musculaires de la langue Takemoto (2001)

On peut comprendre avec ces éléments que les mouvements de la langue pendant la formation des sons du langage sont aussi une expérience d'orientation spatiale et temporelle au sein de l'espace buccal mais dans une « légèreté » de quasi apesanteur et une extrême rapidité. C'est une saisie spécialisée de notre schéma corporel. Nous y revenons un peu plus loin.

Une chose importante que nous avons très rarement vu mentionné quand il s'agit de la cavité buccale, c'est le fait que l'organe la langue - et ce serait trop simplifié de ne parler que des

« muscles de la langue » - change extrêmement rapidement de forme mais sans pour autant changer son volume. A cela s'ajoutent les microreliefs créés par les circonvolutions de la langue pendant la phonation est mises en évidence depuis peu par I.R.M (voir chapitre III).

Les muscles intrinsèques de la langue sont innervés comme aucun muscle dans l'organisme humain. Nous donnons un extrait d'un article d'une des plus grandes spécialistes des recherches sur la langue, Maureen Stone, avec qui nous avons pu échanger lors de son passage à l'Institut Phonétique de Strasbourg. Elle a aimablement donné aux participants de sa conférence des copies de quelques vidéos de ses prises de vue de la langue en action pendant la parole.

Stone sur les circonvolutions de la langue :

« In the speech production process, the tongue deforms in a complex fashion, often executing the gestures for two or more phonemes simultaneously. A basic question in speech production research is how the highly deformable tissue of the tongue is controlled for the accomplishment of speech.

*Neuroanatomical studies have indicated potentially very complex innervation of the tongue. A number of studies indicate that **the human hypoglossal nucleus is composed of at least 6500 motoneurons per side** (Wozniak and Young, 1969; Atsumi and Miyatake, 1987; O'Kusky and Norman, 1995); thus at least 13,000 hypoglossal motoneurons innervate the human tongue. For example, the tongue contains repeating, alternating, laminae of vertical (genioglossus(GG), verticalis (V)) and horizontal (transverses(T)) fibers, **each of which contains its own motoneuron** (Mu and Sanders, 1999; Takemoto, 2001). Since every motoneuron is potentially an independent unit of control, then T, V and GG could have multiple segments of control (cf. Miyawaki, 1975). Tongue neuronatomy therefore provides evidence for movement by local control along the tongue, as opposed to control of the tongue body as a unit. It is unlikely however that each motor unit, or small number of units, is separately controlled in the speech production task. Several theories have proposed mechanisms whereby the control system reduces the number of degrees freedom at its disposal. Action theory approaches to peripheral control have modeled rapid complex shape changes using synergistic muscle actions or coordinative structures (Turvey, 1977; Fowler, 1980). In that model, muscles behave as synergistic groups to create specific shapes. The synergies or structures act as a single unit with trade-offs in the amount of contraction for any single muscle in the group. This allows a simpler control mechanism than one in which each muscle independently receives a command for each gesture.*

*We aim for an **intermediate model** with a larger number of degrees of freedom than a two-part tongue (tip and body), but far fewer than 13,000. Our hypothesis is that tongue deformation is controlled by the **synergistic coordination** of 'functional segments' of the tongue. These segments are laid out orthogonally to the longitudinal axis of the vocal tract as portrayed in figure 1 and composed of multiple muscle systems » (Stone and Lundberg, 1996).*

Stone émet l'hypothèse d'un fonctionnement et d'un contrôle synergétiques de segments fonctionnels des muscles de la langue. On peut donc supposer le rôle encore peu compris mais fondamental du cervelet dans ces fonctions. Le cervelet joue un rôle important pour toute forme de synergies musculaires dans l'organisme. C'est l'avis du professeur Alain Berthoz dans son ouvrage «Le sens du mouvement »:

« Dans l'organisation des synergies, le cervelet joue sans doute un rôle fondamental. » (Berthoz, 1997 : 177)

Apparemment la triade majeure des muscles de la langue, hyoglosse, génioglosse et styloglosse, ne fonctionne pas comme les autres muscles avec le système agoniste-antagoniste : c'est-à-dire qu'ils n'ont pas d'antagonistes ! De plus, ils semblent être directement reliés au système nerveux central et n'auraient pas de contrôle fuseaurial neuromusculaire. On pense tout de suite au fait que la langue est un organe dans lequel la conscience humaine est extrêmement développée. Sa projection dans l'homunculus de Penfield, mais aussi dans les travaux récents en imagerie cérébrale, montre l'immense place qu'elle prend dans notre conscience, d'où son reflet dans les régions corticales.

Sir Paget, le grand linguiste, avait déjà formulé dans une conférence en 1938 : *«The tongue, this third hand.»** et on découvre toujours plus le bien-fondé d'une telle caractérisation que nous reprenons ici et là le long de notre travail.

*nous n'avons malheureusement pas retrouvé la source de cette phrase qui proviendrait d'une conférence de Paget. On trouve dans son ouvrage principal de 1930 «The Human Speech » tous les éléments et les conceptions pour comprendre cette affirmation sur la main.

Les muscles majeurs de la langue, nommés plus haut, ne sont pas comme les autres muscles aussi par le fait qu'ils ne sont pas reliés à deux insertions squelettiques, comme la majorité des muscles striés volontaires, mais à une seule. Le deuxième point d'attache ou d'insertion étant purement fonctionnel: c'est l'objet ou l'aliment touché, goûté par la langue. Dans le cas de la phonation nous pourrions dire aussi que ce sont les différents points de contact, au palais mou

ou dur, ou bien contre les dents par exemple, qui sont autant de points d'insertion pour cette activité musculaire extrêmement rapide qu'est la phonation. Et là les recherches entreprises dans le projet de Grenoble sur les réseaux d'innervation de la langue et du palais fourniront des éléments nouveaux extrêmes précieux.

D'après nous, l'activité de la parole, dans son aspect articulatoire, mais certainement aussi sur le plan d'un vécu semi conscient, est une expérience d'orientation spatiale et surtout gestuelle très subtile. Les orthophonistes et les rééducateurs du langage le savent bien et ils ont toute une panoplie d'exercices de coordination, de jeux et de comptines pour aider les enfants à prendre possession de leur langue, à maîtriser ses différents mouvements et à s'orienter dans leur espace buccal. Mais très souvent il nous faut d'abord réorienter l'enfant dans son espace corporel, son schéma corporel dans son entier, avant d'obtenir quelque résultat durable au niveau de l'espace buccal. Là encore le cervelet doit jouer un rôle sous-jacent mais fondamental.

De la même manière la reconquête de l'agilité manuelle, des variations de la motricité fine des différents doigts permet un « relancement », un affinement de la motricité phonatoire. Ce sont des choses pratiquées en rééducation du langage après des accidents cérébro- vasculaires ou chez des patients atteints de la maladie de Parkinson.

Et c'est justement depuis peu que nous trouvons enfin des études sur le rôle que jouent les connexions dans le cervelet pour la production et la perception de la parole. (Le thème de l'année 2007 de la revue *Folia phoniatica: Cerebellum and Speech*)

Écoutons un homme d'expérience qui utilisait son corps, ses gestes, son souffle, sa bouche, ses lèvres, sa parole entière comme instrument : Jean-Louis Barrault. Dans ses notes de travail « *Mise en scène de Phèdre* », on trouvera des remarques sur l'organe de la langue et sur la cavité buccale, remarques que nous pouvons qualifier d'observations psychosomatiques. C'est-à-dire que l'artiste est capable de donner des renseignements sur des réalités physiologiques normalement inconscientes, ou semi conscientes, grâce à l'exercice ciblé de sa sensibilité intérioceptive, proprioceptive et extéroceptive.

Nous rappelons ici que le domaine intérioceptif est celui de la sensibilité viscérale, le domaine proprioceptif celui lié aux sensations de l'équilibre, de l'unité dynamique du corps, des attitudes, des mouvements et le domaine extéroceptif, celui tourné vers les excitations d'origine extérieure. (Wallon, 1949 : 186-199)

Barrault fait la remarque suivante, après avoir montré que *« l'acteur doit non seulement avoir, comme le chanteur, la voix placée, mais il doit pouvoir la « déplacer » :*

« Avoir la voix « placée » pour un spécialiste de la voix, c'est se servir de préférence, pour timbrer sa voix, des cavités et tuyaux de résonance du haut de la tête. (...) L'acteur, lui, doit pouvoir passer d'une résonance à l'autre. Il ne doit jamais y avoir divorce entre le timbre de sa voix et le souffle de sa vie. Pour le chanteur, c'est la note qui compte.» (Barrault, (1946)1972 : 58-59)

Barrault précise que l'orateur, l'acteur *« doit pouvoir, sans fatigue, passer d'un placement de voix à un autre. Il doit pouvoir se « déplacer » la voix ».*

Il nous fallait donner ces remarques sur la différence entre la voix chantée et la voix parlée pour comprendre ce qui va suivre, mais aussi parce qu'on le retrouvera dans notre thèse, à la fin du DVD (6e partie).

« L'acteur ne doit pas méconnaître ces continuels déplacements de voix, et même il serait utile qu'il existât un solfège de déplacements de voix, grâce auquel l'acteur pourrait s'entraîner et acquérir une souplesse exceptionnelle, faisant aisément taper son souffle, soit contre la lèvre supérieure, soit contre le palais, soit dans la gorge, soit contre la lèvre inférieure, région qui, respectivement, correspondent aux centres nerveux, intellectuels, sensuels et digestifs».

(Barrault, (1946)1972 : 58-59)

On comprendra l'intérêt qu'un formateur de la voix, un thérapeute du langage peut ressentir quand il prend connaissance du vaste projet « COG-Speech », *« Du Contrôle Orofacial des Gestes dans la communication chez les primates jusqu'à la Parole humaine »*, projet dirigé par Jean-Luc Schwarz, de l'ICP de Grenoble. Un réseau de chercheurs et d'instituts a été créé pour cela.

Nous espérons obtenir de ces études des éléments nouveaux qui viendront étayer les observations de Barrault et nos propres observations empiriques concernant les relations entre la topologie de la cavité buccale et le schéma corporel dans son ensemble, car dans le cadre de ce projet des travaux histologiques *d'anatomie comparative et de neurophysiologie de la langue et du palais ont été entamés*. Hironori Takemoto travaille sur l'anatomie comparée de la musculature linguale, comme nous l'avons montré plus haut, et Didier Demolin et Gordon Ramsay sur l'innervation comparée du palais.

Nous citons les passages principaux liés à l'étude de la langue et du palais:

«L'objectif de cette étude est principalement de se focaliser sur le développement de l'innervation du palais. Cette région fournit, simultanément avec l'information proprioceptive qui vient des fuseaux musculaires dans la langue, la base essentielle de la représentation sensorielle nécessaire à détecter les contacts entre langue et palais, qui caractérisent la plupart des consonnes dans les langues du monde, ainsi que certaines des voyelles. On espère tester l'hypothèse que l'émergence de la production et la perception des consonnes puisse avoir été considérablement influencée par des développements importants de l'innervation dans la région palatale, vraisemblablement à cause de changements dans le régime alimentaire des hominidés.

En effet, de nombreuses études anatomiques, histologiques, et électro-physiologiques ont été réalisées sur plusieurs espèces afin d'examiner les différents types de capteurs dans le palais ainsi que la sensibilité des différentes régions de la muqueuse orale. Chez la plupart des mammifères, les terminaisons sensorielles sont concentrées sur une série de crêtes transversales (rugae palatinae) uniformément distribuées le long du palais. La fonction principale de ces crêtes est sans doute liée à la manipulation d'aliments dans la bouche. Chez l'homme, la région palatale a subi de nombreuses modifications morphologiques, notamment en ce qui concerne la forme et les dimensions des os maxillaires. Les crêtes palatines se sont avancées vers la région alvéolaire, et la région de tissu mou autour de la luette s'est élargie. On ne sait pas encore si l'innervation de la région palatale est restée inchangée, si elle a suivi ces changements morphologiques, ou si elle s'est développée autrement au cours de l'évolution. Les changements de la forme géométrique du palais ont certainement eu une grande importance pour la génération de contacts efficaces avec la langue, mais ce qui est probablement plus important pour le contrôle de ces contacts, c'est la disposition de l'innervation sensorielle pour détecter ces contacts dans des régions spécifiques du palais. Les fibres des nerfs palatins sont malheureusement très difficiles à suivre par les procédures traditionnelles de l'histologie, et l'organisation fonctionnelle des axones sensoriels dans le palais et la luette reste largement inconnue. Si on ne dispose pas de cette information pour plusieurs espèces, surtout des primates et l'homme, on ne peut pas savoir si la représentation sensorielle a subi des changements, et si ces changements ont pu jouer un rôle important dans l'évolution de la production de la parole. Une technique histologique, la teinture de Sihler, a été récemment redéveloppée ; elle permet de visualiser avec beaucoup de précision le détail de la structure des nerfs périphériques. L'innervation du larynx et de l'oropharynx, ainsi que la structure interne de la langue, ont été considérablement éclairés en utilisant cette méthode, mais le palais reste encore à étudier. L'objectif de cette étude sera donc de tracer l'innervation sensorielle du palais, en utilisant la méthode de Sihler pour teindre les fibres nerveuses. La densité et la répartition spatiale des

types différents de méchanorécepteurs du palais seront mesurés, et comparés aux résultats d'études basées sur la stimulation électrophysiologique chez plusieurs mammifères. On fournira ainsi pour la première fois des données histologiques détaillées sur l'organisation spatiale des capteurs sensoriels et des fibres nerveuses de la surface du palais chez l'homme» (Schwartz, 2007).

L'aboutissement de ce projet « vise à réaliser un « robot parlant », Talking Cog, en implémentant des modèles articulatoire-acoustiques, des modèles de capteurs sensoriels, et des modèles d'apprentissage, puis en observant comment un tel système est effectivement capable d'apprendre à « babiller » puis à « parler » à partir des données captées dans l'environnement de communication, c'est-à-dire émises par les interlocuteurs. » (Schwartz, 2007)

Ce qui est significatif à notre époque c'est que des recherches en technologie poussée, souvent à des fins d'utilisation pragmatique, robotique, nous révèlent de même des fonctionnements jusque-là encore insoupçonnés ou mal compris de la nature humaine. Des relations transsensorielles, « transfonctionnelles » peuvent être ainsi mises en évidence et venir donner un fondement à des pratiques qui ont été souvent développées avant leur compréhension théorique et apporter ainsi des critères qui permettent de fonder une méthode. Formulé d'une autre manière: des travaux dans le cadre de la communication Homme- Machine nous poussent à approfondir la communication Homme-Homme. C'est ainsi qu'on n'a jamais autant étudié les nouveau-nés, leurs compétences langagières et le fonctionnement de leurs performances à fin de développer des ordinateurs toujours plus performants.

La langue ne vit que par le mouvement. Elle est en cela déjà très proche de la réalité du son et de la parole. Elle est « une forme informe », c'est-à-dire que nous voyons en elle déjà le principe d'un ordre chaotique, dynamique.

Pendant l'activité phonatoire la langue se déplace extrêmement rapidement comme le montrent les séquences filmées en échographie par Maureen Stone, par exemple celle d'un joueur d'harmonica.

Comme rappel: Il y a quelques années encore on ignorait ces microstructures extrêmement mobiles qu'on a mises en évidence grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM)

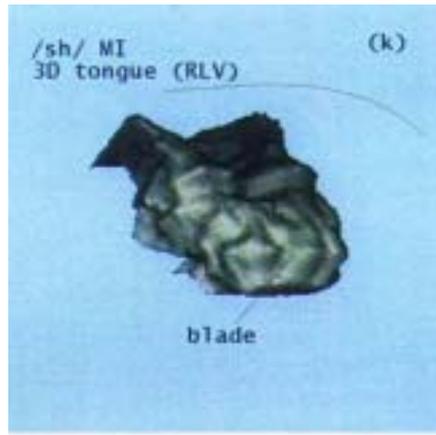


Figure n° 13: MR Images of Fricatives (Narayanan Alwan, and Haker, 1996)

Sur ces subtiles torsions linguales voir le chapitre IV consacré aux travaux de Rybak , qui lui aussi avait, déjà en 1988, mis en évidence des canaux transitoires spécifiques pour chaque son dans les circonvolutions de la langue.

4.3.2. L'organe de la langue et les doigts : une piste par la pathologie

Il y encore d'autres « symptômes » ou indices de relations fonctionnelles peu connues qui se font jour et qui montrent les liens subtils entre la langue, la parole, la main et les doigts.

Les résultats d'une étude publiée en 2002 par Fadiga, Rizzolatti (plus connu) et des collègues italiens de l'université de Ferrara, viennent renforcer ces relations fonctionnelles avec l'organe de la langue.

En utilisant la stimulation magnétique transcrâniale (TMS) on a mis en évidence une forte intensité de potentiels moteur évoqués de la région des muscles linguaux chez l'auditeur à qui on soumettait des mots prononcés de « manière appliquée » pourrait-on dire.

« Here, by using transcranial magnetic stimulation (TMS), we demonstrate that, during speech listening, there is an increase of motor-evoked potentials recorded from the listeners' tongue muscles when the presented words strongly involve, when pronounced, tongue movements. Although these data do not prove the motor theory of speech perception, they demonstrate for the first time that word listening produces a phoneme specific activation of speech motor centres » (Fadiga, Rizzolatti et al. 2002: 399).

Les chercheurs précisent que ces résultats ne sont pas encore une preuve entière pour la théorie motrice de la perception de la parole (motor theory of speech perception de Libermann en 1985,1968) mais qu'ils démontrent « *pour la première fois que l'écoute de mots produit une activation, **une activité des centres moteurs de la parole spécifique pour chaque mot.*** »

C'est nous qui traduisons et qui soulignons en plus ces derniers mots.

Des études avec la même méthode ont été faites pour mettre en évidence des potentiels évoqués dans les régions corticales du contrôle des mouvements de la main et des doigts.

Les chercheurs concluent que ces expériences montrent que l'écoute de la parole ne provoque pas seulement des réactions « gestuelles » du système oro-facial mais aussi dans la zone corticale impliquée dans les gestes, dans le contrôle moteur de la main. Ces activations automatiques ne surviennent pas seulement pendant la production la parole comme cela avait été constaté en 1996 par Tokimara et al. mais aussi pendant la perception du langage, perception pendant laquelle, cela est évident, les gestes de la main ne sont pas impliqués. Les chercheurs de cette étude concluent que ces résultats viennent confirmer l'hypothèse que le langage a peut-être évolué d'un réseau, d'un système synergique action-perception et qui probablement tirerait son origine d'un système de communication gestuelle, comme l'avait exposé Corballis, en 1992.

MacNeilage nous rappelle que la différence principale entre la parole et d'autres systèmes vocaux chez les mammifères est celle de l'élément articulatoire.

Nous rappelons ici qu'un des premiers linguistes à avoir fait des remarques pertinentes dans ce sens est Jacob Grimm, au XIXe siècle. Il mettait cette faculté du langage articulé en relation directe avec l'articulation rythmique de la marche humaine, libérée de la pesanteur, dans un équilibre instable, grâce à la station verticale !

MacNeilage fait remarquer :

« *Avec l'apparition de la marche bipède chez les hominidés les éléments respiratoires phonatoires prirent une position verticale. La partie postérieure du système articulatoire pris une position verticale mais la partie antérieure garde une position horizontale ce qui donna le tract vocal à deux tubes ou tube coudé.* » (MacNeilage, 1998 :500)

Mais MacNeilage ne fait aucune remarque sur le « découplage* », la séparation de l'activité respiratoire d'avec la fonction locomotrice qui apparaît chez l'être humain, à la différence, à notre connaissance, de tous les autres animaux, justement de par la stature verticale et la marche bipède. (*Dramble and Carrier, 1983).

Ceci est fondamental, car on comprend ainsi pourquoi l'être humain a vu sa respiration libérée et modulée par l'activité de la marche bipède. Et l'on comprend mieux l'intuition ou la remarque phénoménologique de Grimm, en 1851, quand celui-ci met la « parole articulée » en rapport avec la « marche articulée ». On pourrait dire qu'une respiration libérée d'une locomotion en lutte avec la pesanteur permet à l'être humain de faire réapparaître au niveau des maxillaires une autre « marche », celle de la langue et de parole, libre dans ses évolutions. On pourrait encore montrer comment l'équilibre instable et oscillatoire de la marche bipède verticale se répercute jusque dans l'articulation de la mandibule, articulation permet en grande partie la formation syllabique de la phonation.

4.3.3. L'écoute de la parole provoque chez l'auditeur une excitabilité différenciée des muscles de la langue

«The present data show that when an individual listens to verbal stimuli there is an activation of the speech related motor centres. Most interestingly, they show also that this activation is highly specific. Phonemes that require in production a strong activation of tongue muscles, automatically produce, when heard, an activation of the listener's motor centres controlling tongue muscles. This acoustic/motor `resonance' mechanism strictly resembles the observation/execution matching system involved in action recognition (mirror system). As in the case of the mirror system, this mechanism could be involved in phonetically `understanding' others' speech: phonemes are recognized because both the speaker and the listener share the same articulatory motor repertoire » (Fadiga et al. 2002: 402).

On connaît la participation « silencieuse » du larynx de l'auditeur en quasi synchronie avec la parole d'un locuteur qu'il écoute, mais les premiers résultats de cette recherche sur l'excitabilité des muscles de la langue chez l'auditeur montrent que cette participation synchronique est encore beaucoup plus différenciée. C'est ici l'organe la langue et tous ses muscles qui participent de manière sous-jacente ou *retenue* à l'audition de la parole. Ceci n'est pas sans nous rappeler l'expression qu'employait Condon pour décrire le phénomène de la microkinésie : « intended movements », mouvements intentionnés, ébauchés ou évoqués, et

c'est justement de « potentiels évoqués » dont il s'agit. C'est comme si dans l'acte d'écoute nous étions encore un peu enfant, c'est-à-dire que nous nous laissons aller à une « attitude ou activité imitative », ce que l'on explique actuellement par la théorie des « neurones miroirs » à laquelle il est fait aussi allusion dans les conclusions de l'étude que nous citons.

Comme nous l'avons présenté dans l'historique cité des recherches de Boris Rybak (chapitre IV) les fines structures cannulaires mises en évidence sont à considérer quant à la formation du son. Rybak est un des premiers à avoir utilisé les techniques d'échographie pour étudier les structures dynamiques de la langue pendant la phonation.

Maureen Stone (1996) a aussi fait de nombreuses études en trois dimensions sur les gestes dynamiques et les formes de reliefs que prend la langue pendant la phonation.

(Voir les voyelles [a, è, e] chapitre VI.)

4.3.4. Le pouce et son rapport avec la bouche et le visage : symptômes pathologiques

Voici un extrait d'un courrier électronique avec un neurologue, chef de service d'un hôpital civil, à qui nous avons posé quelques questions en rapport avec notre travail. Notre question portait sur les liens qui nous paraissent - de par notre travail et des enfants et des jardinières d'enfants - de plus en plus évidents entre l'opposition du pouce et des différents doigts de la main d'avec la langue et les contacts que celle-ci réalise à différentes zones du palais, de la cavité buccale, pour former, articuler la majorité des sons du langage et modeler l'air phonatoire en créant ces formes aériennes.

« Les rapports entre le pouce et le visage sont évidents dans de nombreuses circonstances en neurologie :

- lors d'accidents vasculaires cérébraux, on peut avoir un déficit limité au territoire facial inférieur et à la main, voire au pouce

- lors de certaines crises d'épilepsie motrice, dites Bravais-Jacksoniennes, les manifestations motrices (les clonies, c-à-d des convulsions) touchent le pouce puis les muscles de la commissure labiale du même côté, avant de s'étendre au reste de la main puis à l'avant-bras :*

- dans le cadre la récupération après certaines lésions cérébrales (souvent des accidents vasculaires), lors de la contraction du pouce ou de la main on peut observer des syncinésies de la bouche, c-à-d des contractions parasites. Il s'agit de l'activation anormale de régions corticales contiguës à celles sollicitées (du fait de repousses nerveuses anarchiques). Cf figure jointe.

Tout ceci s'explique bien par la représentation corticale des régions motrices (cf homunculus moteur), où le pouce et la bouche sont très proches.

On a la même chose pour les représentations corticales des régions sensibles, même si l'homunculus n'a pas tout à fait la même forme. Dans les migraines avec aura certains patients décrivent bien, avant d'avoir mal à la tête, des paresthésies (picotements) cheiro-oraux (au pouce ou à la paume et au coin de la bouche du même côté).

*on se souviendra des observations de Lynch sur les changements de pression sanguine périphérique dans le pouce et l'avant-bras pendant la parole, mais aussi pendant différentes activités humaines stressantes ou non. (voir ci-dessus 3.)

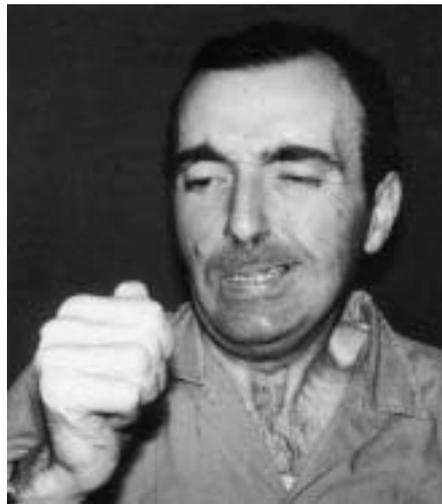


Figure n° 14: Syncinésie (de Recondo, 1995)

Cette photographie

« montre un malade dont la fermeture du poignet sain accentue la contracture de l'hémiface paralysée (fermeture des paupières à gauche, attraction de la commissure labiale gauche). Il existe des relations étroites entre les aires contrôlant le pouce et la main d'une part, la bouche et le visage d'autre part. Il existe d'ailleurs un réflexe palmo-mentonnier et un autre pollicommentonnier, qui sont des réflexes dits archaïques, car disparaissant chez le sujet adulte sain : le

fait de caresser la paume ou le pouce déclenche des mouvements de mâchonnement par activation des muscles mentonniers. » (Dr Sellal, communication personnelle.)

Nous n'avons pas trouvé d'études neurophysiologiques et d'imagerie cérébrale sur la conscience spécifique des différents doigts de la main chez l'être humain, quelques-unes seulement sur l'entraînement de certains doigts de la main du singe.

L'importance des comptines qui vivaient dans toutes les cours d'écoles et les rues des villes et villages du monde entier est encore à explorer. On les retrouve maintenant dans les livres d'orthophonie et d'ergothérapie.

4.3.5. Différents types de préhension influencent la production des sons du langage

Une étude récente de Gentilucci *et al.* sur l'influence de différents types de préhension, de saisie d'objets sur l'articulation, la prononciation de sons du langage dans des syllabes vient confirmer les expériences de terrain dans les maternelles et les cabinets d'orthophonistes. Cela confirme aussi les études longitudinales sur les bébés citées plus haut. (2.3.Kolzova)

Nous donnons quelques résultats pertinents pour notre compréhension d'une phonologie gestuelle :

« Grasping with the hand affected not only aperture of the mouth, but selectively affected movement of inner or outer parts of the mouth according to pronunciation of the syllable. Indeed, synchronization between hand and mouth movement beginning varied according to the syllable, and sound power level varied according to object size » (Gentilucci *et al.*, 2001: 1698).

Que la force du son, sa qualité, varie avec la taille de l'objet saisi est une observation qui vient renforcer, confirmer l'expérience de terrain avec des enfants en orthophonie ou des étudiants en art dramatique.

Ces chercheurs font ensuite quelques hypothèses d'ordre phylogénétique sur l'origine gestuelle langage puis ils concluent :

« Premotor neurons involved in generating multiple grasp signals to hands and mouth might be used to transfer motor patterns from hand to mouth. The hypothesis of a common substrate used

for hand gesture and speech production is supported by a research showing that deaf children, when learning American Sign Language, go through a “hand-babbling” stage, in which they manipulate sublexical elements of signs, much like the babbling stage of hearing infants. (Petitto and Marentette, 1991). » (Gentilucci et al., 2001: 1698)

Pour ces chercheurs l'hypothèse d'une origine commune du langage gestuel et du langage oralisé ressortirait de ces résultats et serait renforcée par les études longitudinales faites sur des jeunes enfants sourds par Petitto and Marentette (1991). Ces enfants avaient eu la possibilité d'apprendre la langue des signes américaine dès le berceau. Ils ont pu ainsi avoir une évolution langagière saine et tout à fait comparable à celle des enfants entendant et avec une phase de babillage « digitale ou manuelle ». Ce phénomène du « babillage manuel » des enfants sourds avait déjà été observé mais sans le fondement d'une étude longitudinale.

Annexe II

Bandes ventriculaires, ventricule de Morgagni et phonation

Une étude sur la production de voyelles avec différents types physiologiques d'attaque vocale.

On observe

« la quantité d'air consommé durant les 200 millisecondes initiales de la phonation, la perte d'air avant la vocalisation et le temps d'apparition de l'air trachéal. Une attaque douce est caractérisée par un long temps d'apparition et une faible consommation d'air, alors qu'une attaque violente est associée à un bref temps d'apparition et à une forte consommation d'air. L'attaque vocale avec inspiration profonde est d'un type différent d'où une origine physiologique différente » (Koike, Y, 1967 :181-182).

Une lecture attentive de l'article rédigé en anglais montre que le résumé final écrit en trois langues laisse apparaître une erreur de traduction : la troisième attaque vocale évoquée juste au-dessus est caractérisée dans la traduction française par « l'attaque vocale avec inspiration profonde », *breathy voice* en anglais, *Ueberhaucht* en allemand, n'a rien à voir avec une inspiration profonde mais avec une perte inutile d'air de l'expiration juste avant la vocalisation, la phonation. On devrait parler d'attaque « exhalée », où l'haleine est trop expirée et les plis vocaux trop lâches, sans tonus.

Les auteurs concluent, en donnant quelques exemples, que l'observation de ces types d'utilisation, de gestion de la respiration peuvent être utiles pour appréhender des aspects pathologiques de la voix.

Malheureusement les auteurs ne font aucune remarque sur la qualité acoustique de la voix dans ces trois types d'utilisation de la ventilation ou de la respiration.

Ces trois types sont d'ailleurs bien connus en physiologie de l'éducation de la voix.

Nous ajoutons une remarque personnelle venue de notre expérience de la formation de la voix.

La traduction d'attaque *violente* pour *hard attack* n'est pas tout à fait exacte non plus : on devrait plutôt parler d'attaque *dure* en opposition à l'attaque *douce*. Naturellement on pourrait considérer que la personne qui présente une attaque dure se fait aussi légèrement « violence ».

Il y a des langues vivantes qui ont une attaque dure par rapport à d'autres : comme l'allemand par rapport au français. Mais au sein d'une même langue les formateurs de la voix tout comme

les phoniâtres travaillent avec *cette même typologie tripartite* pour caractériser la constitution des personnes.

L'attaque idéale étant appelée *l'attaque douce ou l'attaque élastique, souple*. C'est celle du *juste milieu* entre les deux autres attaques extrêmes qui sont les symptômes d'une pathologie ou qui mènent à des pathologies.

L'attaque dure ou écrasée provoque à la longue de nombreuses dysphonies. On la rencontre chez un certain type d'enfants, de type respiratoire –moteur, dans la typologie du français Le Senne, qui ont une voix criarde, enrôlée, mais aussi chez beaucoup de professionnels qui travaillent sous une forte pression ou qui doivent souvent s'imposer par leur organe vocal (professeurs de sport, chefs de chantier etc.).

A l'opposé, *l'attaque exhalée*, est trop lâche. Le souffle n'étant pas suffisamment bien géré, il s'échappe trop et dessèche les cordes vocales de sorte que celles-ci sont trop détendues. Effectivement quand il y a un rapport équilibré entre la phonation et l'articulation, entre l'élément vocalique et l'élément consonantique, c'est-à-dire entre les pressions sub-et supraglottiques, il se produit *un massage subtil* entre les plis vocaux (les cordes vocales) et **les faux plis vocaux ou bandes ventriculaires**. Entre les deux se trouvent les ventricules de Morgagni. Ces ventricules produisent avec les bandes ventriculaires un liquide lubrifiant qui se répand régulièrement sur la muqueuse du ligament vocal.

Nous rappelons un détail physiologique déjà cité qui est très important. La partie de l'épithèle de la muqueuse des deux plis vocaux, là où ceux-ci peuvent se toucher, s'accoler, *cet épithèle est dépourvu de glandes lubrifiantes* et de kératine. Nous sommes vraiment à « peau nue », « à fleur de peau » au niveau de la lumière ou de l'isthme glottal. Bonne chance pour les fumeurs: si les doigts jaunissent sous la nicotine, qu'en est-il des cordes vocales qui ne sont aussi que de « la peau » mais en plus « mise à vif ». On peut comprendre pourquoi après un certain temps on peut reconnaître une voix de fumeur.

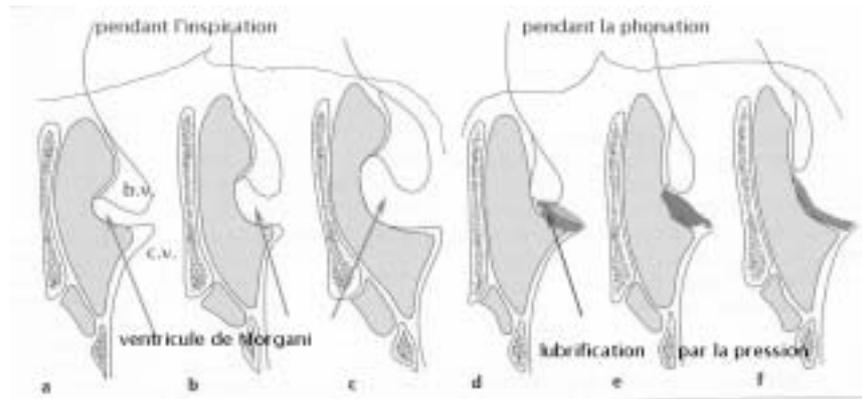


Figure n°15 : Comportement du ventricule de Morgagni (ou Morgani) pendant la respiration (a-c) puis pendant la phonation (d-f). Les coupes aux rayons X ont été faites en avant (a et d), au milieu (b et e), à l'arrière (c et f) des cordes vocales. (D'après Minnigerode, 1966, cité par Wendler, J. et al. , 1996 : 60)

Rares sont les ouvrages de phonétique, d'art lyrique, voire de phoniatrie qui font allusion à *cette fonction lubrificatrice* des bandes ventriculaires et du ventricule de Morgagni.*Aucune étude à notre connaissance n'a été faite qui remettrait en question ces observations de Minnigerode faites aux rayons X en 1966.

Elles confirment en tout cas l'expérience professionnelle du travail de la voix parlée et chantée. Il suffit déjà de prononcer régulièrement la série [gna,gne,gni,gno,gnu] puis dans l'autre sens [gnu,gno,gni,gne,gna] pour constater l'effet « rétro-physiologique » que peut avoir la pratique d'exercices de la parole utilisant les vertus naturelles que nous offrent les gestes articulatoires des sons du langage. L'impact de la sonorité [N], /gn/, est tel que le larynx est mis en position haute et l'arrière-gorge resserrée. Cette sonorité [N] ressemble à la voix des jeunes nourrissons d'avant six mois environ. Dans les cas de mot de gorge, de voix rauque, on remarquera que la pratique de ces petites séries de monosyllabes a pour effet d'« huiler la voix », de la « masser ». C'est bien d'un massage des cordes vocales dont il s'agit et qu'on retrouve sur la figure ci-dessus.

**Nous avons même trouvé des explications très utilitaristes de la fonction des bandes ventriculaires supérieures. Elles joueraient le rôle d'empêcher l'intrusion de nourriture dans les poumons! On voit à ce genre de remarque mécaniste le manque de travail interdisciplinaire et l'ignorance de l'ouvrage fondamental de Negus sur l'anatomie comparée du larynx chez les mammifères. Negus est le premier à avoir mis en évidence un rapport anatomique fonctionnel entre la mobilité des membres supérieurs et l'apparition progressive de la « manipulation » (comment en sont capables la marmotte ou l'écureuil par exemple) et la formation des bandes ventriculaires qui permettent une double ventilation du larynx.*

Ce lubrifiant provenant des ventricules de Morgagni donne aux plis vocaux leur élasticité et

ceci est audible dans le brillant et la souplesse du timbre de la voix, son éclat sans dureté. Sans cette élasticité, *l'ondulation de la muqueuse serait gênée* et avec elle *la production du son*, chose que l'on reconnaît avec une écoute exercée à la qualité de la voix. C'est le même phénomène pour la salive et la langue.

Il nous semble important de prendre en compte ce rôle de *l'humidité*, de la mucosité, dans les modèles in vitro de la glotte.

C'est pour cela aussi qu'il est très mauvais en cas de mal de gorge de *chuchoter* longtemps ; on ne fait alors que renforcer le problème. Dans la voix chuchotée - comme dans la voix à l'attaque exhalée - les cordes vocales ne se joignent pas réellement et donc ne sont pas réellement lubrifiées. Elles sont alors rapidement desséchées par la trop forte exhalaison (comme quand on fait sécher le linge au vent) et par le manque de lubrification.

Cela donne pour l'oreille cet effet de voix sans force, légèrement enrouée, basse, comme voilée.

Nous ne pouvons que suggérer ici l'immense domaine du travail de la voix parlée comme chantée.

Ces trois types physiologiques -ou mieux psychosomatiques- s'expliquent à différents niveaux

- Sur le plan tonique, du maintien, de la stature, de la motricité et de tout le système musculaire.
- Sur le plan respiratoire et de la gestion du souffle.
- Sur le plan de l'audition qui est souvent un facteur fondamental mais laissé de côté.

Une personne qui peu à peu apprend à « s'entendre parler »-c'est comme se voir dans un miroir mais sur le plan acoustique- apprend alors à parler différemment.

Annexe III

Morphogénèse - Réflexions

Lors d'un congrès international sur le « Geste et la Voix », à Aix-en-Provence, un spécialiste de la langue des signes pour les non entendants, alors que nous lui présentions quelques unes de nos forment aériennes des sons du langage, nous fit une remarque : « *Mais vous avez là des phénomènes liés à la théorie des catastrophes de René Thom !* ».

A l'époque nous ne connaissions pas cette théorie et ce nom de « catastrophe » nous paraissait très étrange. Effectivement, nous pensons encore maintenant que le choix de ce terme n'est pas très heureux car il ne met pas en valeur la dynamique productive qu'impliquent ces vues.

C'est en lisant certains essais de Thom que nous avons compris pourquoi l'indication du collègue était une piste enrichissante.

Thom définit son concept de catastrophe de la manière suivante :

« En théorie des catastrophes, le concept de catastrophe est un concept phénoménologique et non un concept défini mathématiquement. En première approximation, on pourrait définir la catastrophe par la discontinuité d'un ou plusieurs observables. Mais ces discontinuités peuvent être localement lissées par frottement ou diffusion, sans cesser pour autant d'être des catastrophes. La théorie des catastrophes propose de ce phénomène des modélisations mathématiques fondées sur une opposition : dynamique lente, dynamique rapide ».

Mais c'est en approfondissant les théories de Thom sur **la morphogénèse** que nous avons trouvé des éléments qui nous semblent importants pour aborder les morphodynamiques des sons du langage.

Voici un extrait d'un article écrit par Thom pour « La Nouvelle Encyclopédie-Fondation Diderot » sur « Les théories de la morphogénèse » :

« à la question « qu'est-ce qu'une forme ? », il n'est pas aisé de donner une réponse précise. On remarquera d'abord qu'une forme spatiale F se séparant ainsi de son fonds (en général l'espace euclidien E). En ce sens la notion de forme présuppose toujours une discontinuité qualitative, à savoir celle qui sépare les points de l'espace contenus dans la forme, de ceux qui n'y sont pas contenus (...) Les techniques informatiques modernes décrivent les formes en discréditant l'espace ambiant (en les découpant en prismes élémentaires : les pixels) (S.M.:picture éléments), et toute forme est alors définie par l'ensemble des pixels qu'elle rencontre. Cette méthode, si elle est peut-être justifiée par l'état actuel à la technique, n'en n'est pas moins profondément barbare, car elle ne tient aucun compte de la genèse de la forme, ni de son origine dynamique, facteurs auxquels notre perception intuitive des formes naturelles est immédiatement sensible » (Thom, 1990 : 183-184).

René Thom aborde ensuite le problème de « l'évolution temporelle des formes ». Il met en évidence que pour aborder la morphogénèse des formes vivantes, comme en biologie par exemple, une étude préliminaire de la morphologie du monde inanimé est nécessaire.

Un des facteurs fondateurs pour l'apparition des morphologies dans le monde inanimé sont les phases de la matière : solide, liquide, gazeuse.

« La phase solide sous son type paradigmatique est le cristal ». Thom fait la remarque « qu'il n'existe encore aujourd'hui aucune explication fondamentale de l'état cristallin.

*Plus grave : l'aspect proprement morphologique d'un changement de phase (par exemple, la fusion d'un cristal ou la solidification d'un liquide par refroidissement) n'a jamais fait l'objet d'une étude systématique. Ce qui caractérise ces phénomènes, c'est en effet, au moins dans leur phase initiale, leur **extrême instabilité**. (...) Cela explique qu'on ne puisse pas attendre de la seule thermodynamique une explication déterminante en matière de morphogénèse. (...) Prigogine a forgé la notion de « structures dissipatives » à partir du fait qu'en s'éloignant de l'équilibre thermodynamique (en s'ouvrant aux flux extérieurs), les systèmes peuvent acquérir des régimes stationnaires présentant un caractère ordonné morphologiquement remarquable. (...) Un problème important est celui de l'unité (l'individualité) d'une forme » (Thom, 1990 : 185-189).*

« Chaos : une mode récente chez les dynamiciens appelle « chaotique » tout système dynamique présentant de la divergence (sensibilité aux conditions initiales). Le terme « chaos »,... devrait être réservé à toute situation naturellement non descriptive, ou dont la description ne peut être réduite par aucun des algorithmes génératifs de l'analyse » (Thom, 1990 : 595).

Tom fait remarquer que la notion de « *champ morphogénétique* » a été introduite par

« les premiers théoriciens de l'embryologie » au début du XXe siècle « pour rendre compte de divers processus observés expérimentalement. Après des débuts prometteurs, cette notion est tombée en discrédit devant les « succès » de l'analyse réductionniste du milieu du siècle, et n'a connu que tout récemment une timide réapparition. On se serait évité bien des ennuis si on avait clairement reconnu, dès le départ, que cette notion est fondamentalement descriptive et n'a aucune prétention explicative, sauf dans le sens d'une « morphologie générale » et non spécifiquement biologique... » (Thom, 1990 : 191)

Thom insiste sur le fait qu'en biologie, donc dans la couche physiologique de la réalité,

« toute causalité formelle nécessairement **conditionnelle** et, en général, elles ne permettent qu'une prédiction **qualitative** (topologique) et non quantitative. Ce sont là, précisément, les caractères des modèles de la théorie des catastrophes » (Thom, 1990 : 192).

«L'apport spécifique de la théorie des catastrophes ... est de montrer que, dans certaines limites, toutes les formes sont engendrées par **un petit nombre de types universels qui constituent une sorte d'alphabet morphogénétique**. Le résultat fondamental de Thom, dans ce qu'on appelle la théorie restreinte, est qu'il existe sept catastrophes élémentaires possibles pour l'évolution d'un système soumis à quatre paramètres externes, quels que soient le nombre et la nature des variables internes au système, celles qui définissent son état en tant que dispositif physique concret» (Andler: 2002).

Nous citons un essai sur la vie des formes de Vahé Zartarian :

« On sait que l'oreille est capable de sélectionner ce que l'on désire entendre. Par exemple, écoutant un quatuor, on peut concentrer son écoute pour suivre plus particulièrement le violoncelle, ou bien l'alto. Cette faculté d'adaptation est due à deux petits muscles de l'oreille. Ils servent à ajuster l'écoute, à faire ressortir certaines bandes de fréquences. Le premier est le muscle de l'étrier, qui contrôle la pression des liquides à l'intérieur de l'oreille; le second est le muscle du marteau, qui commande la membrane tympanique. Or il se trouve que le muscle de l'étrier est sous la dépendance du nerf facial (Ve paire des nerfs crâniens), lequel contrôle l'expressivité du visage, tandis que le muscle du marteau est commandé par un nerf qui est une émanation du nerf maxillaire inférieur (VIIe paire de nerf crâniens). **Par conséquent, écoute et forme du visage sont indissociables! (...)** ».



Figure n° 16 : Trois expressions de l'âme: « voyelles psychiques » [a, e,... à deviner]

Et Zartarian ajoute :

« Ce que les phénomènes d'imitation nous apprennent tient en ceci:

- **une forme n'est pas un simple bout d'espace modelé par des forces extérieures,**

- *elle est la matérialisation d'une intention qui vient du dedans,*

parce qu'elle doit avoir un sens pour l'être qui la conçoit et les êtres qui la perçoivent » (Zartanian, 1997).

Dans le cas des « formes aériennes des sons du langage » nous avons aussi des espaces qui ne sont pas « *modelés que par des forces extérieures* » et qui sont « *la matérialisation d'une intention qui vient du dedans* ».

Nous sommes conscients qu'à ce moment charnière de notre exposé nous abordons des problèmes d'épistémologie, donc de théories de la connaissance et de conceptions du monde.

Que sont ici *des forces extérieures* par rapport à *des forces intérieures* ? Il ne s'agit pas seulement de la résistance de l'air ambiant faite à la force et la constitution du jet d'air expiré pendant la phonation. Ces forces extérieures sont existantes bien sûr et relèvent de la mécanique des fluides. Le mécanicien des fluides procédera à des calculs en faisant ce qu'on appelle un bilan de forces, plus exactement un bilan de « quantité de mouvement », que nous avons illustré sur un cliché de la voyelle [e] de Zinke, constituée d'haleine dans l'air froid.

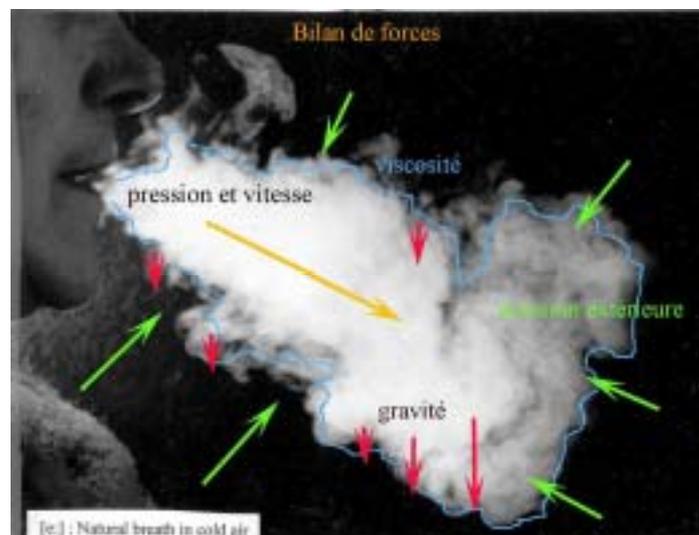


Figure n°17: Principe des forces en jeu dans le déplacement des « parcelles fluides » constituantes. (Maintier) « Les forces de pressions extérieures sur l'enveloppe sont perpendiculaires à celle-ci, les forces de viscosité exercées par le fluide extérieur sont réparties le long de l'enveloppe » (Lesieur, 1994 : 31).

Mais il est aussi question ici du passage du domaine physique, anorganique -comme celui des cristaux- au domaine de l'organique, du biologique et physiologique, dans le sens des propos de René Thom que nous avons cité auparavant. Dans le domaine de l'organique, du monde végétal par exemple, on peut se poser la question de la nature de cette « intention qui vient

du dedans » dont parle Zartarian. Effectivement, en botanique, la notion de forme, de *Gestalt* n'est pas résolue avec les gènes, même si, dans ce domaine, on peut *manipuler* la croissance des plantes.

Dans le domaine de la parole, nous avons des « *formes phonétiques* », tant acoustiques qu'aérodynamiques, qui sont bien la matérialisation de « dynamiques psychiques », de « gestes », d'intentions venue du « dedans », qui, bien sûr, utilisent des forces et des conditions physiques et physiologiques pour apparaître dans le monde sensoriel. Même si ces formes aériennes ne sont pas des organismes biologiques vivants tels des plantes, elles n'en sont pas moins tissées, réalisées dans *la substance organique* du souffle humain, expression de son équilibre biologique et plus subtilement psychique. Ces formes aériennes sont *organisées* et par les données anatomiques et comportementales -au sens de posturologie et kinésique articulaires – et par les processus aérodynamiques liés aussi à la consistance de l'air expiré suivant l'état de santé et l'état psychique du locuteur.

Zartarian pose la question de *la mise en forme de l'intention* et il montre que *l'élément fluide est le médiateur de la forme*. Il cite pour cela Théodore Schwenk, hydrodynamicien, qui « *a su trouver dans son métier de quoi étayer ses profondes intuitions concernant la morphogénèse* »:

« *N'est-il pas réellement grandiose qu'il naisse ainsi des formes qui ne doivent rien à des différenciations de la matière, et qui n'apparaissent que par le jeu des courants? Ceci nous fournit une occasion de concevoir la genèse des formes, en général, non à partir de la matière, mais à partir du jeu des mouvements: ce sont les mouvements qui s'emparent de la matière et l'ordonnent... Mais il faut bien se rappeler qu'aucune formation organique ne peut être un simple effet de l'action physique des courants. Tout ce qui vit manifeste un être, une entéléchie, laquelle agit également dans les courants physiques* » (Schwenk, 1963: 24-59).

Comme nous l'avons exposé dans le chapitre I les turbulences, les structures tourbillonnaires sont encore une énigme immense pour les sciences actuelles. Avec les phénomènes tourbillonnaires dans la nature nous sommes aussi face à l'énigme du *mouvement*.

Thom a suggéré que l'on devrait observer et étudier les *formes* aux travers des différents « états d'agrégation » : solide, liquide et gazeux. L'anorganique et les solides avec la transition des cristaux, les liquides, avec le passage à l'organique, au végétal.

On pourrait de même envisager des recherches sur différents *types de mouvement* aux travers des « règnes » de la nature. Cela se fait déjà en biomécanique et robotique mais les sciences

de la dynamique auraient beaucoup à apporter encore car presque tous les domaines de la vie sont concernés par ces processus morphodynamiques. Et l'on s'étonnera alors que les formes aériennes des sons de la parole humaine contiennent autant de variétés réunies.

René Huygue, dans son ouvrage « Formes et Forces », cite cet aphorisme de Léonard de Vinci avec lequel nous concluons nos réflexions :

« La cadence du temps indivisible est le mouvement. Le mouvement est le principe de vie ».

Annexe IV

*Travail de la voix, de la parole
et des gestes
en rapport avec les morphodynamiques*

Exemple d'un travail de la voix, de la parole et des gestes en rapport avec les morphodynamiques : [k] et [v]

Nous avons constaté, comme le fait remarquer Aderhold (1962), qu'un travail ludique, mais structuré, sur *l'agilité et la coordination*, surtout des *bras, des mains et des doigts*, aide à « délier la langue », à surmonter des difficultés au niveau respiratoire et articulaire et de l'expression en général. Ce travail aide aussi à surmonter « d'autres difficultés ». Nous le suggérons dans ce qui suit.

Exemple pour la consonne [k] (dans de multiples orthographes en français : c,q,qu,k.)

Ainsi avec une personne n'ayant pas de force, de précision dans les sons [k] et [g], ayant tendance à les « éviter » ou à dire [g] au lieu de [k], nous ferons des exercices avec des mouvements compacts, soudains, anguleux. Nous utiliserons les *articulations* des talons, des coudes, et surtout des poignets, régions qui nous donnent cette possibilité de « casser » le mouvement. [k] réveille, aide à se secouer, à se décider. Il donne un choc qui peut être aussi un contact délicat. Il suffit de prononcer plusieurs fois le mot « *calme* » puis le mot « *casse* » pour ressentir, si on y est attentif, « ententif », une grande différence entre les deux [k] initiaux. On peut le ressentir avec son souffle, sa sensibilité tactile au niveau lingual et aussi par l'écoute de sa propre parole. Il y a une différence aussi de vitesse dans l'exécution de ces mots. De part la proximité du [l] et du [m] l'entrée dans le mot est plus douce, plus lente : le noyau vocalique [a] plus allongé etc... On peut aussi le vérifier sur un oscillogramme et spectrogramme.

Nous avons essayé dans notre travail sur les rapports entre les mouvements du corps et la parole de montrer que ce que l'on fait avec les bras et les mains ressurgit dans la gestualité articulaire, la dynamique du souffle, la circulation etc. donc dans la production, dans le comment des sons de la parole, dans leurs morphodynamiques aussi. Naturellement nous avons dans notre « atelier de la parole » des syllabes, des rythmes, des vocalisations, la poésie, l'art dramatique, les improvisations à notre disposition.

Nous en restons ici aux « forces et formes » des consonnes.

Un enfant de 4 à 5 ans, qui ne présente aucun trouble auditif, confond les sons [g] et [k] et si l'on écoute bien, cet enfant ne prononce pas le son [k]. Nous l'aidons par une comptine ou une poésie mimée appropriée ; les comptines sont souvent des « perles phonétiques », phono-

stylistiques et même orthophoniques.

Nous créons aussi des exercices qui prennent la forme de séries rythmiques. Par exemple : prononcer des syllabes [ka,ke,ki,ko,ku][ku,ko,ki,ke,ka] en faisant « un petit bout de chemin contre des cailloux ». On avance devant soi le bras en zig-zag et en heurtant la table d'un petit coup de l'angle du poignet, ou on traverse un ruisseau, de pierre en pierre (des traces à la craie sur le sol), en sautant réellement.

Pour aider à « retrouver » ce [k] nous pourrions donc aussi faire sur chaque syllabe un geste qui correspond au geste soudain du dos de la langue qui heurte le palais :



Figure n° 18 : Geste fait pendant la parole sur /k/ (Maintier)

Une des grandes clefs fonctionnelles du travail c'est qu'on retrouve de manière métamorphosée dans les deux mains réunies et interagissantes l'espace buccal, la langue dans la bouche, même les dents avec la pointe des doigts et des ongles. On peut ainsi accompagner fonctionnellement et par des indications imagées mais appropriées la production de toutes les consonnes. Ce ne sont pas des gestes conventionnels, codifiés mais des homologues fonctionnels, gestuels. Nous en avons trouvé une grande partie bien avant de prendre connaissance de gestes semblables développés en France dans la DNP, la dynamique naturelle de la parole, créée par Madeleine Dunoyer de Segonzac. (Voir sur Internet le site *La Joie de Parler*).

Exemple pour la consonne [v]

Il y a des personnes, des adultes, qui articulent à peine la sonorité [v]. Cela donne un parler assez délavé, trop fluide, un peu sur le bout des lèvres paresseuses. Ou alors la voix est coincée, écrasée dans la gorge, ne se montrant pas et les lèvres restes minces et serrées.

Les incisives chez ces personnes ne rencontrent pas la lèvre inférieure et les muscles qui

viennent du cou vers cette dernière ne donnent pas assez de pression.



Figure n°19: La fricative [v] : on voit les vaguelettes qui jaillissent des frictions alternantes. (Zinke)

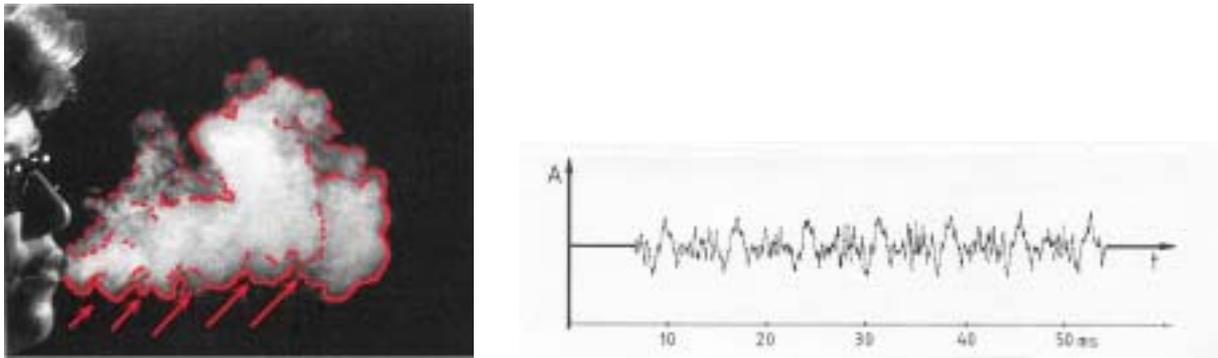


Figure n° 20: La fricative [v] on voit l'alternance correspondant aux vaguelettes aussi sur une oscillographie. (Neppert, 1999 : 96)

Cette délicate suite de pressions et dépressions, sorte de « vibro-massage » du [v], on peut la ressentir en se caressant les deux joues avec la surface interne des deux mains, en partant du sommet de la tête jusqu'au menton : « v....v.....v..... ». Mais il faut travailler souvent plus en profondeur. On part de la position des bras croisés avec les mains sur les épaules, puis on descend doucement mais avec une légère pression – comme en massant – sur les avant-bras puis les paumes des mains, jusqu'au bout des doigts même. On peut faire d'abord écouter le [v], puis faire le geste silencieusement, etc. On peut aussi changer la pression de cette caresse massante: *plus on appuie sur ses propres muscles, plus la tension augmente au niveau des lèvres et dans le débit du souffle. C'est une expérience parlante !*

Un exemple encore où le corps entier serait en quelque sorte pris dans la gestualité du son. L'enseignant se met face à la personne, paume contre paume, et on dialogue, on lutte dans un

mouvement de vague, de va et vient avec bras et mains. Il y a une légère confrontation. Dès que l'enseignant renforce l'opposition, la pression, on peut ressentir aussitôt comment la pression augmente chez l'élève ou le patient et que celui-ci « saisit » sa bouche de sorte que la fricative [v] apparaît clairement. Le plat des mains et la pression donnée par le partenaire correspondent à cette rencontre du souffle, de la voix avec les incisives de la lèvre inférieure. La consonne [v] éveille la volonté pour ainsi dire. On peut marcher cela aussi dans l'espace : cela ressemble beaucoup au « « déplacement » visible dans la forme aérienne du [v]. Avec un enfant on peut jouer, avec les bras et la marche fluide, au « vent qui ondule, va et vient sur les vagues ou les champs de blés ou qui soulève les feuilles du jardin public... ».

En résumé nous dirons que les sons comme [k], [t], [p], pour prendre les plus extrêmes, ne sont pas des « bruits » ou si ce sont des bruits, ce sont des bruits produits par l'être humain intentionnellement avec la substance de tout son organisme : ce sont différents gestes de tout son être, des attitudes. Et on aura bien vu dans le DVD que sur le plan aéro-et morphodynamique ce sont *des formes* et que ces bruits sont organisés. Là encore on retrouve le principe que dans des structures chaotiques un ordre est caché.

Il est significatif dans le travail de la voix et de la parole qu'on arrive très vite à décrire des attitudes, des postures, des comportements gestuels qui ont souvent une correspondance dans le caractère, dans la manière de saisir les choses et de se saisir soi-même. C'est un peu comme la pratique d'un instrument ou d'un travail artistique corporel ou d'un art martial.

Travailler sur notre voix, sur nos réalisations phoniques et articulatoires n'est pas simplement pratiquer une « correction phonétique », atteindre une « bonne diction », c'est travailler aussi sur sa sensibilité proprioceptive, son sens du mouvement, sur le contrôle de sa volonté, de son caractère, c'est affiner son écoute des autres etc. *Les sons, les mots nous éduquent* ou nous aident à nous éduquer, à nous assouplir ou à nous structurer. Il y a aussi *mille nuances* comme dans la coarticulation: on pourrait même dire qu'il y a un phénomène de coarticulation entre les forces psychiques, entre les différents sentiments qui sont tissés intrinsèquement dans les « formes et les forces » du langage depuis notre plus jeune âge.

On peut comprendre aussi que les différents gestes de préhension : gratter, frotter, nouer, tirer, piquer, pincer, effleurer, tapoter...sont autant de gestes qui ont pendant des générations fondé l'humanité, formé indirectement sa langue, ses fonctions articulatoires, cognitives même.

Beaucoup de ces gestes disparaissent pour nos enfants des « pays industrialisés » malheureusement, et les cabinets d'orthophoniste, d'ergothérapeutes et de psychomotriciens dans ces pays se remplissent.

Écoutons les, ces gestes : fr, fl, gr, pl, pr, bl, str... dans les syllabes, dans la coarticulation... .

Il est clair que d'entrer dans l'atelier de l'artiste de la parole, de l'acteur-formateur ou du thérapeute pour y « comprendre ce qui s'y passe » demande du temps et de l'expérience.

RÉSUMÉ en français

Pour chaque phonème, chaque syllabe prononcée, on constate devant l'orifice buccal un jet tourbillonnaire ayant une dynamique avec des formes et une enveloppe globale bien spécifiques et reproductibles. Ces formes en mouvement ou "morphodynamiques" semblent, entre autres, marquées de l'empreinte des gestes articulatoires qui ont modelé le phonème ou la syllabe. Ces formes aériennes des sons du langage ont été mises en évidence et étudiées dès les années 1962 par la pionnière Johanna Zinke. En 1980, le biophysicien Boris Rybak les a visualisées lui aussi, en strioscopie interférentielle, et nommées "turbulences phonatoires externes". Nous avons vérifié ces visualisations en utilisant le laser et trouvé des corrélations entre la structure acoustique et la structure morphodynamique de ces turbulences phonatoires, chose qui n'avait pas encore été faite auparavant. Depuis les années 90 environ, grâce à l'apport de mécaniciens des fluides dans les modélisations de la glotte, on se rend compte que des processus aérodynamiques turbulents, chaotiques, sont générateurs du son, et ne sont donc pas que facteurs de bruit ou de perte d'énergie. En ce sens cette recherche sur les structures aérodynamiques des sons du langage prend toute son actualité, même si nous n'en comprenons pas encore tous les aspects aéroacoustiques. Ces formes aériennes des sons du langage sont d'après nous un pont entre le physique et le physiologique, l'acoustique et la "phonologie gestuelle". Vu la nature dynamique de ces phénomènes, nous présentons nos analyses descriptives dans un film DVD d'une heure trente, partie expérimentale de notre thèse.

TITRE et RÉSUMÉ en anglais

"Air forms of speech sounds or external phonatory turbulences: a morphodynamic and acoustic study"

For each pronounced sound or syllable, one can observe in front of the mouth a turbulent jet of dynamic forms and a "global envelop" that are specific and reproducible. These "forms in movement" or "morphodynamics" seem, among other things, to be imprinted with those "articulatory gestures" that had modelled the sound or the syllable in the vocal tract. These air forms of speech sounds have been described and studied by the pioneer, Johanna Zinke, beginning in 1962. 1980, the biophysicist Boris Rybak filmed them using interferential strioscopy and gave them the name "external phonatory turbulences". We not only verified these earlier observations using laser light but were able to find a previously unknown correlation between the acoustical structure and the morphodynamic structure of these phonatory turbulences. Since the 1990's some physicists in aerodynamics have been working on modelling of the glottal flow and shown that aerodynamic turbulences involve chaotic processes that generate the sound: they are not simply generator of noise or causes of power loss. From this point of view our research on these aerodynamic structures becomes very concrete, even if one is not yet able to understand all the aeroacoustic processes. We think that these air forms of speech sounds are a bridge between the physical and physiology as well as the acoustic and "gestural phonology". In light of the dynamic nature of these phenomena, we are presenting the experimental portion of our thesis and descriptive analysis in a DVD film of one and a half hour in length.

DISCIPLINE : Sciences du Langage, Didactique et Sémiotique : Phonétique.

MOTS-CLÉS : Phonation, aérodynamique, aéroacoustique, théorie motrice de la parole, production, perception, consonnes, voyelles, syllabes, perspectives en art thérapie

INTITULÉ ET ADRESSE DE L'U.F.R. OU DU LABORATOIRE

Laboratoire de Phonétique de Besançon,
U.F.R « Langages, Espaces, Temps, Sociétés »
30 Rue Mégevand, 25030 Besançon cedex