

OU EN SONT LES ETUDES DE PHYSIOLOGIE PHONATOIRE ?

Révision et Présentation
à des fins pédagogiques
d'un chapitre controversé de la Phonétique Générale :
Les Théories de la Phonation

par Gérard GUTH

Dans un petit ouvrage intitulé *Anatomie et Physiologie de l'Appareil Phonatoire*, paru en 1968; dans la collection « Langues et Culture » (Editions Labor, Bruxelles, Fernand Nathan, Paris), Yvan LEBRUN, un linguiste, phonéticien et neuro-physiologue, attirait l'attention des phonéticiens sur le fait que nombre de questions fondamentales de la phonétique générale étaient loin d'avoir trouvé une réponse complète et satisfaisante, et sur la gratuité aussi de certaines affirmations traditionnellement reçues et ayant même acquis force de loi...

Parmi ces questions mal éclaircies, demeurées en litige, et du même coup aussi en suspens, l'auteur retenait le problème de la classification des consonnes en fonction de l'énergie articulatoire que requiert leur production, et de leur répartition, selon ce critère, en fortes et douces, la corrélation, généralement admise, entre l'accent et les variations de la pression sous-glottique, et surtout les théories de la phonation, à l'examen desquelles il consacra la plus grande partie de son propos, et qu'il mit au centre même de son livret.

Nous avons exprimé récemment (1), dans un compte rendu critique que nous avons fait de cet ouvrage, tout l'intérêt que présentait à nos yeux cette publication, par son fond tout d'abord, mais aussi et surtout par la sérieuse mise en garde qu'on peut y trouver, dans la mesure où il n'est pas permis raisonnablement de penser, qu'une science saurait progresser en laissant à l'abandon ou en négligeant délibérément des questions aussi fondamentales.

Pour cette raison et pour nous acquitter aussi à l'égard de l'auteur de quelques petites réserves que nous avons faites à propos du chapitre V de son ouvrage consacré précisément tout entier à cette question, nous

(1) Cf. Al-Lisāniyyāt, *Revue Algérienne de Linguistique*, n° 2, 1971, Libri.

nous sommes résolu à faire sortir avec lui de la confusion et de l'oubli où l'a laissé le débat auquel on a assisté après 1950, le problème si controversé — et très souvent réduit aussi à des idées trop schématisantes — des théories de la phonation, en publiant dans ces colonnes un chapitre de cours que nous dispensons précisément à ce sujet et sous la forme de poly-copiés depuis 1969, dans le cadre de l'enseignement que nous donnons à la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université d'Alger.

Ce faisant, nous avons pensé bien sûr aussi à nos étudiants du Certificat d'Etudes Supérieures de phonétique à qui nous dédions cet article : ils y trouveront certes des commodités nouvelles et la preuve aussi de notre souci pédagogique que nous avons laissé prévaloir, par ce choix, sur nos pures préoccupations de chercheur.

Nous justifions par la même occasion le titre que nous avons adopté. Cet article est conçu essentiellement à des fins didactiques ; il n'a pas d'autres ambitions, et n'apportera sans doute rien au spécialiste, sinon le bénéfice qu'on tire toujours à mettre un peu d'ordre et de clarté dans des domaines complexes où la confusion, au surplus, n'est pas toujours absente.

Le phénomène essentiel dans l'acte phonatoire, puisqu'il est à l'origine de tout, de la vibration des cordes vocales (2) a été appréhendé diversement dans l'histoire de la phonétique. L'idée première qui vint à l'esprit des observateurs fut d'identifier le larynx à un instrument de musique. De fait, FERREIN (3) compara le générateur vocal à « un instrument à cordes et à vent », dès 1741. L'image, et surtout le système d'explication ainsi proposé ne pouvaient évidemment pas résister à un examen sérieux et authentiquement scientifique.

Les études entreprises depuis le milieu du XIX^e siècle sur la constitution et le mécanisme laryngé par des savants émanants d'horizons très différents, les travaux auxquels restent attachés les noms illustres des MULLER (4), MUSEHOLD (5), GUILLEMIN (6), EWALD (7), WETHLO (8),

(2) On a souvent fait remarquer que le terme « corde » était impropre. cf. Bertil SONESSON : « The term the vocal cord, which originated from the French corde vocale, is misleading and should not be employed. The expression was introduced in the eighteenth century by Ferrein, who was the first to describe the vibrations. He thought however, that the vocal folds functioned as the strings on a musical instrument. This theory is nowadays completely discarded... ». The functional anatomy of the speech organs, in *Manual of Phonetics*, édit. par Bertil MALMBERG, North-Holland Publishing C°, Amsterdam, 1968, p. 60.

(3) cf. FERREIN, *Hist. Acad. Roy Sci.* 1741, Mémoire, p. 409.

(4) cf. MULLER, Joh., *Handbuch der Physiologie des Menschen*, Bd II, Coblenz 1840.

(5) cf. MUSEHOLD, A., *Allgemeine Akustik und Mechanik des menschlichen Stimmorgans*, Berlin, 1913.

(6) cf. GUILLEMIN, A., *Sur la génération de la voix et du timbre*, Paris, 1897.

(7) cf. EWALD, J.R., *Pflüg. Arch. ges. Physiol.*, 152, 171, 1913.

(8) WETHLO, F., *Arch. Sprach Stimmphysiol.*, 3, 196, 1936.

TRENDELENBURG (9), NEGUS (10), FARNSWORTH (11), et d'autres devaient aboutir progressivement, au cours de la première moitié de ce siècle, et grâce au développement sans cesse accru des techniques d'examen (laryngoscopie garcienne, méthodes optiques, laryngostroboscopie, cinématographie ultra rapide, observation photo-électrique de la glotte, électroglottographie etc...) (12) à la théorie vocale *myo-élastique* et *aéro-dynamique* qui assimile les cordes vocales à un système d'anches à bourrelets capable d'engendrer des fréquences sonores sous l'effet de la pression d'air sous-glottique, et de l'élasticité propre des bandes vocales.

Mais à peine l'accord s'était-il réalisé autour de ce sujet, qu'une thèse (13) bien différente, issue des recherches entreprises en neurophysiologie sous l'influence notamment du Professeur MONNIER et de son Ecole, vinrent bouleverser toutes les notions acquises et remettre en cause toute la théorie traditionnelle.

Elle fut soutenue par R. HUSSON devant la Faculté des Sciences de Paris, le 17 juin 1950. Révolutionnaire à tous égards, cette théorie nouvelle, dite « *neuro-chronaxique* », affirmait que la transmission, la régulation des fréquences se faisaient par voie exclusivement nerveuse et que la voix était à considérer comme un *son de sirène*. On assista dès lors à un débat qui prit en maintes occasions un caractère passionnel. D'un tempérament inlassablement combattif, R. HUSSON s'efforça jusqu'à sa mort accidentelle de démontrer le bien-fondé des idées qu'il avait développées et de faire face à toutes les attaques dirigées contre lui. Le courage admirable dont il a fait preuve et l'importance du sujet nous commandent d'examiner cette question encore brûlante avec la plus grande attention et une totale impartialité devant les multiples arguments qui ont été alternativement mis en avant par les uns et les autres.

(9) TRENDELENBURG, F., *Akustik*, Berlin 1939.

(10) NEGUS, V., *The comparative anatomy and physiology of the larynx*, Londres 1949.

(11) FARNSWORTH, D.W., H.J. SMITH et J.C. STEINBERG, *Bell lab. Rec.* 18, 203, 1940 et *Bur. publ. Bell, Teleph. Lab.* 1940.

(12) On consultera à ce sujet avec profit :
R. HUSSON, *Physiologie de la Phonation*, Masson et Cie, Paris, 1962, pp. 22-31. et
J. TARNEAUD, *Traité pratique de Phonologie et de Phoniatrie*, Librairie Maloine S.A. Paris, 1961, pp. 41-55.

(13) cf. R. HUSSON, *Etude des phénomènes physiologiques et acoustiques fondamentaux de la voix chantée*, Thèse Doct. Paris, Sciences, 1950.

LA THEORIE MYO-ELASTIQUE ET AERODYNAMIQUE

A. — *Sous sa forme traditionnelle et dans sa version primitive*

Comme son nom l'indique, la théorie « myo-élastique » et « aérodynamique » tend à expliquer le fonctionnement du larynx durant la phonation en s'appuyant à la fois sur *l'élasticité des muscles* (myo < du grec mus, muos) qui viennent se modeler sur les cordes vocales et la force (dynamique < du grec dunamis) de l'air, c'est-à-dire la pression *sous-glottique* alimentée par l'action de la musculature expiratrice qui s'exerce sur ces membranes, lorsqu'elles s'accolent et qu'elles obstruent la trachée.

Par sa nature, cette théorie est essentiellement *mécaniste*. En position phonatoire les cordes vocales se mettraient en adduction. La pression de l'air intra-trachéal accrue par les mouvements expiratoires deviendrait de ce fait très élevée et suffisante, à un moment donné, pour écarter les deux membranes qui s'opposent au passage de l'air. Cet écartement développerait en elles une réaction élastique qui les ferait revenir en position d'adduction. La pression se rétablirait dès lors et le cycle recommencerait. Dans ce système explicatif, la vibration des cordes vocales résulterait en définitive d'un simple conflit de forces entre un courant d'air et un mécanisme obturateur pourvu d'élasticité. Tout se passerait, en fait, comme si les cordes vocales étaient de petites masses munies de ressorts que le courant d'air phonateur écarterait sur son passage, et qui reviendraient à leur position initiale dès que son action aurait cessé, conformément à la figure A de la planche n° 1 jointe en annexe et inspirée des travaux de S. N. RZEVKIN (14).

B. — *La théorie dans sa version actuelle, revue et corrigée.*

Simple dans sa conception primitive, cette théorie a cependant considérablement évolué. Telle que nous venons de la présenter, elle serait évidemment impuissante à expliquer bien des faits. C'est précisément parce que certains auteurs qui ont traité de cette question s'en sont toujours tenu à ce mécanisme simpliste de la pression qui tend à contrebalancer la tension des cordes vocales, que ce système d'explication a été si fortement dénigré par les partisans d'une régulation neurogène qui n'ont pas

(14) S. N. RZEVKIN ; Sluh i reč (Moscou-Leningrad, ONTI, 1935, p. 240 ; schéma repris par N. L. ZINKIN (Moscou). Trad. *Mechanisms of speech*, Mouton, 1968, p. 343.

manqué, en fait, de pousser la schématisation au maximum. Il convient donc de donner de cette théorie une formulation plus complète.

Les accusations portées contre elle par R. HUSSON ont obligé en effet les partisans de ce système d'explication traditionnel à réviser leurs positions et à mettre l'accent sur un fait capital, en ce sens, qu'il permet de résoudre bien des incompatibilités : l'existence d'un *phénomène rétro-aspiratoire*, connu en physique sous le nom d'*effet Bernouilli* (15). Un exposé complet de la théorie myo-élastique et aérodynamique, ainsi revue et corrigée, a été donné à une date encore récente par Philip LIEBERMAN (16) dont s'inspirent la figure B et l'exposé qui suit.

Lorsqu'on considère les faits de près, il apparaît que le système des forces aérodynamiques et aérostatiques qui s'appliquent sur les cordes vocales, et qu'il convient de prendre en considération, est bien plus complexe qu'on pourrait le penser a priori. Il y a lieu de distinguer successivement :

a) la force exercée sur les cordes vocales par la pression sous-glottique qui tend à écarter les membranes, lorsque celles-ci sont en position d'adduction, et que nous désignons par Fp. Comme elle croît, lorsque la surface sur laquelle elle s'applique augmente, elle passe par un maximum lorsque la glotte est complètement fermée. Ajoutons qu'on a évalué les variations de cette pression à l'intérieur d'un cycle (ouverture suivie de fermeture) à 5 % environ de sa valeur la plus élevée.

b) les forces dues à l'élasticité des cordes vocales et qui tendent à ramener celles-ci à leur position de repos chaque fois qu'elles s'écartent sous l'action du courant d'air phonateur. Nous les désignons par Fte et Fta.

c) les forces qui s'appliquent aux cordes vocales sont dirigées vers l'intérieur et dues à l'air phonateur qui en passant par l'étroite ouverture glottique fait que la pression devient à un moment donné négative, de sorte

(15) cf. à ce sujet : J. VAN DEN BERG, *Physiologie et Physique de la vibration des cordes vocales*, in *Larynx et Phonation*, Paris, PUF 1957, pp. 51-69 et *Mechanism of the larynx and laryngeal vibrations*, in *Manual of Phonetics*, édit. par Bertil MALMBERG, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1968, pp. 278-307. J.L. FLANAGAN, *Speech Analysis, Synthesis and Perception*, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New-York, 1965, pp. 11-12.

R. HUSSON s'est toujours opposé à pareille explication et a violemment contesté l'existence dans l'acte phonatoire, de pareil phénomène (cf. *Physiologie de la Phonation*, op. cité p. 299 ; Impossibilité d'appliquer la loi de Bernouilli à l'écoulement de l'air à travers la glotte pendant la phonation) en insistant sur le fait que cette loi n'était applicable qu'aux écoulements en régime permanent, alors que dans la phonation on serait en présence d'un « écoulement en régime intermittent typique ». D'où aussi, selon cet auteur, « L'absurdité des conséquences qui en ont été tirées, notamment l'existence d'un hypothétique effet rétro-aspiratoire sur les bords de la glotte... » Sa démonstration ne semble toutefois pas avoir emporté toutes les convictions, ni surtout désarmé les « myo élasticiens » comme il les appelle...

(16) cf. Philip LIEBERMAN, *Intonation, Perception and Language*, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1968, Research Monograph n° 38, pp. 10-23.

que cet écoulement aérien exerce une action rétro-aspiratoire sur les membranes vocales, à la manière d'une trompe d'eau, ce phénomène étant connu en physique sous le nom d'effet *Bernouilli* ou *Venturi*. Nous les désignons par F_b .

On démontre par ailleurs que l'effet Bernouilli auquel sont dues ces forces se présente comme un cas particulier du principe général, bien connu des sciences physiques, de la conservation de l'énergie. (17).

En négligeant les forces de frottement et en désignant respectivement par :

S_1 , l'aire de la section droite de la trachée

S_2 , l'aire de la section droite au niveau de la constriction glottique
 V_1 et V_2 , les vitesses du fluide au niveau de la trachée et de la constriction glottique.

ρ , sa densité

la masse d'air qui transite à travers la section trachéale est égale à $S_1 V_1 \rho$.

L'écoulement étant constant, la même masse doit transiter par unité de temps à travers l'étroit passage de la constriction glottique, de sorte que :

$$S_1 V_1 \rho = S_2 V_2 \rho$$

et la densité restant inchangée on peut écrire que :

$$I \quad \boxed{S_1 V_1 = S_2 V_2}$$

Considérons maintenant plus en détail le transfert de l'énergie à travers les sections S_1 et S_2 .

$S_1 V_1 \rho$ étant la masse d'air qui transite à travers la section trachéale S_1 par unité de temps, l'énergie cinétique à prendre en considération est égale à :

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{1}{2} m v^2 \\ &= \frac{1}{2} (S_1 V_1 \rho) (V_1^2) \\ &= \frac{1}{2} S_1 V_1^3 \rho \end{aligned}$$

D'un autre côté, le travail effectué par le courant d'air phonateur qui s'écoule à travers la trachée est égal au produit de la force exercée par le

(17) cf. J. LAMIRAND et M. JOYAL, *Physique*, (Mathématiques, Sc. Expérimentales) Masson et C°, 1958, 2^e partie, chap. XI.

fluide contre S1 (soit S1 Ps, Ps étant la pression sous-glottique) (18) et de la vitesse V1. On peut donc écrire que :

$$W = S1 Ps V1$$

L'énergie mécanique totale transférée à travers S1 est en conséquence :

$$E1 = \frac{S1 V1^3 \rho}{2} + S1 V1 Ps$$

En désignant par P_G la pression de l'air à l'intérieur de la constriction glottique, on peut écrire de même que l'énergie mécanique totale transférée à travers S2 est égale à :

$$E2 = \frac{S2 V2^3 \rho}{2} + S2 V2 P_G$$

L'énergie totale d'un système isolé étant constante (principe de la conservation de l'énergie), on en arrive à la conclusion que :

$$\frac{1}{2} S1 V1^3 \rho + S1 V1 Ps = \frac{1}{2} S2 V2^3 \rho + S2 V2 P_G$$

$$S1 V1 \left(\frac{1}{2} S1 V1^2 + Ps \right) = S2 V2 \left(\frac{1}{2} S2 V2^2 + P_G \right)$$

or, nous avons vu plus haut que S1 V1 = S2 V2,
par conséquent :

$\frac{1}{2} V1^2 + Ps = \frac{1}{2} V2^2 + P_G$
--

La vitesse de l'air au cours de son passage à travers la fente glottique se déduit aisément de l'équation (I)

si $S1 V1 = S2 V2$

$$V2 = \frac{S1 V1}{S2}$$

S1 étant plus grand que S2, le rapport des sections est de loin supérieur à l'unité. Il découle de là que la vitesse V2 du courant d'air phonateur à travers l'ouverture glottique doit se trouver accrue.

si $V2 = \frac{S1 V1}{S2}$

(18) Il s'agit en réalité d'une surpression ou d'un excès sur la pression atmosphérique.

l'énergie cinétique du fluide est alors

$$E_c = \frac{1}{2} M V^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{S_1 V_1^2}{S_2} \right)$$

Et, étant donné qu'en vertu du principe de la conservation de l'énergie mécanique, la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle reste constante, il s'ensuit qu'une augmentation de l'une entraîne une diminution de l'autre.

Puisque l'énergie cinétique augmente, la valeur de la pression P2 doit baisser et tomber en-dessous de la pression atmosphérique.

Et comme l'énergie cinétique devient d'autant plus grande que la section S2 diminue, la valeur de la pression P2 sera d'autant plus basse que la constriction glottique sera importante.

Si les parois de l'étroit passage sont suffisamment souples, il résulte de tout cela qu'elles vont être aspirées l'une contre l'autre en raison de la différence de pression existant entre P2 et la pression atmosphérique au-dehors.

Cette différence est, théoriquement, d'autant plus grande que l'accolement des membranes est complet, puisque la pression P2 est d'autant plus basse que la section S2 est réduite.

En fait, il y a lieu de tenir compte aussi des forces de frottement qui font que la résistance de la glotte s'accroît avec son degré de constriction (cf. Van den Berg, Zantema et Doornenbal, 1957), de sorte que la force Fb qui est à l'origine de l'effet Bernouilli ne croît que jusqu'à un certain degré lorsque l'ouverture glottique se rétrécit.

Des approximations théoriques et des expériences faites in vivo ou sur des larynx artificiels ont permis à certains chercheurs d'aller plus loin encore dans la connaissance des phénomènes qui président aux mouvements phonatoires.

C'est ainsi que J. VAN DEN BERG a essayé de mesurer les variations de la pression le long du larynx en glissant à travers la glotte une sonde de petites dimensions. Les résultats enregistrés lui ont permis d'établir le graphique de la planche n° 1B (19).

Il apparaît, d'après ces travaux, que la pression sous-glottique (mesurée en centimètres d'eau) est d'autant plus grande que le rétrécissement au niveau des cordes vocales est important (toutes choses égales par ailleurs).

Mais, le fait le plus saillant qui se dégage de cette étude est la variation de la pression le long du larynx, et quelle que soit par ailleurs le degré d'écartement des cordes vocales. On voit aisément que sa valeur (évaluée en cm. d'eau) baisse lorsqu'on se rapproche du rétrécissement glottique.

(19) Cf. J.W. VAN DEN BERG, Physiologie et physique de la vibration des cordes vocales, in *Larynx et Phonation*, op. cit., p. 60.

A un moment donné, elle devient même négative, conformément à ce que permettait de prévoir le raisonnement théorique et cela d'ailleurs d'autant plus vite que la section d (mesurée en mm) de l'ouverture glottique est grande.

J.L. FLANAGAN, qui souscrit également à cette théorie, (20) a essayé, grâce à une série d'approximations mathématiques, de cerner de plus près encore les phénomènes en présence. Après avoir établi un schéma simplifié et coté de l'ensemble du système sous-glottique (Fig. G planche 1c), il assimila le passage du courant d'air phonateur à travers l'ouverture déterminée par les cordes vocales à un écoulement permanent au travers d'un orifice percé en paroi mince. En désignant par A la surface de l'ouverture glottique, par u la vitesse d'écoulement de l'air à travers la glotte, par Q le débit par ρ la densité de l'air et par P1 et P2 les pressions respectives de part et d'autre des membranes vocales, il a été conduit à écrire que l'énergie cinétique de l'air à travers l'orifice est développée par la différence de pression P1-P2, tel que :

$$P1 - P2 = \frac{1}{2} \rho u^2$$

Dans ces conditions, la vitesse d'écoulement du courant d'air phonateur à travers la fente glottique est :

$$u = \sqrt{\frac{2 (P1 - P2)}{\rho}}$$

$$\text{son débit } U = Au = A \sqrt{\frac{2 (P1 - P2)}{\rho}} = A \sqrt{\frac{2 Ps}{\rho}}$$

(Ps représentant la différence de pression)
et la résistance glottique

$$Rg = \frac{\rho u}{2A} = \frac{\rho U}{2A^2} = \frac{\sqrt{2 \rho Ps}}{2A} = \frac{Ps}{U}$$

Des approximations complémentaires et des mesures faites sur des larynx artificiels lui ont permis d'affirmer ultérieurement que la résistance glottique était une « linear combination of kinetic and viscous terms », de valeur :

$$Rg = Rv + k \left(\frac{\rho U}{2A^2} \right)$$

(20) cf. J.L. FLANAGAN, *Speech Analysis Synthesis and Perception*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New-York, 1965, pp. 9-14, 39-44.

Rv représentant la résistance due à la viscosité (qui serait proportionnelle au coefficient de viscosité, ainsi qu'à la longueur du rétrécissement, et inversement proportionnelle à l'aire de l'ouverture) et k une constante d'effet laminaire un peu inférieure à l'unité.

WEGEL et VAN DEN BERG avaient d'ailleurs essayé de déterminer expérimentalement la valeur de Rg en opérant sur un modèle du larynx humain. D'après leurs mesures :

$$R_g = \frac{P_s}{U} = \frac{12 \text{ ud}}{lw^3} + 0,875 \frac{P U}{2 (lw)^2}$$

u étant le coefficient de viscosité

d, la profondeur de l'étranglement glottique fixé à 3 mm dans l'expérience l, la longueur de la fente glottique considérée comme un orifice rectangulaire pour simplifier les choses et maintenue constante à 18 mm dans l'expérience w, la largeur de la fente glottique ainsi considérée et prise comme variable, conformément à la figure G de la planche n° 1c.

Les variations de Rg seraient de l'ordre de 10 % pour des valeurs de W comprises entre 0,1 et 2 mm., une pression $P_s = 64 \text{ cm H}_2\text{O}$ pour des valeurs petites de W et pour un débit $U \leq 2000 \text{ cm}^3/\text{sec.}$ lorsque W est grand.

Puisque $A = lw$, le premier terme de la somme (viscous résistance Rv) est proportionnel, en dernière analyse à A^{-3} , le second (kinetic term) à $u A^{-1}$ ou approximativement à $P_s 1/2 A^{-1}$. La prédominance de l'un ou de l'autre de ces deux facteurs dépend donc de A et de P_s . L'un est déterminant lorsque l'ouverture est étroite (inférieure à 1/5 de A max.), l'autre est largement prédominant dans tous les cas où cette condition n'est pas remplie et les deux approximativement égaux, lorsque

$$\sqrt{\rho P_s} A^2 = 19,3 \text{ udl}^2$$

Il découle de là que lorsque la pression sous-glottique est maintenue constante, la vitesse d'écoulement de l'air à travers la glotte est proportionnelle tantôt à A^3 (lorsque l'orifice est de faible dimensions, c'est-à-dire particulièrement dans l'aigu) tantôt à A (lorsque les mouvements phonatoires se font plus amples et par conséquent dans le grave). La représentation graphique des variations de l'ouverture glottique (exprimée en mm²) et du débit exprimé en cm³/s en fonction du temps exprimé en millisecondes a permis à J.L. FLANAGAN de mettre encore mieux en évidence les faits (21). R. HUSSON qui a fait état de ses travaux dans *Physiologie de la Phonation* (22), mais en laissant toutefois à l'écart son exposé de la théorie myo-élastique, a fait remarquer, avec justesse sans doute, que l'application

(21) cf. *Speech Analysis Synthesis and Perception*, op. cit., p. 43.

(22) cf. R. HUSSON, *Physiologie de la phonation*, Paris, Masson et Cie Edit., 1962, p. 301.

de ces formules au générateur vocal était limitée par tout un ensemble de conditions restrictives qu'il serait trop long de discuter ici, mais qui, en tout état de cause, réduisent quelque peu l'intérêt que peuvent présenter pareilles tentatives d'explication.

Les rapports existant entre la fonction périodique $A(t)$ qui représente les variations dans le temps de la surface de l'ouverture glottique et $U(t)$ qui correspond au débit de l'air à travers la glotte dans le même temps, avaient été déterminés d'ailleurs dès 1950 à l'aide de méthodes expérimentales par W.W. FLETCHER (23). Pour l'établissement de la première fonction il avait eu recours à des films laryngoscopiques pris à 4000 images par seconde sur trois sujets émettant la voyelle /ae/ à des fréquences et à des intensités moyennes.

Les variations correspondantes du débit furent déduites d'un calcul approché de mesures de pression acoustique faites à des instants concomitants avec les prises de vues. Il apparut, conformément à ce que permettait de prévoir l'étude théorique, que les courbes $A(t)$ et $U(t)$ qui représentent les deux grandeurs variables en question évoluent d'une manière parallèle, mais que le front de l'onde représentative des variations du débit devenait plus raide que celui qui correspond au décours de l'ouverture glottique lorsque l'intensité du son augmente. Le phénomène avait reçu le nom de « sharpening effect ».

Dans la mesure où la pression sous-glottique joue dans cette théorie de la phonation un rôle prépondérant, il convient de fixer l'ordre de grandeur du volume d'air qui sort de la glotte au cours de chaque phase d'ouverture des cordes vocales (24).

Il peut être évalué d'une manière assez précise par la mesure de la dépense d'air nécessaire à l'émission d'une voyelle ; il suffit pour cela de diviser le volume d'air recueilli par unité de temps par la fréquence du fondamental. Pour la détermination de ces deux grandeurs nous nous sommes servis, au cours de nos propres expériences, d'un capteur débouchant sur une éprouvette graduée, pleine d'eau, retournée sur une cuve, (cloche spirométrique) et d'un enregistrement oscillographique concomitant des vibrations glottales qui permet non seulement de déterminer, par une simple règle de trois, la fréquence du fondamental, mais encore d'avoir par lecture directe et à 1/100s. près, les mesures de temps.

On trouvera ci-dessous une série de résultats enregistrés par un même sujet, pour différents timbres vocaliques, émis à des intensités et des fréquences variables (25).

(23) cf. W.W. FLETCHER : *A study of internal activity in relation to vocal intensity*, Ph. D. Thesis, Northwestern Univ. 1950.

(24) La mesure expérimentale directe du débit de l'air phonateur à travers la glotte et pendant la phonation a été faite à de multiples reprises, mais avec une précision variable. Citons pour mémoire les travaux de THOORIS VAN BORRE (vers 1909) et ceux, plus récents, de LUCHSINGER (1954).

(25) Une étude complète est en préparation sur ce sujet. Elle paraîtra ultérieurement.

Voyelle émise Timbre	Fréquence du fondamental Fo (Hauteur)	Intensité	Volume d'air dépendé au cours d'un cycle
/i/	174 Hz (Fa2)	Intensité normale de la voix conversationnelle	0,7 cm ³
/i/	340 Hz (Fa3)	Très forte intensité	0,5 cm ³
/a/	196 Hz (Sol2)	Intensité normale de la voix conversationnelle	0,7 cm ³
/a/	146 Hz (Re2)	Intensité normale de la voix conversationnelle	1,25 cm ³
/u/	155 Hz (Re2)	Intensité normale de la voix conversationnelle	0,88 cm ³

HUSSON qui fixait à 1/10^e de centimètre cube le volume de chaque bouffée d'air dans la voix conversationnelle a cru trouver dans la petitesse de cette valeur (particulièrement réduite sous sa plume !) une preuve de « l'absurdité » de la théorie myo-élastique et un argument de choix en faveur de la théorie neuro-chronaxique qu'il défendait (26).

Mécanisme vibratoire des cordes vocales.

Dans la théorie phonatoire ainsi revue, le mécanisme vibratoire des cordes vocales dépend à la fois de trois facteurs : de la pression expiratoire de l'air, du jeu musculaire laryngé et de la pression acoustique pharyngée.

Durant la respiration normale la glotte est moyennement ouverte, les cordes vocales étant écartées en arrière, dans la région aryténoïdienne et dessinant en quelque sorte un V. Lors de l'acte de la phonation, et avant même que celle-ci ne débute, les deux cartilages aryténoïdes mobiles sur le cricoïde pivotent autour de leur axe, vers l'intérieur, sous l'action des

(26) cf. « Le volume d'air qui sort de la glotte, pendant la phonation, au cours de chaque phase d'ouverture (ou mieux de décollement) des cordes vocales, s'évalue comme suit : un sujet qui tient une voyelle émise sur 250 cycles durant 4 secondes, par exemple, dépense de 400 à 500 cm³ d'air, ce qui fixe à un demi cm³ l'ordre de grandeur de chaque bouffée d'air. La petitesse de cette valeur mesure déjà l'absurdité des explications de la vibration des cordes vocales dans lesquelles il est dit que, au cours de chaque période, par l'échappement de l'air comprimé sous la glotte, la pression sous-glottique baisse énormément de sorte que la cause de l'écartement disparaît (Van den Berg, 1957). Toutes les méthodes de mesure conduisent à des résultats du même ordre de grandeur. Chaque bouffée d'air qui sort de la glotte par période, dans la voix de conversation banale, est de l'ordre de un dixième de centimètre cube. Cette valeur croît un peu avec la fréquence du son, et un peu plus avec son intensité. Elle ne dépasse cependant pas 10 cm³ dans les puissants rugissements des chanteurs d'opéra... », op cit., p. 300.

muscles constricteurs et ramènent les cordes vocales en position d'adduction. La glotte est alors fermée sur sa ligne médiane. (27)

Dès lors la pression sous-glottique augmente. A un moment donné elle devient telle qu'elle oblige les cordes vocales à s'écarter. Le mouvement va du bas vers le haut, ainsi que cela apparaît sur les tomographies dues à J.W. Van den Berg (cf. planche n° 1b) (28). Les bords des deux cordes vocales s'incurvent alors vers l'extérieur, symétriquement, dans le temps et dans l'espace, et démasquent ainsi, par leur mouvement, rendu possible grâce à un double mouvement de rotation et de translation des aryénoïdes sur leur selle cricoïdienne, une fente glottique fusiforme qui, au moment du plus grand écartement des cordes vocales, atteint une largeur de 3 à 4 mm environ (suivant l'intensité et la hauteur de la voix) dans la région située en avant des apophyses vocales. (29)

(27) Sur les différentes positions des cordes vocales durant la respiration et la phonation on consultera avec profit :

G. STRAKA, *Respiration et Phonation*, Deux chapitres d'introduction phonétique à l'étude des langues, in *Bulletin de la Faculté des Lettres de Strasbourg* 1957, pp. 410-417.

Bertil SONESSON, The functional anatomy of the speech organs, in *Manual of Phonetics*, édit. par Bertil MALMBERG, North-Holland Publishing Co, Amsterdam, 1968, pp. 45-75.

Maurice GRAMMONT, *Traité de Phonétique*, Librairie Delagrave, 1963, pp. 16-23.

J. TARNEAUD, *Traité pratique de Phonologie et de Phoniatrie*, Librairie Maloine S.A. Paris, 1961, pp. 41-51.

E. GARDE, *La voix*, coll. « Que sais-je ? » n° 627, PUF, 1954.

(28) cf. également J. TARNEAUD, *Traité pratique de phonologie et de phoniatrie*, op. cit., pp. 45-47.

« Les cordes vocales vibrent dans leur plan horizontal (plan de la glotte), qui comporte un mouvement ascendant dirigé latéralement dont la valeur minimale échappe à l'observation ; la pression aérienne exercée sur la force inférieure des cordes les sépare à la façon d'un coin... ».

(29) Les observations stroboscopiques des cordes vocales faites depuis 1866 (DOPPLER) jusqu'à nos jours par de nombreux expérimentateurs sont assez concordantes à ce sujet.

cf. encore J. TARNEAUD, *Traité pratique de phonologie et de Phoniatrie*, op. cit. p. 47 : « L'écartement maximum des cordes vocales en voix grave est de 3 mm environ ; la glotte a l'aspect d'une large fente ; en voix aiguë, l'ouverture glottique est minimale, l'amplitude vibratoire réduite à 1 mm environ... »

cf. aussi G. STRAKA, *Respiration et phonation*, op. cit. p. 415 :

Dès que l'abduction des cordes vocales est réalisée l'air phonateur amassé dans les poumons, et jusqu'alors contenu dans l'espace sous-glottique, s'écoule à travers cette ouverture. La force (F_b) de l'effet Bernouilli se développe dès que l'air commence à passer à travers la fente glottique, mais diminue toutefois progressivement, du moins en théorie, avec l'ouverture de la glotte. A l'écartement des cordes vocales engendré par la pression (F_p) s'oppose aussi la poussée statique des cordes vocales (F_{te}) qui tend à ramener celles-ci dans leur position médiane et cette force croît avec l'élongation. A un moment donné la force F_p se trouve contrebalancée par la somme des deux forces opposées ($F_{te} + F_b$) : les cordes vocales ont atteint alors leur élongation maximale et dès lors s'amorce le mouvement de fermeture. F_{te} décroît au fur et à mesure que les cordes vocales se rapprochent, mais la diminution progressive de l'ouverture glottique est suivie aussi d'une accélération de l'écoulement aérien, de sorte que F_b

« Pendant l'émission normale des articulations sonores... la glotte aryénoïdienne n'est pas entièrement fermée, mais le passage entre les deux bords internes des cartilages est très étroit (à peine 1 mm) : les apophyses vocales (en avant des cartilages) qui, pendant la phonation, restent immobiles comme les bords internes des aryénoïdes, sont légèrement écartées vers l'extérieur (pour donner aux cordes vocales la possibilité d'exécuter les mouvements d'écartement et de rapprochement), de sorte qu'à cet endroit, la glotte est un peu plus large (environ 1 mm 1/2) ; seule la partie interligamenteuse des cordes vocales, en avant des apophyses vocales, entre donc en vibration, et alors, au moment du plus grand écartement des cordes vocales, la glotte (à environ 3 mm en avant des apophyses vocales, c'est-à-dire plus près de la région aryénoïdienne que de l'insertion antérieure) a une largeur approximative de 3 à 4 mm. (suivant la force et la hauteur de la voix)... »

et R. HUSSON, *Physiologie de la phonation*, op. cit. pp. 66-67, qui fixe à 2,5 mm environ l'élongation maximale de chaque corde dans le grave extrême (premier registre, partie « ouverte ») et à 0,1 mm au sommet du premier registre (partie couverte). cf. aussi J. Cl. LAFON, *Eléments de « Message et Phonétique »*, Bulletin d'Audiophonologie n° 2, 1972, 2^e année, Association France-Comtoise d'Audiophonologie, Faculté de Médecine et de Pharmacie de Besançon, p. 59. qui relève sur les deux radio-tomographies de larynx en position de phonation publiées les mesures suivantes :

Emission d'un son	grave	aigu
Fente glottique	3 mm	1,5 mm
Epaisseur de la corde	12 mm	9 mm
Profondeur du ventricule	5 mm	8 mm
Hauteur du ventricule	5 mm	10 mm
Ecartés des bandes ventriculaires	10 mm	10 mm

augmente, que la pression diminue, et que les parois des cordes vocales tendent à être aspirées l'une vers l'autre. L'adduction s'effectue du bas vers le haut ainsi que cela apparaît sur la figure E des tomographies de J.W. van den Berg (cf. planche n° 1b) et est rendue possible, bien sûr, grâce au double mouvement de translation et de rotation des aryténoïdes et à l'action des muscles constricteurs de la glotte. L'effet Bernouilli cesse dès que les cordes vocales se joignent puisque le passage du courant d'air phonateur se trouve momentanément interrompu. La force F_b devient alors brusquement nulle. La pression sous-glottique alimentée par le débit d'air constant que lui fournit l'appareil respiratoire s'élève aussitôt. Dès lors le cycle recommence, conformément au schéma ci-après sur lequel nous avons essayé de tenir compte aussi des durées respectives des différentes phases. (30).

Le rythme vibratoire du générateur vocal qui se présente dans cette théorie comme un oscillateur à relaxation (31) est réglé par les forces aérodynamiques (pression expiratoire du courant d'air phonateur constituant la

(30) Ces durées sont assez variables ; elles varient d'une manière générale avec la hauteur, l'intensité de la voix, l'impédance ramenée sur le larynx, la « conduite phonatoire ».

R. HUSSON avance pour un /a/ émis en voix de poitrine, à 200 cycles/s. et avec une intensité de 50 dB, les chiffres suivants :

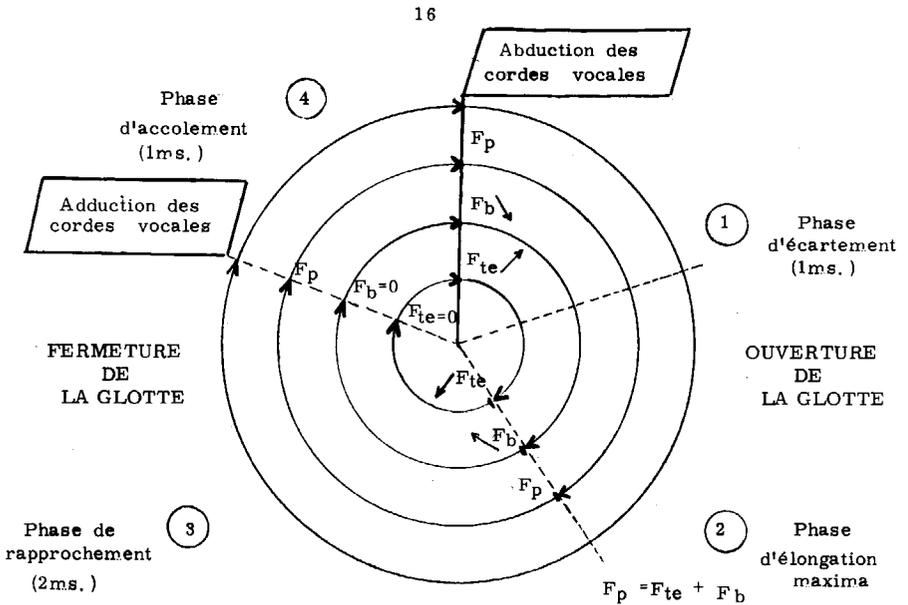
phase d'écartement : 1ms	} phase d'ouverture 4 ms.
phase d'élong. maxima : 1 ms	
phase de rapprochement : 2 ms	
phase de fermeture : 1ms	

cf. à ce sujet : *Physiologie de la phonation*, op. cit. pp. 35-40, 59-78, 464-466.

Selon J. TARNEAUD (*Traité pratique de phoniatry*) op. cit., p. 47, « le temps d'accolement médian de la glotte est variable, plus grand en voix grave qu'en voix de tête » (fait également confirmé par HUSSON).

« En voix grave, ajoute l'auteur, la fermeture des cordes vocales est d'une durée telle que les auteurs ont tous conclu que la phase de fermeture de la glotte est plus longue que celle de l'ouverture » (l'accord entre les divers expérimentateurs nous semble être un peu moins parfait) et il poursuit : « En voix de fausset ou de tête, on voit que le temps de fermeture est très court » ce qui a pu être effectivement généralement observé. Selon J.L. FLANAGAN (*Speech Analysis Synthesis and perception*) op. cit. p. 13, la durée totale du temps d'ouverture de la glotte varierait entre trois dixièmes et sept dixièmes de la durée totale d'une période. Pour plus de détails, on pourra se rapporter aux travaux entrepris dans ce domaine par R. TIMCKE : Nouvelles mesures de la durée de la phase d'ouverture de la glotte pendant la phonation, chez l'homme et in vivo, effectuées avec un stroboscope synchronisé, in *Rev. Laryng. Portmann*, suppl. juil. 1957, pp. 619-624.

(31) Cf. J. TARNEAUD (*Traité pratique de phonologie et de phoniatry*), op. cit. p. 49 : « Les cordes vocales constituent une sorte de vibreur quasi apériodique, périodiquement relancé par l'air expiratoire ». J. Cl. LAFON (*Eléments de Message et Phonétique*), op. cit. p. 58 : « Le larynx fonctionne comme un oscillateur à relaxation... ».



source d'énergie) et les variations des caractéristiques propres aux bandes vocales qui constituent le dispositif vibrateur : *la masse, la longueur et l'élasticité* (32).

Les muscles du larynx ainsi que les parties cartilagineuses sur lesquelles ils viennent s'insérer, participent en effet à tout un ensemble de mécanismes qui permettent *d'ajuster* ces caractéristiques aux besoins de la phonation.

— *L'unité de masse* des cordes vocales peut être altérée soit par augmentation des cordes (hypertrophie, œdème, engorgement) ou diminution (atrophie), soit par variation de la section transversale associée à la variation de longueur.

— *La longueur* des cordes vocales peut varier soit par accroissement de la distance entre les points d'insertion (sous l'effet des tenseurs cricothyroïdiens), soit par raccourcissement des segments qui sont libres de vibrer, modification qui survient quand les portions postérieures sont étroitement accolées et qu'elles limitent le mouvement.

(32) Cf. Paul MOORE, Observation sur la physiologie de la tonalité de la voix in *Larynx et phonation*, op. cit. pp. 75-79.

— *L'élasticité* des cordes varie directement avec le degré de contraction des faisceaux thyro-aryténoïdiens. Par leurs actions antagonistes, les forces qui s'appliquent sur les cartilages mobiles permettent de varier à volonté la rigidité de la musculature vocale, et par suite, la résistance au déplacement des membranes, ainsi que leur coefficient vibratoire.

Quant à la pression sous-glottique, elle peut varier semble-t-il dans des proportions assez considérables : de 10 cm d'eau dans la voix conversationnelle d'une intensité de 30 dB à 120 cm d'eau chez des orateurs de meeting (l'intensité étant alors de 80 dB) et atteindre même 450 à 500 cm d'eau chez certains chanteurs d'opéra à la voix très puissante (33).

L'intensité, évaluée en watts, serait proportionnelle au carré de la vitesse de l'air phonateur au sortir de la glotte.

Les comportements glottiques phonatoires et les caractéristiques générales des cordes vocales dont il a été question ci-dessus varient avec l'intensité et la hauteur de la voix. Dans le registre de la voix conversationnelle, les cordes vocales sont courtes, épaisses, et relativement peu tendues ; l'amplitude des vibrations et généralement grande aux faibles intensités.

Dans le chant par contre, lorsque la hauteur du son croît, les cordes vocales plus tendues s'allongent et s'amincissent et l'élongation maxima de chaque corde diminue, le mouvement vibratoire se réduisant, aux fortes intensités, aux seuls mouvements de la glotte située en avant de la région aryténoïdienne. Le tableau ci-après résume les principales caractéristiques des cordes vocales dans le registre de la voix conversationnelle et les modifications généralement observées dans le comportement glottique lorsque la fréquence croît :

(33) Cf. R. HUSSON, *Physiologie de la phonation*, op. cit. p. 299 ; cf. aussi J. VAN DEN BERG (Physiologie et Physique de la vibration des cordes vocales) in *Larynx et Phonation*, op. cit. p. 53 : « ...De plus, par exemple, il est très improbable que les grandes pressions sous-glottiques ne puissent pas écarter les cordes vocales. Mes propres expériences, dans lesquelles une sonde fut glissée à travers ma glotte par le nez, ont prouvé que la pression sous-glottique moyenne dans le registre de poitrine peut atteindre 11 cm d'eau ; la valeur maximale de la pression sous-glottique est donc sensiblement plus grande. (Au registre moyen et au registre de fausset ces pressions atteignent 33 cm, respectivement 50 cm d'eau). On ne pense même pas à l'effet rétro-aspiratoire de BERNOUILLI de l'air qui s'échappe par la glotte étroite. Effet qui a pour conséquence que la pression glottique est négative et non pas positive... ».

L'expérience avait été vivement critiquée par R. HUSSON : « J. VAN DEN BERG, jeune électricien hollandais, employa en 1956, sur lui-même une méthode plus audacieuse. Elle consistait à introduire dans sa propre glotte, par la bouche, un fin cathéter recourbé, branché à un manomètre à l'autre extrémité. Si héroïque que soit sa méthode, elle n'en est pas moins mauvaise : l'anesthésie laryngée nécessaire diminue fortement le tonus des accolements glottiques, et les dimensions du cathéter altèrent la fermeture de la glotte. De ce fait les surpressions mesurées sont trop faibles, et le sujet ne peut accroître l'intensité de sa voix comme à l'ordinaire... », op. cit. p. 297-298. Selon J. L. FLANAGAN (*Speech Analysis Synthesis and Perception*), op. cit. p. 11, « Production of vowel sounds at the softest possible level requires a lung pressure of the order of 4 cm H₂O. For very loud, high-pitched sounds, on the other hand, pressures of about 20 cm H₂O or more, are not uncommon ».

CARACTERISTIQUES						
Epaisseur des c. v.	Tension des c. v.	Elongation maxima	Ecartement	Elongation maxima	Durée des phases	
maxima d'épaisseur	faible	grande : de l'ordre de 2,5 mm de chaque côté. situation : vers le tiers postérieur.	brève : de l'ordre de 1 ms.	longue : de l'ordre de 2 à 3 ms	Rapprochement : longue : de l'ordre de 2 à 3 ms	Fermeture : longue : de l'ordre de 2 à 3 ms
Comportement de la glotte interaryténoïdien. participation de la région aryténoïdienne au mouvement vibratoire.						
EFFET DES VARIATIONS DE HAUTEUR SUR LE COMPORTEMENT GLOTTIQUE (Fo croît)						
les c.v. perdent de leur épaisseur.	la tension augmente.	l'élongation maxima de chaque corde diminue. situation : à mi-corde.	la phase d'écartement reste inchangée.	la durée de la phase d'élongation maximale se réduit.	la durée de la phase de rapprochement diminue.	la durée de la phase de fermeture diminue.
participation moindre de la région aryténoïdienne à la vibration.						

Premier registre

On considère traditionnellement que les c. v. se déplacent dans un plan essentiellement horizontal. Il n'en est toutefois pas entièrement ainsi : Selon J. TARNEAUD (34) les difficultés inhérentes à la laryngoscopie garcienne (forte protraction de la langue, conditions artificielles de l'observation, vision défectueuse du relief..., etc.) empêcheraient de se rendre compte de « l'obliquité des cordes vocales », qui serait de 9 à 12 degrés par rapport à l'horizontale. Le mouvement vibratoire des cordes vocales possède-t-il une *composante verticale* ? La question a été très controversée. MULLER (35) dans ses observations à l'œil nu croyait voir les cordes vocales vibrer *verticalement*.

Cette opinion fut remise ultérieurement en cause par MUSEHOLD (36) affirmant à la suite de ses observations laryngostroboscopiques que les cordes vocales vibraient horizontalement. Une expérience assez originale fut entreprise dans ce domaine en 1943 par le japonais I. KIRIKAE (37) qui eut l'idée de coller une particule de charbon (d'une superficie d'1 mm² environ) à la surface supérieure d'une corde vocale, au voisinage immédiat de son bord libre et de suivre ses déplacements au laryngostroscope pendant la phonation. Il put observer ainsi la particule en question qui lui servait de point de repère disparaître sous la glotte au moment de la phase d'écartement et réapparaître à la surface pendant la phase de rapprochement. R. HUSSON qui fait état de ces expériences en conclue que : « C'est donc que, pendant la phase d'écartement, le bord libre de la corde vocale est tiré vers l'extérieur et vers le bas » (38) (ce qu'il explique aisément, en se référant aux travaux de Kurt GOERTLER, par la contraction des fibrilles musculaires des tyro-aryténoïdiens), mais affirme toutefois par ailleurs que les cordes vocales « ne présentent dans leur déplacement, aucune composante verticale, comme on l'a souvent imaginé et écrit » (39). La vérité, dans ce domaine se situe sans doute à mi-chemin entre les deux

(34) Cf. *Traité pratique de Phonologie et de Phoniatrie*, op. cit. p. 43.

(35) Cf. MULLER, Joh., *Handbuch der Physiologie des Menschen*. bd. II, Coblenz, 1840.

(36) Cf. MUSEHOLD, A. *Allgemeine Akustik und Mechanik des menschlichen Stimmorgans*. Berlin, 1913.

(37) Cf. KIRIKAE, I., über den Bewegungsvorgang an den Stimmlippen und die öffnungs und Verschlusszeit der Stimmritze während der Phonation, Japan, *Zeitschr. für ORL*, Tokyo, XXXIX, 1943, pp. 236-262.

(38) Cf. R. HUSSON (*Physiologie de la Phonation*), op. cit. p. 61. J. VAN DEN BERG qui se fonde sur les films de LUCHSINGER et l'analyse faite par le Dr SMITH du film de la Bell telephone Co insiste par contre sur le fait que pendant la phonation « les cordes vocales sont poussées obliquement vers le haut » et que « le mouvement commence par aller vers l'intérieur et non pas vers l'extérieur, comme la théorie neurochronaxique l'exige ». (Cf. *Physiologie et Physique de la vibration des cordes vocales*, op. cit. p. 56).

(39) Cf. R. HUSSON (*Physiologie de la phonation*); op. cit. p. 60. Tel n'est toutefois pas l'avis de J. VAN DEN BERG écrivant que « les cordes vocales sont poussées obliquement vers le haut, de sorte que le mouvement possède une composante horizontale et verticale ».

conceptions opposées et historiques, ainsi que l'a montré à une date encore récente J. PERELLO (40) promoteur d'une théorie « muco-ondulatoire » des cordes vocales. Selon ce spécialiste qui fait mention également des travaux de KIRIKAE, mais tout en s'appuyant encore sur d'autres (MECKEL, 1863 ; SMITH, 1957 ; SCHONHARL, 1960 ; ainsi que sur le film réalisé au moyen de la radiocinématographie par FARNSWOORTH pour la Bell Telephone Co (1938) et ceux plus récents, de Von Leden et Moore) « la vibration de la corde vocale est composée de ces deux mouvements, mais simultanés et en forme ondulatoire ». L'auteur ajoute que « selon le procédé avec lequel on l'observe, on peut croire voir une forme ou une autre du mouvement ».

La périodicité du mouvement vibratoire des cordes vocales a fait également l'objet d'une controverse. On a longtemps considéré qu'elle était parfaite. En fait, il n'en est pas tout à fait ainsi, du moins pas dans la voix parlée. Philip LIEBERMAN (41) qui a dépouillé 7000 périodes vocaliques prises sur des enregistrements oscillographiques de six sujets masculins ayant prononcé les mêmes séquences choisies au préalable, avec des intentions expressives, au moyen d'un appareil IBM 709 et comparé de la sorte les durées respectives de trois périodes successives prises de toutes les façons possibles, en arriva à la conclusion que :

- dans 86 % des cas toute période diffère de l'une de ses voisines de plus d'une milliseconde
- dans 20 % de cas, la différence est de plus de 0,6 ms.
- dans 15 % des cas, la différence est même supérieure à 1 ms. L'auteur conclue par ailleurs
- que la différence est indépendante de la durée moyenne de la période lorsque celle-ci dépasse 6 ms.
- que dans 38 % des cas deux périodes successives sont alternativement longues et courtes.
- qu'il existe une corrélation significative entre deux périodes de rang n et $(n+2)$.
que certains états émotionnels entraînent, d'une manière générale, une diminution des différences relevées d'une période à l'autre.

R. HUSSON qui fait également état de ces travaux, a cru trouver dans ces faits un argument de plus en faveur de la théorie neuro-chronaxique. Les résultats ci-dessus, écrit-il, montrent que « en aucune mesure, une corde vocale ne peut être assimilée à un oscillateur mécanique entretenu par un courant d'air. Le travail de Philip LIEBERMAN est intéressant, poursuit-il,

(40) cf. J. PERELLO, Le rôle de la muqueuse dans la fourniture du son vocal, in *Phonétique et Phonation*, par A. MOLES, B. VALLANCIEN et al, Masson et Cie, 1966, pp. 83-89.

(41) cf. Philip LIEBERMAN, Perturbations in vocal pitch, *JASA*, Mai 1961.

en ce que, par une voie nouvelle et en définitive par l'analyse statistique directe des comportements glottiques, il conduit à l'abandon de leur genèse myo-élastique et à la prise en considération d'une genèse neurologique, acquise sur d'autres bases depuis 1950 ». On peut soutenir toutefois que les faits relatés parlent au moins autant en faveur de la théorie adverse, traditionnelle, et J. VAN DEN BERG n'a pas manqué de la faire remarquer : « Quand on produit un ton soutenu observe-t-il, les périodes sont à peu près pareilles. Pourtant pas tout à fait ! Lorsqu'on analyse très minutieusement la durée des périodes, il semble qu'il y a de petites différences dans la durée. Ces différences se produisent d'une façon assez irrégulière, mais pourtant on peut y percevoir quelque chose comme un rythme de répétition. Ce rythme s'élève de 40 jusqu'à 70 par seconde ; donc ce sont justement les rythmes de répétition qu'on trouve dans la dérivation de l'activité électrique de tous les muscles, le bien connu rythme PIPER. Dans certains états émotionnels, ce phénomène se manifeste plus fortement, comme l'a démontré Kaiser ». (cf. *Physiologie et Physique de la vibration des cordes vocales*, op. cit. p. 66).

La théorie myo-élastique et aéro-dynamique, essentiellement mécaniste, comporte enfin au moins deux *implications* : elle postule que l'intensité est étroitement fonction de la valeur de la pression sous-glottique et suppose que la fréquence vibratoire (et par conséquent la hauteur du son ainsi engendré) est directement déterminée par les grandeurs physiques des trois facteurs précédemment énumérés : la masse, la longueur et l'élasticité des bandes vocales.

Le premier point ne soulève guère de difficultés : la corrélation existant entre l'intensité du son et la pression sous-glottique est admise depuis longtemps. Archytas de Tarentum, un contemporain de Platon, fit déjà la constatation suivante : « So it is with sounds. Those that are projected by an intense breath are loud and sharp, while those projected with weak breath are soft and loro » (42). La relation mathématique existant entre les deux grandeurs — la loi résumant les variations de l'une en fonction de l'autre — n'a été établie toutefois qu'à une date encore relativement récente, et encore les résultats ne paraissent-ils pas être entièrement concordants d'un expérimentateur à un autre.

Selon PIQUET, DECROIX, LIBERSA et DUJARDIN (43) l'expérience montrerait que lorsque la pression sous-glottique, portée sur un graphique en abscisse et mesurée en centimètres d'eau, croît de 10 à 100, l'intensité du son mesurée en phones croît plus rapidement et selon une courbe d'allure parabolique.

(42) cf. COHEN, M.R. et DRABKIN, I.E., *A Source Book in Greek Science*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1958.

(43) cf. PIQUET, J. et DECROIX, G., *Etude expérimentale péropératoire du rôle de la pression sous-glottique sur les vibrations des cordes vocales chez l'homme*, *C.R. Soc. Biologie*, 149, 1955, pp. 296-300.

J. VAN DEN BERG expérimentant sur un larynx isolé et in vitro a établi ultérieurement au moyen de trois graphiques extrêmement parlants les relations existant entre les cinq variables suivantes : la pression sous-glottique (évaluée en cm d'eau), le débit évalué en ml/s, la fréquence (exprimée en cps.), l'intensité (mesurée en dB) et les forces latérales appliquées aux cordes vocales. Il apparaît sur ces graphiques qu'une augmentation de la pression sous-glottique entraîne simultanément une élévation de la hauteur du son émis, une augmentation du débit et de l'intensité acoustique. Une augmentation de la tension latérale s'accompagne d'une augmentation de la pression sous-glottique, elle entraîne un son plus aigu, une intensité sonore plus grande, mais un débit plus faible.

La corrélation qui existerait entre la fréquence et les caractéristiques générales du vibrateur (masse, longueur, élasticité des bandes vocales) a fait l'objet de vives controverses. R. HUSSON qui admet que « la pression sous-glottique commande l'intensité du son glottique initial » affirme, en s'appuyant sur les expériences de PIQUET et DECROIX, que la même pression « ne joue aucun rôle dans la fixation de la fréquence des ouvertures glottiques rythmées de caractère phonatoire, donc dans la fixation de la hauteur de la voix » (44). Tel n'est toutefois pas, en général, l'avis des expérimentateurs. J. VAN DEN BERG a montré d'une manière très nette qu'il existait une corrélation étroite entre la valeur de la pression sous-glottique, la fréquence du mouvement vibratoire et la tension latérale appliquée aux cordes vocales.

Philip LIEBERMAN (45) est parvenu sensiblement aux mêmes conclusions. Les résultats enregistrés lui ont permis d'affirmer que la fréquence du fondamental croît en moyenne de 20 cps environ lorsque la pression sous-glottique s'élève d'un centimètre d'eau.

Dans une communication présentée au Symposium international sur la fonction phonatoire du larynx, les 20 et 21 octobre 1955, Paul MOORE (46) mit également l'accent sur le fait que la fréquence de vibration des cordes vocales était « déterminée par la masse, la longueur et l'élasticité » de celles-ci. Le degré d'élasticité serait « directement proportionnel » au nombre de vibrations et par suite, à la hauteur du son produit. Le tableau ci-après, établi d'après ses observations, résume les différents types de phénomènes que peut mettre en œuvre le mécanisme laryngé pour déterminer un changement de la hauteur tonale.

(44) cf. R. HUSSON, *Physiologie de la phonation*, op. cit. p. 156.

(45) cf. Philip LIEBERMAN, *Intonation, Perception and Language*, op. cit. pp. 96-97.

(46) cf. Paul MOORE, Observation sur la physiologie de la tonalité de la voix, in *Larynx et Phonation*, op. cit. p. 75.

CARACTERISTIQUES DES BANDES VOCALES
ET MECANISME DE LA VARIATION DE LA HAUTEUR TONALE

MASSE	LONGUEUR	ELASTICITE	
Variation par allongement et raccourcissement des c.v.		augmentation de la rigidité musculaire et de l'élasticité interne.	Effet
1er PHENOMENE			
la masse de la section transversale décroît	< =	Elongation des c.v. limite	Augmentation de la Hauteur Tonale dans tous les cas
		= > la tension augmente	
Longueur maxima :			
2° PHENOMENE			
réduction de l'unité de masse		(Combinaison des) (deux facteurs)	Augmentation de la Hauteur Tonale dans tous les cas
		tension additionnelle des muscles des muscles des c.v. (d'où une plus grande élasticité)	
limite		limite	
3° PHENOMENE			
		Raccourcissement des segments vibrants	

LA THEORIE NEURO-CHRONAXIQUE

Au système d'explication traditionnel dont le mécanisme a été décrit ci-dessus, Raoul HUSSON et certains de ses collaborateurs ont tenté de substituer dès 1950 une théorie totalement différente et de caractère neurogène.

A une date bien antérieure déjà, (47) ce savant qui fut pendant un quart de siècle à l'avant garde des recherches phonétiques et qui mérite toujours de cette science par les discussions très fructueuses que son œuvre ne cesse de susciter, émit l'hypothèse que le larynx subit l'influence fréquentielle des rythmes nerveux. Cette idée se heurtait alors à de multiples difficultés : au problème crucial de la disposition des fibres musculaires à l'intérieur des cordes vocales, à l'ignorance quasi totale, dans laquelle on se trouvait à l'époque, de l'activité électrique du nerf récurrent pendant la phonation, de ses propriétés électrophysiologiques, de l'innervation de la musculature vocale etc... Elle se répandit cependant à la faveur du discrédit dont on s'appliqua à couvrir dès lors les explications classiques. Les attaques très violentes lancées à plusieurs reprises contre la théorie myo-élastique qu'on déclara « impuissante à expliquer de nombreux faits de physiologie phonatoire normale et pathologique » devaient permettre en effet à R. HUSSON de consolider ses positions et de disposer en sa faveur un certain nombre de spécialistes de ces questions.

L'idée avait fait son chemin. Dans la thèse sur les phénomènes physiologiques et acoustiques fondamentaux de la voix chantée, qu'il soutint le 17 juin 1950 devant la Faculté des Sciences de Paris, HUSSON annonçait que « le comportement phonatoire soi-disant vibratoire de la glotte n'était qu'une activité neuro-musculaire rapide, dont la fréquence était indépendante du courant d'air et admettait une genèse purement encéphalique ».

Selon cette théorie, dite dès lors *neuro-chronaxique* (du grec *neuron*, nerf ; *chrônos*, temps et *axôn*, axone) puisqu'elle repose sur la conduction récurrentielle des cellules nerveuses, les cordes vocales mises en adduction par les constricteurs du larynx ne sont pas écartées l'une de l'autre par l'air intra-trachéal et la pression sous-glottique, mais par les contractions rapides et rythmées des muscles vocaux déterminées « coup pour coup » par

(47) Cette idée fondamentale, R. HUSSON l'avait soumise à son vénéré maître Louis Lapique dès le mois de mars 1935. Il l'exposa pour la première fois, en public et verbalement, devant la Société française de Phoniatrie, le 21 octobre 1936 (IVE congrès). (cf. *Physiologie de la phonation* op. cité pp. 12-13).

des salves motrices récurrentielles. Ces idées allaient cependant tellement à l'encontre des conceptions traditionnelles, et si délibérément, que la publication de la thèse en 1951 produisit une véritable levée de boucliers, tant dans les milieux de la phoniatry française officielle que sur le plan international. Raoul HUSSON s'appliqua dès lors, jusqu'à sa mort accidentelle, à démontrer le bien fondé de sa théorie, et à faire face aux attaques dont ses recherches firent l'objet. Quiconque a eu l'occasion de l'entendre a pu admirer en lui une rare persévérance. L'appui qui lui fut apporté par toute une pléiade de chercheurs et par certains maîtres de la science mondiale devaient lui permettre de se livrer en l'espace d'une quinzaine d'années à une véritable entreprise de persuasion et à se défendre sur tous les fronts, tant dans les domaines de l'anatomie et de l'histologie que de la neurologie ou de l'endocrinologie.

Les travaux du Dr Kurt GOERTLER, directeur de l'Institut d'Anatomie de Fribourg-en-Brisgau, sur la disposition des fibres musculaires dans la corde vocale de l'homme, fournirent à sa théorie, dès 1950, la *base anatomohistologique* indispensable dans ce système d'explication à la compréhension des mouvements de la glotte. Dans un article publié en 1950 (48), il défendit l'opinion que le muscle vocal n'est pas parallèle au ligament vocal mais qu'il se compose en fait de deux muscles, d'un muscle thyro-vocal et d'un muscle ary-vocal. Le Dr André Moulouquet devait résumer cette thèse dans les *Exposés Annuels d'O.R.L.* de 1955 pp. 169-180 :

« Le muscle ary-vocal, écrit-il, naît sur toute la longueur du bord inférieur du cartilage aryténoïde entre l'apophyse vocale et l'apophyse musculaire ; les fibres internes, les plus courtes, nées près de l'apophyse vocale, se portent en dedans, en haut et en avant pour s'insérer sur le segment postérieur du ligament thyro-aryténoïdien inférieur. Les plus longues se portent également en dedans, en haut et en avant pour venir s'insérer sur le segment antérieur du même ligament. Les plus externes de ces fibres, nées de l'apophyse musculaire, seules, parviennent à s'insérer sur l'angle rentrant du cartilage thyroïde et sont contiguës avec les fibres du muscle thyro-aryténoïdien externe dont on ne peut les séparer. Quelques fibres du muscle ary-vocal ne se terminent pas sur le ligament thyro-aryténoïdien inférieur, mais un peu au-dessous, sur la membrane du cône élastique.

Le muscle thyro-vocal naît par deux faisceaux sur la face postérieure du cartilage thyroïde, l'un, important, au-dessus de l'insertion sur le cartilage du ligament thyro-aryténoïdien inférieur. L'autre, grêle, au-dessous de ce ligament. Les fibres les plus courtes du faisceau supérieur se portent en arrière, en dedans et en bas et viennent s'insérer sur le segment supérieur du ligament thyro-aryténoïdien inférieur. Les faisceaux les plus longs du

(48) K. GOERTLER, Die Anordnung, Histologie und Histogenèse der quergestreiften Muskulatur im menschlichen Stimmband, in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*, 115, (1950), pp. 352-401.

faisceau supérieur viennent s'insérer sur le segment postérieur du ligament thyro-aryténoïdien inférieur, et même sur l'apophyse vocale après avoir cheminé, les uns sur la paroi externe, les autres sur la paroi interne du ventricule. Les fibres du faisceau inférieur, obliques en dedans, en haut et en arrière, viennent également s'insérer sur le ligament thyro-aryténoïdien inférieur ».

La réponse des cordes vocales aux influx nerveux se traduisait désormais par la contraction des faisceaux ary-vocaux et thyro-vocaux. De la disposition particulière de ces fibres, il résultait en effet que chaque fois qu'une salve d'influx récurrentiels tombait sur le larynx, le bord libre de chaque membrane était tiré vers l'extérieur.

Les travaux de Gertrud SEITER (1955) sur le développement embryologique du larynx lui permirent d'affirmer par surcroît que cette architecture musculaire très fine résultait, chez l'homme, de l'existence d'un « blastème » qui n'apparaît chez aucun animal, et à partir duquel se développe plus tard la partie membraneuse de chaque corde vocale.

Les muscles de la voix devant jouer dans ce système un rôle extrêmement actif, contrairement à ce qui se passe dans la théorie myo-élastique, on se demanda très vite comment cela pouvait être possible. La réponse à cette question fut apportée par le Dr Ermanno MANNI de l'Institut de Physiologie humaine de Turin (1959) qui avait pu observer sur ses préparations de cordes vocales une quantité énorme de mitochondries. L'existence, dans le tissu musculaire de ces membranes, de réserves métaboliques extrêmement riches, expliquait de toute évidence la quasi infatigabilité de ces organes qu'on n'a pas manqué de rapprocher dès lors du tissu du myocarde ou des pectoraux des oiseaux.

Gérard Rudolph, maître de conférences de physiologie à la Faculté de Médecine de Hamburg mettait en évidence dans le même temps, l'extrême richesse de l'innervation de la corde vocale.

C'est sur la base d'arguments nombreux sans doute, mais toujours indirects, que R. HUSSON avait soutenu l'idée d'une régulation fréquentielle neurogène. Cette affirmation était si lourde de conséquences, qu'il parut indispensable d'en obtenir des preuves expérimentales. On songea donc à enregistrer simultanément sur un oscillographe cathodique à double trace les potentiels d'action récurrentiels recueillis par deux électrodes réceptrices placées sur le nerf dénudé, et les vibrations de la voix, captées par un microphone, à la sortie de la cavité buccale. Sur l'Homme, une telle expérience ne pouvait être tentée qu'au cours de la phase préalable d'une opération de laryngectomie totale.

Elle fut réalisée pour la première fois, le 26 novembre 1952, sur la

proposition du Dr André MOULONGUET, (49) membre de l'Académie de Médecine, assisté pour la partie électrologique des Drs Paul LAGET, René SAUMONT, Robert GAILLARD, Christian CHENAY, Jacques VANNIER, R. HUSSON et des Drs LEROUX Robert, Frank DUNCOMBE et P. PONCET pour la partie chirurgicale, au service de chirurgie oto-rhinologique de l'Hôpital Baucicaut à Paris. Les techniques utilisées ayant nécessité une certaine mise au point la tentative fut répétée le 7 janvier et le 3 juin 1953 sur deux autres sujets.

Selon MOULONGUET et ses collaborateurs, les traces offertes par la voix (phonogramme) et l'activité électrique du récurrent (électro-neurogramme) sont homorythmiques à chaque instant. En s'appuyant sur les résultats de ces expériences, R. HUSSON a cru pouvoir conclure que « lorsque le sujet émet un son de hauteur N1 la fréquence N de ses ouvertures glottiques rythmées est commandée par des salves motrices récurrentielles de même fréquence ». Les recherches électromyographiques effectuées sur la corde vocale de l'homme et in vivo de 1954 à 1957 par le Dr. G. PORTMANN et ses collaborateurs les Drs S.L. ROBIN, R. HUMBERT et P. LAGET (50) à l'Hôpital Bellan à Paris, devaient lui permettre de cerner encore davantage la question de l'activité bioélectrique du récurrent et du muscle vocal.

Au cours de quatre expériences d'électromyographie de cordé vocale exécutées sur des sujets ayant dû subir une intervention chirurgicale (hémilaryngectomie ou pharyngotomie), ces savants ont pu constater d'une part, que l'aiguille-électrode recueillait une importante activité électrique (15 mv environ) dès qu'elle était enfoncée dans les membranes vocales, en l'absence même de tout effort de phonation, et que, d'autre part, l'enregistrement oscillographique devenait plus ample, plus épais, et faisait apparaître une activité rythmique, dès qu'on demandait au sujet de faire comme s'il émettait un son.

En se fondant sur les électromyogrammes qu'ils ont recueillis, ils concluent à l'existence de deux phénomènes superposés : d'une *activité tonique* de base de la corde vocale et, en second lieu, d'une *activité électrique* rythmique, exactement à la fréquence du son émis, fournie par les contractions rythmiques simultanées des unités motrices avoisinant l'électrode.

(49) MOULONGUET, A. Enregistrement simultané, sur l'homme et in situ, des potentiels d'action récurrentiels et de la voix au cours d'une opération de laryngectomie totale, *Rev. Laryngol. Portmann, suppl.* II/1954, pp. 110-127.

— Démonstration chez l'homme de l'existence dans le nerf récurrent de potentiels d'action moteurs synchrones avec les vibrations de cordes vocales. *Bull. Acad. Nat. Méd.*, 137, 1953, pp. 475-482.

— Notions nouvelles sur la physiologie laryngée — *Revue du Praticien* VII, 21 juillet 1957 pp. 2347-2351.

(50) PORTMANN, R. HUMBERT, S.L. ROBIN, P. LAGET et J. VANNIER l'électromyographie des cordes vocales de l'homme pendant la phonation C.R. *Soc. Biologie* 149, 1955, pp. 1783-1787.

PORTMANN, HUMBERT, ROBIN, LAGET et HUSSON — Etude électromyographique des cordes vocales chez l'homme — *C.R. Soc. Biologie*, 149, 1955, pp. 296/300

R. HUSSON s'empressa d'ajouter que cette activité rythmique ne pouvait provenir ni d'un effet microphonique (l'amplificateur utilisé éliminant les effets éventuels dus aux déplacements globaux des électrodes par rapport à la terre), ni d'un réflexe proprioceptif (puisque une anesthésie en excluait la possibilité) et qu'elle ne pouvait avoir en conséquence qu'une *origine centrale et volitive*.

L'affirmation suivant laquelle la vibration des cordes vocales n'était qu'un acte neuromusculaire déclenché par des stimulations récurrentielles appropriées, déboucha ainsi très logiquement sur l'idée que ce phénomène devait pouvoir exister en *l'absence de tout courant d'air*. P. LAGET (51) avait essayé, dès 1952, d'en donner une confirmation expérimentale en agissant sur un récurrent de chien à l'aide de stimulus électriques rythmées à fréquences croissantes, avec observation laryngostroboscopique concomitante des cordes vocales.

A cette tentative qui conserve un intérêt historique et qui a été répétée par divers chercheurs, avec des techniques d'ailleurs totalement différentes, ont fait suite, en 1956, les expériences fondamentales auxquelles se réfère la théorie neuro-chronaxique, des professeurs J. PIQUET et G. DECROIX de la chaire d'Oto-rhino-laryngologie de la Faculté de Médecine de Lille, aidés par le professeur agrégé d'anatomie Claude LIBERSA, et par M. DUJARDIN de la chaire de Biophysique de la même Faculté.

L'équipe ainsi constituée aurait réussi à filmer à la caméra ultra rapide, en couleurs et sur l'homme, le phénomène très curieux de la vibration des cordes vocales, en l'absence de toute pression sous-glottique, et de tout courant d'air traversant la glotte (52).

A ces résultats qui étaient pour la thèse défendue par R. HUSSON de la plus haute importance puisqu'il les a érigés en preuve, sont venus s'ajouter postérieurement d'autres allant dans le même sens, notamment les observations que les professeurs L.A. GALLI et J.B. QUIROS (53) ont pu faire, le 13 avril 1957, à l'Hôpital Avellaneda de Buenos-Aires, sur un sujet qui était atteint de paralysie des dilatateurs avec voix bien conservée, et les enseignements de l'étude que O. SABOURAUD et F. GREMY avaient entreprise sur des dysarthriques (54).

Le générateur vocal fixant à chaque instant la hauteur de la voix, selon le nombre des salves de potentiels d'action qui lui parviennent par unité de temps, il restait encore à expliquer, à la suite de tous ces travaux, comment ce mécanisme neuro-musculaire pouvait engendrer les diverses

(51) LAGET P. et ROBIN J.L., L'électromyographie des cordes vocales du chien, *Rev. Laryng. Portmann* 77, 1956, pp. 615-626.

(52) C.R. Acad. Sci., Paris 242, 1956 p. 1223.

(53) FALLI, L.A. et DE QUIROS, J.B., Quelques observations récentes sur la vibration des cordes vocales, Buenos-Aires, 1957.

(54) O. SABOURAUD et GREMY, F. — Sur la possibilité de mouvements des cordes vocales sans émission sonore, *Soc. Biolog.*, Paris 28/6/1958.

fréquences de la voix humaine, et notamment les fréquences très élevées de la voix chantée. Bremer ayant établi dès 1947 que tout tissu ne peut conduire des influx à une fréquence supérieure à celle dans laquelle deux influx consécutifs sont séparés par la durée d'une période réfractaire, on se heurtait dans ce domaine à une difficulté de taille : le récurrent ne pouvait faire exception à cette loi et comme on lui reconnaissait une période réfractaire pratique moyenne de 2ms, sa fréquence de conduction maximum était nécessairement limitée et de l'ordre de 500 cycles environ. Comme la voix humaine peut, de toute évidence, émettre des sons sur des notes plus élevées, il a fallu concevoir dans le récurrent un mode de conduction permettant d'aller au-delà de cette fréquence. R. HUSSON songea donc à appliquer au larynx le « mécanisme de propagation tournante » découvert par Stevens et Davis (1938) dans le nerf auditif (55). Il fallut donc admettre que pour les sons de fréquence supérieure à la fréquence limite, toutes les fibres du récurrent n'étaient pas mises en jeu simultanément, mais qu'elles répondaient alternativement, par groupes, une fois tous les deux ou trois stimulus de la série rythmique. Ce phénomène d'alternance des réponses de différents groupes de fibres nerveuses fut illustré alors par la figure B de la planche 2b. Il avait été décrit par WEVER (56) dès 1949 à propos de la représentation de la fréquence du son dans les voies nerveuses auditives sous le nom de « principe de la volée » (57).

Cette explication était, certes, très séduisante, mais elle exigeait pour le moins une confirmation expérimentale. R. HUSSON la trouva dans les travaux du professeur Edouard CORABOEUF qui, aidé des Drs GARGOUIL et SAUMONT avait réussi à réaliser expérimentalement, au laboratoire de physiologie de la Sorbonne, une conduction biphasée sur un nerf récurrent de chien stimulé électriquement, in vitro, à des fréquences croissant régulièrement de 100 à 1000 par seconde (58). Il ne restait plus alors qu'à lever une ultime objection.

Au lendemain de ces expériences les détracteurs de la thèse hussonienne firent remarquer en effet à l'illustre savant que les fibres nerveuses qui vont du cortex aux cordes vocales suivent des trajets différents. Le récurrent gauche étant de ce fait plus long que le droit, les influx moteurs devaient arriver en retard sur la corde gauche, ce que l'on n'observe jamais. La réponse à cette question particulièrement embarrassante, R. HUSSON la

(55) Stevens et Davis : *Hearing : Its Psychology and Physiology*, New-York, 1938, cf. aussi : Charles Kayser ; *Physiologie* (II), Editions médicales Flammarion, 1963.

(56) WEVER E.G. *Theory of hearing*, (New-York, 1949, Wiley éd.)

(57) R. HUSSON. *Physiologie de la phonation*, op. cit., p. 37 et La Nature, Février 1957 : Comment se classent les voix humaines, p. 45.

(58) Ed. CORABOEUF, R. HUSSON, Y.M. GARGOUIL et R. DISTEL : Etude de la fibre musculaire unique du thyro-aryténoïdien interne du chien à l'aide d'électrodes intracellulaires, *Rev. Laryng. Portmann*, suppl., juillet 1957, pp. 561-568.

trouva dans les travaux de Mme Jelena KRMPOTIC (59), professeur d'anatomie à la Faculté de Médecine de Zagreb, qui parvint à établir, dès 1957, que les longueurs moyennes sont de 42,4 cm à gauche contre 31,7 cm à droite, et que les axones gauches ont un calibre surpassant dans l'ensemble de 1,9 millièrne de millimètre celui des axones droits. Comme la vitesse de propagation des influx dépend de ce facteur, la simultanéité d'arrivée des influx récurrentiels droits et gauches sur le larynx se trouvait rétablie.

Ainsi, l'une après l'autre, les principales objections qu'on avait faites à la théorie neuro-chronaxique avaient pu être levées. Il était apparu successivement :

- que les fibres des muscles thyro-aryténoïdiens internes étaient, non pas parallèles aux cordes vocales, mais qu'elles venaient s'insérer, « en dents de peigne », sur le ligament élastique.
- que le nombre des salves de potentiels d'action dans les muscles vocaux correspondait exactement à la fréquence fondamentale du son émis.
- que les cordes vocales pouvaient vibrer en l'absence de toute pression sous-glottique et de tout courant d'air phonateur.
- que le tissu musculaire de la corde vocale était riche en réserves métaboliques, que les faisceaux aryvocaux et thyrovocaux goertliériens étaient de ce fait infatigables, qu'ils pouvaient se contracter et se décontracter un grand nombre de fois par seconde, jusqu'à une fréquence limite de 500 cycles environ, et que dès qu'il s'agissait de répondre à des fréquences plus élevées, les fibrilles ne réagissaient plus en même temps mais par groupes de deux, trois ou quatre, selon que la fréquence fondamentale se situait entre 500 et 1000 cycles, 1000 et 1500 cycles, 1500 et 2000 cycles.
- que les cordes vocales pouvaient vibrer enfin d'une manière synchrone, en dépit de la différence de trajet des récurrents droit et gauche, par suite d'une « organogenèse fonctionnelle », qui fait que la différence de longueur se trouve compensée par une différence de calibre des axones.

La théorie neurochronaxique paraissait alors établie. Au calcul approximatif des forces aérodynamiques s'exerçant sur les cordes vocales pendant la phonation, dans la théorie myo-élastique, HUSSON substituait une évaluation qui tenait compte essentiellement des forces neuromusculaires mises en jeu dans le système d'explication qu'il proposait. En assimilant la contraction très rapide des fibrilles goertliériennes des cordes vocales à une percus-

(59) Jelena KRMPOTIC : Données anatomiques et histologiques relatives à la stimulation récurrentielle droite et gauche pendant la phonation et données anatomiques sur la longueur des voies motrices bulbo-effectrices relatives à la phonation, *Rev. Laryngol. Portmann*, suppl. juillet 1957, pp. 533-546.

sion F qui agit pendant un temps t sur une corde de masse m en lui imposant un écart de , avec une vitesse finie v , il pouvait écrire que :

$$\int_0^t F dt = m v = m \frac{de}{dt}$$

dans cette expression :

le temps t est de l'ordre de un millième de seconde
la percussion F peut être considérée comme constante
la masse m de la corde vocale est de 0,8 g env., selon les mesures faites par Mme Krmpotic sur le cadavre. Mais comme la percussion fait également travailler les liaisons latérales de la corde et son élasticité interne, R. Husson a porté cette valeur à 1,5 g.
l'écart de est variable, comme nous l'avons vu plus haut. On peut prendre comme valeur moyenne 1 mm.

En remplaçant les différents termes par leur approximative (unités CGS) il obtenait pour F la valeur de :

$$F = m \frac{de}{(dt)^2} = 1,5 \frac{0,1}{(0,001)^2} = 150.000 \text{ dynes (60)}$$

En se référant à l'illustre physicien Yves Rocard, il tenta de démontrer, un peu plus loin (61) qu'il était impossible d'appliquer la loi de Bernouilli à l'écoulement de l'air à travers la glotte pendant la phonation. C'était sans doute un des coups les plus durs portés contre la théorie myo-élastique, mais ses partisans ne désarmèrent pas pour autant. Il apparut en effet très vite, sous les coups redoublés d'une critique impitoyable, qu'en dépit de tant de faits convergents, ce bel édifice était encore très fragile. L'un après l'autre tous ses fondements allaient être remis en cause.

La structure histologique du muscle vocal a fait l'objet d'un débat d'autant plus vif que la disposition des fibres musculaires était d'une importance primordiale pour la théorie neuro-chronaxique de la mise en

(60) cf. R. HUSSON, *Physiologie de la phonation*, op. cit., p. 302. Ce calcul figurait déjà dans un article intitulé : *Comment vibrent nos cordes vocales ?*, qu'il publia dans la revue : *La Nature*, en janvier 1957.

La masse m avait été évaluée alors à 10 g et F était de ce fait de l'ordre de 1 000 000 de dynes. En évaluant la pression sous-glottique à la valeur assez élevée de 100 cm H₂O - il montrait que la force aérodynamique f , égale dans ces conditions à

$$f = 100 \times 981 = \text{environ } 100.000 \text{ dynes}$$

était toujours dix fois plus petite que la force d'origine neuro-musculaire. La valeur de cette force ayant considérablement baissé, à la suite d'une meilleure évolution de m , le calcul relatif aux forces aérodynamiques a disparu dans la rédaction définitive. R. HUSSON se contenta de renvoyer le lecteur aux estimations de F. GREMY (considérations sur l'énergie mécanique du larynx durant la phonation, *Journal Physiolog.* 52, 1960, pp. 555-567).

(61) R. HUSSON, *Physiologie de la phonation*, op. cit., p. 299.

vibration des cordes vocales. A l'origine de la controverse née autour de cette question se situent les travaux déjà cités, qu'entreprit, de 1948 à 1950, le Prof. Dr Kurt GOERTLER, directeur de l'Institut d'Anatomie de Fribourg-en Brisgau (62).

A l'appui de sa thèse, GOERTLER présenta trois photos de coupes faites à travers la corde vocale (cf. pl. n° 3a). Ces vues parurent malheureusement très peu convaincantes et les spécialistes des questions histologiques n'ont pas manqué de faire remarquer que, sur les trois clichés, aucun ne montre des fibres musculaires reliant le thyroïde ou l'arythénoïde au ligament vocal. Sans doute peut-on apercevoir sur la troisième image des faisceaux qui se croisent, mais comme Goertler affirme par ailleurs (cf. op. cit. p. 354 et 357) que les fibres thyrovoicales se recoupent aussi dans un plan vertical, on peut se demander si les fragments que l'aperçoit sur ces coupes, près du ligament thyro-aryténoïdien sont bien les extrémités de fibres s'insérant sur le ligament vocal. S. Behringer, élève de Goertler, devait publier en 1955 dans la *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte* (63) des vues qui sont sans doute meilleures, (cf. planche n° 3b), mais dont l'interprétation reste difficile et peut être tout autant sujette à discussion. En effet, si l'on en croit BEHRENDES (64), le bord libre que l'on aperçoit sur les photos en question n'est pas le ligament vocal, mais le cône vocal. Chose curieuse, la même revue contenait, un peu plus loin, un article de Van den Berg et Moll (65) sur le même sujet. Les photographies qui illustrent leur étude (cf. planche n° 3b) paraissent indiquer que le muscle vocal est composé essentiellement de faisceaux qui courent d'une manière ininterrompue, et sans pour autant être parallèles les uns aux autres, comme on le croit généralement, du thyroïde vers l'aryténoïde. Mais, contrairement à la thèse de Goertler et de son école, ces faisceaux ne s'inséraient pas sur le ligament vocal, mais sur l'apophyse antérieure et l'arête externe du cartilage aryténoïde. Au cours du symposium international sur la fonction phonatoire du larynx qui s'est tenu à Paris en 1955, P. TRUFFERT (66) déclarait de son côté que le ligament vocal lui avait toujours paru « libre de toute insertion dans toute son étendue conformément à l'opinion classique ».

Dans un essai d'analyse critique (*Annales d'oto-laryngol.* 1961) le Dr Hartmut GERKEN s'efforça toutefois de démontrer que les insertions vues par Goertler ne pouvaient pas être tenues pour des apparences, vu leur

(62) cf. op. cit.

(63) S. BEHRINGER, Die Anordnung der Muskulatur in der menschlichen Stimmlippe und im Gebiet des Conus elasticus, in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*, 118, 1955, pp. 324-342.

(64) J. BEHRENDES, Neuere Ergebnisse über die Bewegungstörungen des Kehlkopfes, in *Arch. für Ohren, Nasen und Kehlkopfheilkunde*, 169, 1956 pp. 1-172.

(65) J. Van den BERG, J. MOLL, Zur Anatomie des menschlichen Musculus Vocalis, in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*, 118, 1955 pp. 465-470.

(66) P. TRUFFERT ; *Larynx et Phonation* (publication de la Clinique d'O.R.L. de la Fac. de Médecine de Paris et de la Sté française de phoniatrie, p. 10, PUF.

grand nombre. R. HUSSON devait s'appuyer sur ce travail dans son exposé de la théorie neuro-chronaxique (67). La démonstration est loin d'avoir emporté cependant la conviction des spécialistes de la musculature laryngée. Selon L. RUEDI (68), il semblerait que les difficultés viennent essentiellement du fait que les fibres élastiques qui composent le ligament vocal irradient dans le muscle. Il résulte de ceci que toute séparation devient délicate, sinon impossible. Dans l'état actuel des recherches les choses semblent en être restées là. Il appartiendra aux études histologiques en cours de faire la pleine lumière sur l'architecture fine encore insuffisamment connue du muscle vocal.

A l'appui de leur « démonstration chez l'homme, de l'existence dans le nerf récurrent de potentiels d'action moteurs synchrones avec les vibrations des cordes vocales » (69), A MOULONGUET et ses collaborateurs avaient publié trois extraits de leurs enregistrements. Malheureusement ces pièces n'ont guère réussi à emporter la conviction. On fit remarquer en effet, de divers côtés, que les tracés ainsi produits étaient illisibles et qu'on n'avait point la possibilité de s'assurer de l'exactitude des conclusions qui en avaient été tirées.

La question de l'activité bioélectrique du récurrent et du muscle vocal souleva, plus que toute autre, les passions. Les « études électromyographiques des cordes vocales chez l'homme » (70) publiées par PORTMANN, HUMBERT, ROBIN, LAGET, HUSSON et VANNIER furent qualifiées souvent de hâtives (71). Comme ils n'avaient pas fait d'enregistrements simultanés des sons émis (phonogramme) et des salves successives de potentiels d'action, (électromyogramme), on leur reprocha de ne pas avoir démontré que l'activité électrique recueillie était homorythmique avec la fréquence du son émis. Sur ce problème précis, il faut bien reconnaître du reste, que les avis sont particulièrement partagés. Selon F. ISCH, maître de conférences agrégé, chef du laboratoire d'électromyographie à la clinique neurologique de la faculté de médecine de Strasbourg (72), les données recueillies sur l'activité électrique des muscles laryngés au repos et au cours de la phonation avec enregistrement simultané, sur une deuxième chaîne d'amplification

(67) R. HUSSON, *Physiologie de la Phonation* — Masson Cie, 1962, p. 98.

(68) L. RUEDI, Some observations on the Histology and Function of the larynx, in *Journal of laryngology and otology*, 73, 1959, pp. 1-20.

(69) Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, 137, (1953) pp. 475-482.

(70) *C.R. Soc. Biologie*, 149, 1955, pp. 296-300 et *C.R. Soc. Biologie*, 149, 1955, pp. 1783-1787.

(71) cf. M.A. FESSARD, *Larynx et Phonation* — p. 89 (Discussion à propos de la communication de R. HUMBERT et P. LAGET).

« ... Je ne voudrais pas donner l'impression que je refuse de croire à l'origine véritablement électromyographique de ces tracés qui ressemblent à certains de ceux que nous avons enregistrés chez le chien par stimulation du récurrent. Je regrette simplement que les réalisateurs de cette expérimentation n'aient pas pu enregistrer les phénomènes au moment du départ de l'émission sonore et en même temps qu'une inscription microphonique ».

(72) F. ISCH, *Electromyographie*, Editions DOIN, Paris 1963, pp. 234-241.

du son émis, révéleraient l'existence de deux phénomènes distincts conformément d'ailleurs à ce qui avait été trouvé par PORTMANN et ses collaborateurs. Il y aurait tout d'abord une *activité électrique de base*, rythmée par la respiration. Elle augmenterait considérablement au moment de l'émission vocale qui survient pendant l'expiration, même un peu avant, et existerait même en l'absence de tout passage d'air (sujets trachéotomisés). La fréquence des décharges de ces unités motrices pendant la phonation serait de l'ordre de 20 à 50 c/s.

Le deuxième type d'activité ne ressemblerait en rien à une activité musculaire. Il s'agirait bien d'une activité sinusoïdale homorythmique du son émis, commençant en même temps que le son, s'arrêtant avec lui et n'existant plus en l'absence de passage d'air. Malheureusement, « cette forme d'activité électrique qui a paru fournir un substratum électrophysiologique à la théorie de HUSSON » n'est selon F. ISCH qu'un *effet microphonique* puisqu'il a pu être reproduit en plaçant une aiguille de BRONCK dans les polypes oedémateux du nez sur un sujet auquel on avait demandé de chanter bouche fermée. Ce chercheur ajoute du reste que « cette activité microphonique peut se superposer à l'activité électrique des potentiels d'unité motrice et rendre difficile l'interprétation des activités électriques recueillies au niveau de la corde vocale ». LAFON qui se réfère à ces travaux (73) n'hésite pas à conclure qu'aucun physiologiste n'a trouvé de concordance entre le son émis et les potentiels d'unités motrice musculaire. S'il arrive parfois que l'on recueille une activité synchrone de la fréquence émise, il s'agit, écrit-il, en accord avec VAN DEN BERG « d'une activité microphonique semblable à celle obtenue par WEVER et BRAY sur le nerf auditif ».

On a constaté, en effet, que la déformation des divers organes qui comprennent des membranes sur lesquelles les processus vitaux maintiennent une différence de tension bien définie s'accompagne de changements de tension. Comme les masses musculaires des cordes vocales se déforment non seulement au moment de la contraction active, mais également d'une façon passive sous l'effet de la pression sous-glottique qui les écarte, il y a lieu de distinguer deux types de déformations. Il apparaît bien que la variation dans la tension électrique sur la membrane d'une fibrille est, en soi-même beaucoup plus grande pour une contraction active que pour une contraction passive mais alors que les contractions actives des fibrilles prises à part ne sont pas coordonnées, les déformations passives se produisent au même moment dans toutes les fibrilles. Partant de ce raisonnement, J. VAN DEN BERG (74) conclut que « l'effet microphonique passif pourra être plus grand que l'effet résultant des contractions actives des fibrilles musculaires du muscle vocal ». L'inverse, poursuit-il, ne pourrait être vrai que si toutes les fibrilles musculaires se contractaient simultanément, ce que la théorie neuro-chronaxique exige précisément pour les tons fondamentaux dans le registre de poitrine. Les résultats expérimentaux obtenus dans la clinique

(73) LAFON, *Message et phonétique*, Paris, PUF, 1961.

(74) cf. *Larynx et Phonation* op. cit., p. 90.

du Pr. VAN DISHOECK lui ayant montré que les variations de tension passive sont effectivement plus grandes que les variations actives, il s'en suit que ces dernières ne se produisent point au même moment et que la théorie neuro-chronaxique est dans une impasse (75).

Dans l'intention de mettre à l'épreuve l'affirmation, selon l'école de HUSSON, qu'il existe une homorhythmie entre la vibration des cordes vocales et les fréquences nerveuses motrices, les professeurs A. FESSARD (Collège de France) et B. VALLANCIEN (Faculté de Médecine de Paris) ont procédé à l'examen du mouvement des cordes vocales pendant la stimulation récurrentielle, réalisé des électromyogrammes des muscles vocaux en vibration spontanée ou soumis à des contractions provoquées, étudié les effets d'une stimulation nerveuse sur le son produit par insufflation d'air dans la trachée, sur une douzaine de chiens de forte taille (76). Il ressort de ces travaux que si la stimulation est répétée à diverses fréquences un tétanos s'établit. Il devient apparemment parfait vers 30 à 40 p/s. Au delà de ce seuil et jusqu'à 200 p/s environ, la fusion tétanique laisse subsister un état de fibrillation d'amplitude très faible. Stimulés à des fréquences supérieures, « les muscles vocaux ont un comportement banal et ne montrent pas de tendance exceptionnelle à polyphaser les incitations qu'ils reçoivent d'influx nerveux synchroniquement émis ». Partant de ces observations, les auteurs n'hésitent pas de dire que « l'appui que l'expérience de LAGET semblait donner à la théorie neurogène, et dont on a fait si grand cas, apparaît comme parfaitement illusoire ». Ils constatent par ailleurs que l'activité musculaire homorhythmique (lorsqu'elle existe) apparaît avec retard, ce qui donne à penser qu'elle est plutôt un effet qu'une cause de la vibration. Aussi concluent-ils, serait-il peut-être plus conforme à la réalité physiologique d'admettre la formation d'un circuit d'origine proprioceptive. Cette hypothèse avait déjà été rendue plausible par l'expérience de PREISENDORFER (77) reprise par HANSEN et HOFMANN (78) et commentée par LULLIES (79) puis par les observations faites par LINDEMANN (80).

(75) P. LAGET a répondu à cet argument : « il est possible que les effets microphoniques soient grands si l'on se place dans les conditions optimum pour les détecter, mais non pas si on prend au contraire le maximum de précautions pour éviter cet effet en enregistrant les potentiels des unités motrices au moyen d'électrodes coaxiales et de dispositifs amplificateurs à haut coefficient de différentialité comme c'est le cas dans nos expériences ». cf. Données récentes sur l'électromyographie des cordes vocales de l'homme, in *Larynx et Phonation*, op. cit., pp. 81-90. (Discussion).

(76) A. FESSARD et B. VALLANCIEN : — Observations et enregistrements électromyographiques au cours de l'activité phonatoire provoquée ou spontanée chez le chien, in *Larynx et Phonation*, op. cit. pp. 93-111.

— Résultat de la stimulation du nerf récurrent avec électromyographie des cordes vocales chez les chiens, in *Journal de physiologie*, 48, pp. 538-541.

(77) PREISENDORFER F., Versuche über die Anpassung der willkürlichen Innervation an die Bewegung, in *Zeitschrift für Biologie*, 70, 1920, pp. 505-514.

(78) K. HANSEN et P. HOFFMANN, *Zeitschrift für Biologie*, 74, 1922, p. 229.

(79) LULLIES H., Physiologie der Stimme und Sprache, in *Gehör, Stimme und Sprache*, Berlin, Springer, 1953, pp. 163-293.

(80) E. LINDEMANN, Studies of Action Currents in Laryng. Nerves, in *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 27, 1930, p. 479.

Sur le chien PREISENDORFER avait constaté en effet, dès 1920, que lorsqu'un sujet exerçait du pied ou de la main une pression sur une barre en vibration on pouvait détecter dans ces membres à la fois des potentiels d'action dus à l'innervation volontaire persistant même en l'absence des vibrations et des potentiels d'action synchrones, des oscillations de la barre, d'origine réflexe et destinées semble-t-il à soutenir l'action volontaire. LINDEMANN, de son côté, constata une dizaine d'années plus tard que le récurrent était bien parcouru d'impulsions bioélectriques homorythmiques avec la fréquence fondamentale de la glotte en vibration, mais que si l'on sectionnait ce récurrent, les chiens ne cessaient nullement d'aboyer ! Bien plus ces impulsions pouvaient encore être détectées dans la partie proximale du nerf ! Tous ces résultats tendent à prouver, selon LULLIES, que les impulsions homorythmiques qui parcourent les récurrents pendant la phonation sont des potentiels réflexes (Nervöse Rückkoppelungen) provoqués par les excitations auxquelles le larynx en vibration soumet périodiquement les extrémités sensibles des nerfs laryngés supérieurs et dont le rôle serait « d'entretenir et de stabiliser » les mouvements de la glotte. Sous le poids de ces objections, l'affirmation suivant laquelle les cordes vocales peuvent vibrer en l'absence de tout courant d'air ne pouvait évidemment pas tenir. Aussi la thèse défendue par PIQUET et ses collaborateurs a-t-elle été mise en cause et réfutée dès 1960 par H. RUBIN (81). Sa démonstration se fonde sur un enregistrement cinématographique de la vibration des cordes vocales réalisé avec une caméra ultra-rapide (5000 images/s) sur trois patients qui avaient été trachéotomisés, mais dont le larynx était resté intact. Chacun d'eux fut prié d'émettre un /a/ tandis qu'un assistant bouchait du doigt le trachéostome. On s'aperçut dans ces conditions que dès que l'obturation cessait, la glotte interrompait ses mouvements. RUBIN en conclua que *les cordes vocales ne peuvent vibrer que si un courant d'air traverse le larynx*.

Ainsi, en l'espace d'une dizaine d'années, tous les arguments de la théorie neuro-chronaxique avaient été rejetés. On signala en outre, de divers côtés, des expériences qu'il est facile de reproduire ou encore des cas pathologiques tendant à démontrer l'impossibilité d'une régulation fréquentielle et d'une commande neurogène du fonctionnement laryngé.

Parmi les arguments allégués figurent tout d'abord ce qu'on peut appeler des « *réfutations cliniques* ». La faradisation des muscles laryngés constitue sans doute l'exemple le plus frappant. On sait qu'un muscle faradisé ne peut plus être rapidement contracté ni volontairement ni par la voie de son nerf. Or dans les dysphonies, lorsqu'on faradise la musculature laryngée, thyro-aryténoïdien interne y compris, on n'assiste pas, selon J.C. LAFON, à une perturbation anormale de la hauteur de l'émission sonore.

(81) H. RUBIN, The Neurochronaxic Theory of Voice Production — A réfutation, in *Archives of Otolaryngology*, 71, 1960, pp. 913-920.

Cela prouverait bien que les mouvements de la glotte ne peuvent admettre qu'une genèse myoélastique et aéro-dynamique.

On a maintes fois fait observer, par ailleurs, que la thèse hussonienne était contredite par de multiples faits pathologiques. J.C. LAFON cite à titre d'exemple les analyses qu'il a faites de voix bitonales et même pluritonales révélant parfois la présence de quatre sons fondamentaux simultanés (82). Comment expliquer dans la théorie neuro-chronaxique pareil phénomène ? Même en admettant qu'une activité puisse passer par un récurrent et l'autre par le deuxième on ne résoudrait le problème que de moitié !

Mais, l'argument le plus sérieux qu'on puisse avancer, à nos yeux, à l'encontre de l'idée d'une régulation fréquentielle neurogène, est qu'à côté de l'effecteur laryngien dont nous servons communément pour produire de la voix, il existe encore d'autres mécanismes, plus rarement utilisés certes, mais qui sont toujours susceptibles de l'être en cas de défaillance du système principal. C'est ainsi que certains laryngectomisés, privés des organes de la voix et ne respirant que par un orifice trachéal artificiel se créent un générateur sonore de remplacement en utilisant d'une part l'air fourni par l'estomac et l'oesophage et d'autre part, à la place des cordes vocales, la muqueuse oesophago-pharyngienne à un endroit où la présence d'un sphincter musculaire offre un défilé élastique pouvant jouer le rôle d'anche vibrante. GOTTSTEIN (83) cite même le cas d'un laryngectomisé qui avait appris à se servir de son épiglotte pour produire de la voix. SCRIPTURE (84), de son côté, décrit la parole d'une jeune fille qui, obligée de respirer par un trachéostome parce que son larynx s'était sténosé, avait appris à former une pseudo-glotte entre le voile du palais et la base relevée de la langue. Or il se trouve que la voix oesophagienne, qui a fait l'objet d'études multiples (85), a été soumise aussi à l'analyse acoustique. Il est apparu au cours de ces travaux, qu'un sujet entraîné pouvait émettre dans ces conditions des sons sur des fréquences allant de 20 à 100 cycles /sec. et que le fondamental oesophagien était variable dans le discours, de la même façon que le son laryngé.

Etant donné qu'un sujet peut se créer un mécanisme de remplacement fonctionnant d'une manière aussi satisfaisante, avec des moyens tout compte fait aussi grossiers, et alors qu'il ne saurait évidemment être question pour

(82) J.C. LAFON, *Bulletin d'Audiophonologie*, 2 (*Eléments de Message et Phonétique*), Fac. de Médecine et de Pharmacie de Besançon, 1972, p. 57, fig. 18.

(83) G. GOTTSTEIN, *Pseudo-Stimme nach Totalexstirpation des Larynx*, in *Arch. für Klinische Chirurgie*, 62, 1900, pp. 126-146.

(84) L. SCRIPTURE, *Speech without Using the Larynx*, in *Journal of physiology*, 50, 1916, pp. 397-403.

(85) B. VALLANCIEN, F. BESANCON, C. DINVILLE, E. CHIERIGIE et F. HEBERT :

La voie oesophagienne - Etude cinéradiométrique de l'expulsion de l'air, in *Proceedings of the fourth international congress of phonetic sciences*, HELSINKI., 1961, pp. 299-306.

la voix oesophagienne d'une régulation neurogène ou de caractéristiques histologiques et physiologiques exceptionnelles, du type de celles qu'on a cru devoir invoquer pour expliquer le fonctionnement du larynx, on voit mal pourquoi les mouvements phonateurs du générateur vocal, autrement plus adéquat à la production des sons du langage qu'un rétrécissement oesophagien, n'admettraient pas la même genèse, basée sur l'élasticité des membranes et la pression d'un courant d'air, que les vibrations de la pseudo-glottte.

La théorie neuro-chronaxique, qui a soulevé tant de remous, a plus de vingt ans déjà. HUSSON n'est plus, et le vaste mouvement de recherche qu'il a incontestablement suscité, au lendemain de la soutenance de sa thèse, et pendant une bonne quinzaine d'années, semble avoir perdu aujourd'hui toute son envergure.

On pouvait espérer que tant de travaux si passionnants, si originaux et si contradictoires quelquefois, aboutiraient en définitive à un nouvel état de nos connaissances en matière de physiologie phonatoire, mais cet espoir fut, pour le moins qu'on puisse dire, quelque peu déçu.

On attendait une vaste synthèse : on s'est enlisé dans des discussions inachevées et souvent aussi passionnées — trop passionnées peut-être même — pour que l'on puisse entièrement être assuré que l'objectivité qui est de rigueur dans la recherche scientifique ait toujours été entièrement sauvegardée.

Où en est aujourd'hui la physiologie de la phonation ?

Bertil MALMBERG (*Les nouvelles tendances de la linguistique*, 1966, op. cit. p. 158) déclare hardiment qu'après le travail de Bertil SONESSON (1961), la théorie de HUSSON semble devoir être définitivement abandonnée.

Tel ne semble toutefois pas être exactement l'avis d'Yvan LEBRUN (*Anatomie et Physiologie de l'Appareil Phonatoire*, 1968, op. cit.) qui, dans le chapitre 5° consacré précisément à une discussion serrée de cette question, laisse subsister un doute et prend congé de son lecteur en laissant la porte entr'ouverte sinon à la thèse hussonnienne prise dans son ensemble, du moins à certaines idées spécifiquement hussonniennes.

Husson s'est toujours opposé de son vivant à toute théorie de compromis. « Piquet et Terracol affirment », écrit-il, dans *Physiologie de la Phonation* op. cit. p. 121, que entre la théorie myo-élastique et la sienne « on ne peut établir une séparation marquée et qu'elles se complètent ». Ceci prouve, déclare-t-il, que ces deux auteurs n'ont rien compris ni à la théorie myo-élastique, ni à la sienne. Dans la théorie myo-élastique, poursuit-il, c'est l'air seul qui fait vibrer les cordes vocales supposées élastiques et raidies. Et nous venons de voir qu'il n'y est pour rien. Et, conclut-il, sur

le même ton : « A moins d'être en pleine confusion mentale, les deux théories s'opposent, au lieu de se compléter ».

Et pourtant, la vérité se situe selon toute vraisemblance à mi-chemin entre les deux. S'il semble assez bien établi, en effet, que l'idée de fond de la thèse hussonnienne d'une régulation fréquentielle neurogène « coup pour coup » ne saurait être retenue et que le mouvement vibratoire des cordes vocales est essentiellement d'origine mécanique, ainsi que le veut la théorie myo-élastique traditionnelle, il semble bien aussi, d'un autre côté, que le générateur vocal mécaniquement entretenu, et tout compte fait, assez rudimentaire tout de même, ne permet pas d'expliquer tous les faits phonatoires et de rendre pleinement compte de la multitude des ajustements et des utilisations que nous pouvons faire de notre voix.

Tel est aussi l'avis de B. VALLANCIEN (cf. *Physiologie de la Phonation. La fonction vocale*, in *Phonétique et Phonation*, 1966, op. cit. p. 66), qui a sans doute, actuellement, une des vues les plus justes à ce sujet.

Selon ce spécialiste de la fonction phonatoire, une commande nerveuse s'exercerait en effet sur cette anche vibrante de trois façons :

1°) « Une distribution périphérique détecte, écrit-il, les vibrations de la corde et d'autre part assure sa contraction. Ainsi par ce réflexe court, la tension se trouve ajustée à tous moments aux fréquences vibratoires dont la corde est le siège ».

2°) Une distribution centrale, en relation avec la première, poursuit-il, intervient sur toute la musculature interne du larynx pour modifier l'espace glottique et lui donner la forme exigée pour l'émission des sons engendrés par le courant d'air phonateur.

3°) Enfin, ajoute-t-il, « un contrôle extérieur est encore exercé par la voie auditive qui permet au sujet d'établir le son, grâce à ces deux commandes, suivant la hauteur et l'intensité désirées ».

L'idée bien hussonnienne d'un contrôle neurogène s'allierait ainsi tout naturellement à la conception traditionnelle pour conduire à un nouveau développement de notre connaissance de la physiologie phonatoire. N'a-t-on pas dit que des théories cohérentes, même imparfaitement fondées sur l'expérience font plus parfois pour le progrès des sciences que des myriades de recherches disjointes ?

R E S U M E

Les études de physiologie phonatoire, très largement développées au cours des deux siècles derniers, par des hommes de Science devenus illustres, ont connu, comme on le sait, un regain de faveur, après 1950, au lendemain de la soutenance à la Sorbonne de la thèse défendue par Raoul Husson (*Etude des Phénomènes Physiologiques et Acoustiques Fondamentaux de la Voix Chantée*, thèse - Fac. Sc. - Paris, 17 juin 1950).

Deux théories phonatoires se sont affrontées dès lors : la théorie traditionnelle dite « aérodynamique et myo-élastique » et la théorie nouvelle dite « neuro-chronaxique ». Chacun de ces systèmes d'explication du mouvement vibratoire des cordes vocales devait trouver des partisans et des détracteurs à tel point que l'on assista même, à certaines occasions, à des débats tout à fait passionnés.

Pareil affrontement et échange d'idées devaient être profitables à la Science phonétique, dans la mesure où ils contribuèrent considérablement à stimuler la recherche.

Et pourtant, il ne l'ont peut-être pas été autant qu'on était en droit de le penser : on attendait que tant de travaux divers et parfois contradictoires aboutissent à un nouvel état de notre savoir dans ce domaine précis de la connaissance, qu'une nouvelle synthèse jaillisse de tant de recherches éparses, mais cette attente a été quelque peu déçue, certains travaux étant demeurés en suspens.

Dans cet article, l'auteur essaye précisément de suppléer un peu à cette lacune et de dresser un bilan, dans le but, notamment, de mettre à la disposition des étudiants en phonétique et de tous ceux qui, de près ou de loin, s'intéressent à l'acte de la parole, une synthèse claire et aisément abordable, même par le non spécialiste.

الخلاصة

الى اين وصلت البحوث في فيزيولوجية التصويت الخنجري ؟

لقد حظيت الدراسات العلمية في فيزيولوجية التصويت بمزيد من النشاط بعد سنة 1950 - وكان العلماء ممن اشتهر شهرة عظيمة قد اهتموا بها اهتماما كبيرا في القرنين السابقين - ونعني بذلك السنة التي قدمها الى السربون الفقيه راوول هوسون (واسمها : **دراسة الظواهر الفيزيولوجية والصوتية الاساسية في الصوت الرنم** ، نوقشت في كلية الآداب من جامعة باريس يوم 17 من شهر يونيه 1950) .

ومنذ ذلك الحين تعارضت نظريتان في موضوع التصويت : النظرية التقليدية والنظرية الجديدة المسماة بالـ « هودينامية » (المعتمدة على حركة الهواء) و « التمفط العضلي » والنظرية الجديدة المسماة بالـ « الزمنة العصبية » . وصار لكل واحدة من هاتين المحاولتين الراميتين الى تفسير الحركة الاهتزازية للاوتار الصوتية أنصار ومخالفون واشتدت الخصومة فيما بينهم حتى بلغت الشيء البعيد في بعض المناسبات . الا أن هذا الخلاف وهذا التبادل الفكري قد أفاد العلوم الصوتية بما وجد فيه الباحثون من فرصة في مضاعفة اجتهادهم العلمي .

ورغم ذلك فاننا لم نحصل بعد على ما كنا نرجوه من هذا الاجتهاد : فقد كنا نتوقع من كل هذه الاعمال المختلفة والمتناقضة احيانا أن تفضي بنا الى وضع علمي جديد في هذا الميدان الدقيق ، أو أن يوجد من يركب ويجمل كل هذه البحوث المتناثرة الا أنه لم يحصل شيء من هذا اذ ما تزال بعض هذه المبادئ متوقفة . وقد حاول صاحب هذه المقالة أن يسد شيئا ما هذا الفراغ فحاول أن يحصي نتائج هذا البحث وذلك ليتمكن الطلبة في العلوم الصوتية بصفة خاصة وكل من يهتم بظاهرة الكلام من الاطلاع عليها بجعله في متناول ايديهم مجملا واضحا سهلا مقربا الى افهامهم وحتى الى افهام الذين لم يمارسوا هذا النوع من البحث .

SUMMARY

How much has been achieved in the field of phonatory physiology?

The studies about phonation physiology, very widely developed during the last two centuries by scientists who have become famous, have blossomed anew after 1950 as soon as Raoul Husson sustained his Doctor thesis (Etude des phénomènes physiologiques et acoustiques fondamentaux de la voie chantée, thèse - Fac. Sc. - Paris, 17 juin 1950).

From that moment, a contradiction grew between the traditional theory, known as « aerodynamical and myo-elastic » and the new theory known as « neuro-chronaxic ». Each of these explanatory systems gathered favourers and detractors, to such an extent that, in some circumstances, they roused quite passionate discussions.

Such idealistic struggle and exchange of ideas were to be profitable to phonetic sciences, inasmuch as they considerably contributed to encourage research.

However, not so much profit was achieved as was expected : it had been hoped that such a great deal of different and sometimes contradictory work would lead a new state of our knowledge in that precise field, that new synthesis would spring out of so considerable and diverse research, but we have been disappointed by that expectation as some work has been left unachieved.

In this paper, the author tries to fulfil somehow that gap, and to make an account, with the aim to offer the students in phonetics as well as everyone more or less interested in speech, a clear synthesis which even an unspecialized reader might approach.

**APERÇU CRITIQUE
DE LA THEORIE NEURO-CHRONAXIQUE
ET
DE SES PRINCIPALES IMPLICATIONS**

A. — STRUCTURE HISTOLOGIQUE DU MUSCLE VOCAL.

THESES...

=> que des fibres musculaires (aryvocales et thyroévocales) viennent s'insérer sur le bord libre des cordes vocales : cf.

GOERTLER (Kurt) :

Die Anordnung, Histologie und Histogenese der quergestreiften Muskulatur im menschlichen Stimmband, in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*. 115, 1950, pp. 352-401.

BEHRINGER (S.) :

Die Anordnung der Muskulatur in der menschlichen Stimmlippe und im Gebiet des Conus elasticus, in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*, 118, 1955, pp. 324-342.

ANTITHESES...

=> que le ligament vocal est libre de toute insertion : cf.

BEHRENDENES :

Neuere Ergebnisse über Bewegungstörungen des Kehlkopfes, in *Archiven für Oren, Nasen und Kehlkopfeilkunde*, 169, 1956, pp. 1-172.

VAN DEN BERG et MOLL :

Zur Anatomie des menschlichen Muskulus vocalis in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*, 118, 1955, pp. 465-470.

TRUFFERT :

Muscles du Larynx in *Larynx et Phonation* Paris, P.U.F., 1957, pp. 3-20.

=> qu'on peut avoir l'impression que des fibres musculaires viennent s'insérer sur le bord libre des cordes vocales.

Mais que c'est là une fausse impression car il s'agit en réalité de fibres élastiques du ligament vocal qui irradient dans le muscle vocal : cf.

RUEDI (L.) :

Some Observations on the Histology and Function of the larynx, in *Journal of Laryngology and Otology*, 73, 1959, pp. 1-20.

B. — EMBRYOLOGIE

THESES...

=> que la musculature laryngée tire son origine de l'ébauche du myocarde (ce qui permettrait de comprendre son infatigabilité) : cf.

SEITER (Gertrud) :

Embryologie comparée des cordes vocales, in *Revue Laryng. Portmann suppl.*, mai 1956, pp. 408-413.

C. — INNERVATION DES CORDES VOCALES

=> que l'innervation du muscle vocal est extrêmement dense (et que cette innervation permet de comprendre les performances dont il est capable) : cf.

RUDOLPH (Gérard) :

Multiple Innervation von Muskelfasern im Musculus Vocalis des Menschen *Experientia* 16, 1960, p. 551.

D. — TISSU MUSCULAIRE DES CORDES VOCALES

=> que le muscle vocal comporte des zones caractérisées par une quantité énorme de mitochondries et qu'il rappelle en ceci la musculature phasique des ailes des oiseaux et des insectes : cf.

MANNI (Ermanno) :

Sur la distribution des sarcosomes et des mitochondries dans le muscle vocal humain, in *Rev. Laryng.*, juillet 1960, pp. 468-472.

E. — ANATOMO HISTOLOGIE

=> que le récurrent gauche est plus long que le récurrent droit, mais que les influx moteurs n'arrivent pas pour autant en retard sur la corde vocale gauche : les axones gauches ont un calibre qui surpasse celui des axones droits et la simultanéité d'arrivée des influx récurrentiels est rétablie de ce fait : cf.

KRMPOTIĆ (Jelena) :

Données anatomiques et histologiques relatives à la stimulation

récurrentielle droite et gauche pendant la phonation et données anatomiques sur la longueur des voies motrices bulbo-effectrices relatives à la phonation, in *Rev. Laryng. Portmann suppl.*, juillet 1957, pp. 533-546.

F. — NEURO-PHYSIOLOGIE

THESES...

=> que « les traces offertes par la voix et l'activité électrique du récurrent sont homorythmiques à chaque instant » et qu'en conséquence le nombre de salves de potentiels d'action dans les muscles vocaux correspond exactement à la fréquence fondamentale : cf.

MOULONGUET (André) :

Enregistrement simultané, sur l'homme et in situ, des potentiels d'actions récurrentiels et de la voix au cours d'une opération de laryngectomie totale.

Rev. Laryng. Portmann, suppl., février 1954, pp. 110-127.

— Démonstration chez l'homme de l'existence dans le nerf récurrent de potentiels d'actions moteurs synchrones avec les vibrations des cordes vocales.

Bull. Acad. Nat. réid. 137, 1953, pp. 475-482.

— Notions nouvelles sur la physiologie laryngée in *Rev. du praticien* VII, 21-7-1957, pp. 2247-2351.

ANTITHESES...

=> qu'il est vrai que les nerfs récurrents sont parcourus d'impulsions bioélectriques homorythmiques des vibrations des cordes vocales. Mais que ces potentiels d'action ne sont pas d'origine cérébrale mais réflexe. (« Nervöse Rückoppelung ») : cf.

LULLIES H. :

Physiologie der Stimme und Sprache in *Gehör, Stimme, Sprache*, Berlin, Springer-Verlag, 1953, pp. 163-293.

=> qu'un pareil phénomène a d'ailleurs déjà été mis en évidence par :

PREISENDORFER :

Versuche über die Anpassung der willkürlichen Innervation an die Bewegung, *Zeitschrift für Biologie*, 70, 1920, pp. 505-514.

=> la preuve, c'est que ces impulsions peuvent encore être détectées lorsque le récurrent est sectionné et que la section du nerf n'empêche pas les chiens d'aboyer : cf.

LINDEMANN :

Studies of Action Currents in Laryngeal Nerves, in *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 27, 1930 p. 479.

=> ni les hommes de parler, puisque « les malades affectés de paralysie d'abduction par section bilatérale des nerfs récurrents possèdent une voix normale et un mouvement vibratoire aussi normal » : cf.

PERELLO

Le rôle de la muqueuse dans la fourniture de son vocal, in *Phonétique et phonation*, Paris, Masson & Cie, 1966, pp. 83-89.

G. — ELECTROPHYSIOLOGIE

THESES...

=> Etant donné que deux influx successifs qui se propagent dans un axone récurrentiel sont nécessairement séparés (phase réfractaire pratique), la conduction récurrentielle doit être non seulement *monophasée* (stimulations allant jusqu'à 200 cps) mais encore biphasée (800 cps), triphasée (1200 cps) et même quadriphasée pour les très hautes fréquences.

Une conduction biphasée a été mise en évidence sur le chien par : CORABEUF, Ed., SAUMONT, R., GARGOUIL, Y.M. : cf.

Etude comparée de l'activité électrique du récurrent du chien et de celle d'autres nerfs de mammifères, in *Rev. Laryng. Portmann*, suppl., mai 1956, pp. 445-454.

=> que pareille théorie a déjà permis d'ailleurs à des spécialistes de l'audition de rendre compte de la représentation de la fréquence du son dans les voies nerveuses auditives : cf.

WEVER :

Theory of hearing - New York, 1949, Wiley ed. et

V. BONNET :

Audition, in *Physiologie*, Ch. Kayser, éd. méd., Flammarion, 1963, t. II.

=> que les cordes vocales peuvent vibrer en l'absence de tout courant d'air : cf.

LAGET (Paul) :

Reproduction expérimentale de la vibration des cordes vocales en l'absence de tout courant d'air, par stimulation électrique d'un

récurrent de chien, avec observation stroboscopique de la réponse laryngée, in *Rev. Laryng., Portmann*, suppl., fév. 1953, pp. 132-142.

et ROBIN (J. L.) :

L'électromyographie des cordes vocales du chien, in *Rev. Laryng. Portmann*, suppl., mai 1956, pp. 428-433.

=> et que la hauteur du son émis par le larynx est entièrement indépendante de la valeur de la pression sous-glottique ; cf.

PIQUET (J.) et DECROIX (G.) :

Etude expérimentale peropératoire du rôle de la pression sous-glottique sur la vibration des cordes vocales, *C.R. Acad. Sci. - Paris*, 242, 1956.

ANTITHESES...

=> qu'à s'en tenir à un éclairage intermittent ajusté comme il se doit à une fréquence voisine de celle du stimulus, on peut parfaitement avoir l'impression d'un effet stroboscopique et y voir la preuve d'une homorythmie entre la commande nerveuse et la réponse contractile mais que *ce n'est qu'une illusion*.

— qu'on décèle parfois (jusque vers 300-400 cps) des indices d'une activité homorythmique mais que le *biphasage ou le polyphasage n'est pas fatal*.

— et que les muscles vocaux ont un *comportement banal*, qu'ils ne montrent pas de *tendance exceptionnelle à polyphaser*.

« *que l'appui que l'expérience de Laget semblait donner à la théorie neurogène et dont on a fait si grand cas, apparaît comme parfaitement illusoire....etc* » : cf.

FESSARD (A.), et VALLANCIEN (B.) :

Observations et enregistrements électromyographiques au cours de l'activité phonatoire provoquée ou spontanée chez le chien, in *Larynx et Phonation*, Paris, 1957, P.U.F., pp. 93-111.

=> que les cordes vocales ne peuvent vibrer que lorsqu'un courant d'air transite à travers la glotte : cf.

RUBIN (H.) :

The Neurochronaxie Theory of voice Production : A Refutation, in *Archives of Otolaryngology*, 71, 1960, pp. 913-920.

=> que la hauteur du son dépend de la pression d'air, du débit, et des forces latérales : cf.

VAN DEN BERG :

Physiologie et physique de la vibration des cordes vocales, in *Larynx et Phonation*, Paris, 1957, PUF., pp. 51-69.

et Mechanisms of the larynx and the laryngeal vibrations, in *Manual of Phonetics*, B. Malmberg Ed., North-Holland Publishing, Amsterdam, 1968, pp. 278-308.

H. — ELECTROMYOGRAPHIE

THESES...

=> que les enregistrements électromyographiques confirment ces données ; qu'ils contiennent deux phénomènes superposés :

— l'activité tonique de base de la corde vocale.

— Une activité électrique rythmique exactement à la fréquence du son émis :

cf. PORTMANN (G.), HUMBERT (R.), ROBIN (JL), LAGET (P.), HUSSON (R.) Etude électromyographique des cordes vocales chez l'homme, *C.R. Soc. Biol.* 149, 1955, pp. 296-300.

PORTMANN (G.), HUMBERT (R.), ROBIN (JL), LAGET (P.), VANNIER (J.), L'électromyographie des cordes vocales de l'homme pendant la phonation, *C.R. Soc. Biologie*, 149, 1955 pp. 1783-1787.

HUMBERT et LAGET :

Données récentes sur l'électromyographie des cordes vocales de l'homme, in *Larynx et Phonation*, Paris, 1957, P.U.F., pp. 81-91.

ANTITHESES...

=> qu'il est vrai qu'il existe deux types d'activité électrique :

— la première est constituée par des potentiels d'unité motrices ;

— la deuxième ne ressemble en rien à une activité musculaire ;

il s'agit d'une activité sinusoïdale homorythmique du son émis, mais il faut y voir

— un effet microphonique que l'on peut reproduire aussi en plaçant une aiguille de BRONCK dans les polypes œdémateux du nez et en demandant au sujet de chanter bouche fermée : « Cette forme d'activité électrique a paru fournir un substratum électrophysiologique à la théorie de HUSSON » cf.

ISCH (François) :

Electromyographie, Ed. Doin, Paris 1963, pp. 236-241.

=> qu'il s'agit bien d'un effet microphonique passif et que cet effet pourra même être plus grand que l'effet résultant des contractions actives des fibrilles musculaires du muscle vocal, cf.

VAN DEN BERG (J.) :

Physiologie et physique de la vibration des cordes vocales, in *Larynx et phonation*, Paris, 1957, P.U.F., pp. 51-69.

= > « Sur la nature des potentiels recueillis pendant la phonation, je dois dire que mon opinion reste réservée... je sais trop combien il est fréquent de recueillir des artefacts d'origine mécanique...

Je ne voudrais pas donner l'impression que je refuse de croire à l'origine véritablement électromyographique de ces tracés... je regrette simplement que les réalisateurs de cette délicate expérimentation n'aient pas pu enregistrer les phénomènes au moment du départ de l'émission sonore et en même temps qu'une inscription microphonique ». cf.

FESSARD et VAN DEN BERG :

Discussion de la communication de M.P. LAGET, in *Larynx et phonation*, Paris 1957, P.U.F., pp. 89-90.

= > que pareille activité bioélectrique a été relevée aussi dans l'oreille interne, cf.

SPOOR (A.), et VAN DISHOEK :

Electromyography of the Human Vocal Cords and the Theory of HUSSON, in *Practica oto-rhino-laryngologica*, 20, 1958, pp. 353-360.

I. — FAITS CLINIQUES ET PATHOLOGIQUES

THESES...

= > que certains faits cliniques et pathologiques semblent plaider en faveur de la thèse de HUSSON :

On a pu observer l'existence de comportements glottiques du type phonatoire en dehors de toute émission sonore : cf.

GALLI (L. A.), et DEQUIROS (J. B.) :

Quelques observations récentes sur la vibration des cordes vocales, Buenos-Aires, 1957 - cf. aussi :

SABOURAUD (O.), et GREMY (F.) :

Sur la possibilité de mouvements des cordes vocales sans émission sonore, in *Comptes rendus de la Société de Biologie*, 152, 1958, pp. 953-956.

— On a pu observer de même un comportement glottique du type vibratoire entre deux hésitations vocaliques d'un bège : cf. les travaux de GREMY, ROGE et Mlle STRIGLIONI sur les bègues et les dysarthriques.

— Qu'on a pu mettre en évidence des vibrations glottales pendant le chant intérieur et que « la seule pensée d'une réalisation motrice s'accompagne souvent d'émissions d'influx » : cf.

YVES Chesni :

Vitesse comparée de la formulation à voix haute et de la pensée verbale chez des sujets normaux et dans quelques cas pathologiques, *Rev. Laryng.*, 1958, pp. 1 410-1 444.

— Comment expliquer, dans la théorie myoélastique le fait que sur des enregistrements de débuts de mots les fréquences vocaliques initiales n'atteignent pas de suite la fréquence d'intonation requise, mais qu'elles commencent presque toujours par un groupe de périodes de basse fréquence, laquelle ne croît pas de façon continue, mais se double, se triple, etc pour se fondre finalement dans la fréquence moyenne (Effet KAISER qui peut être observé également à la fin d'une séquence) : cf.

HUSSON (Raoul) :

Interprétation neuro-physiologique de l'effet KAISER, in *Physiologie de la Phonation*, Paris, Masson, 1962, p. 219.

=> « Ces observations suggèrent très fortement la possibilité d'une genèse nerveuse des mouvements vibratoires des cordes vocales » : cf.

HUSSON (Raoul) :

Op. cit., p. 118.

ANTITHESES...

=> que nombre de faits cliniques et pathologiques sont en contradiction avec ces théories et les démentent :

— « Les analyses des voix pathologiques montrent parfois la présence de sons *bitonals* et même *pluritonals*. Comment une telle activité peut-elle être neurogène ? » : cf.

LAFONT (J. Cl.) :

Eléments de Message et Phonétique, *Bulletin d'Audiophonologie*, n° 2, 2^e année 1972. Association franc-comtoise d'Audiophonologie, Faculté de Médecine et de Pharmacie de Besançon, pp. 54-55.

— « Dans les dysphonies lorsqu'on faradise la musculature laryngée, thyroaryténoïdien compris, on ne change pas de façon anormale l'émission sonore bien au contraire, on obtient souvent une meilleure activité laryngée. Le son produit est plus net, mieux timbré, le son laryngé bien individualisé. Et pourtant les muscles des cordes vocales sont totalement incapables de se contracter au rythme de l'émission sonore.

Il ne peut y avoir de transmission fréquentielle neuro-musculaire. Le son commence au bord des cordes vocales, comme il s'arrête à l'organe de Corti ».

PERELLO (J.) :

Le rôle de la muqueuse dans la fourniture du son vocal, in *Phonétique et phonation*, (A.) MOLES et (B.) VALLANCIEN, Paris Masson & C^{ie}, 1966. pp. 83-89.

=> « Les principes de la théorie myoélastique sont donc seuls valables » cf.

LAFONT (J. Cl.) :

Op. cit., pp. 57-58.

J. — GENERATEURS DE SONS INHABITUELS
POUR LESQUELS LA THEORIE NEURO-CHRONAXIQUE
NE SAURAIT ETRE INVOQUEE

ANTITHESES

=> «... La nécessité d'une commande nerveuse coup pour coup de la fréquence n'apparaît guère... pas plus qu'on n'y songerait pour expliquer le mécanisme de la production des sons par les lèvres » : cf.

FESSARD et VALLANCIEN, op. cit.

GOTTSTEIN (G.) :

Pseudostimme nach Totalexstirpation des Larynx, *Archiv, für klinische Chirurgie*, 62 1900 pp. 126-146.

SCRIPTURE (E.) :

Speech without Using the Larynx, in *Journal of Physiology*, 50, 1956, pp. 397-403.

CLASS (A.) :

Phonetics of the Silbo Gomero, *Archivum Linguisticum*, 1957, 9, pp. 44-61.

BUSNEL (R. G.), MOLES (A.), VALLANCIEN (B.) :

Sur l'aspect phonétique d'une langue sifflée des Pyrénées françaises, in *Proceedings of the 4th. International Congress of Phonetic Sciences*, The Hague, Mouton, 1962, pp. 533-546.

VAN DEN BERG :

Etude fonctionnelle du sphincter œsophagien en vue de la voix œsophagienne, *Ann. O.R.L.*, 1957, t. 74, n° 6, pp. 411-413.

VALLANCIEN (B.), DINVILLE (E.), CHERIGIE (F.), BESANÇON (F.) HERBERT (F.) :

Contribution à l'étude du mécanisme de la voix œsophagienne, in *Médecine et Hygiène*, 19, 1961, pp. 396-397.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Structure du générateur vocal :

- 1) GRAMMONT M., — *Traité de Phonétique expérimentale*, Paris, Delagrave, 1963, 7^e édition, pp. 16-23.
- 2) PERLMUTER et WALIGRA., — *Cahiers d'anatomie (Tête et Cou)*, Paris, Masson et Cie, 1965, coll. 7/8 K-O.
- 3) PERNKOPF E., — *Topographische Anatomie des Menschen*, Urban und Schwarzenberg, Wien-Innsbrück, 1952, Band III.
- 4) ROUSSELOT Abbé P., — *Principes de Phonétique expérimentale*, — Paris, H. Didier, 1923, T.I. chap. V, (Organes de la parole) pp. 233-314.
- 5) STRAKA G., — Respiration et phonation, in *Bulletin de la Faculté des Lettres de l'Université de Strasbourg*, 1957. et *Album Phonétique*, Les Presses de l'Université Laval, Québec, 1965, planche n° 4.
- 6) TARNEAUD J., — *Traité pratique de phonologie et de phoniatrie*, Librairie Maloine S.A. Paris, 1961.

Physiologie de la phonation :

- 7) HOLLIEH H., — The Relationship of Vocal Fold Thickness to Absolute Fundamental Frequency of Phonation, in *Proceedings of the 4 th. International Congress of Phonetic Sciences*. Mouton et Cie — The Hague, 1962, pp. 173-178.
- 8) HUSSON R., — *Physiologie de la phonation*, Paris, 1962, Masson et C^o Chap. I (Etude descriptive des comportements phonatoires glottiques) pp. 22-78.
- 9) HUSSON R., — Les mécanismes physiques de la phonation, *Acta Technica CSAV*, n° 5, 1965.
- 10) KIRIKAE I., — über den Bewegungsvorgang an den Stimmlippen und die Öffnungs und Verschlusszeit der Stimmritze während der Phonation, *Japan. Zeitschrift für O.R.L.*, Tokyo, XXXIX, 1943, pp. 236-262.
- 11) LAFON J. Cl. — Phonation, in *Physiologie* de Charles KAYSER, Paris, Ed. Médicales Flammarion, 1963, pp. 877-900. et *Message et phonétique. Introduction à l'étude acoustique et physiologique du phonème*, Paris, 1961, P.U.F.
- 12) MOORE P., — Observation sur la physiologie de la tonalité de la voix, in *Larynx et Phonation*, Paris, 1957, P.U.F., pp. 75-79.
- 13) NEGUS. — *The mechanism of the larynx*, Heineman, London, 1929.
- 14) PERELLO J., — Le rôle de la muqueuses dans la fourniture du son vocal, in *Phonétique et Phonation*, A. Moles et B. Vallancien, Paris, Masson & Cie, 1966.
- 15) ROUSSELOT Abbé P., — *Principes de phonétique expérimentale*, Paris, Didier, 1923, tome II pp. 720-739.
- 16) SMITH S., — Vertikale Komponenten bei der Funktion der Stimmlippen, in *Phonetica*, 11, 243, 1964.

- 17) SONESSON B., — The functional anatomy of the speech organs, in *Manual of Phonetics*, éd. B. Malmberg, North-Holland Publishing C^o, Amsterdam, 1968, pp. 45-75.
- 18) TIMCKE R., — Nouvelles mesures de la durée de la phase d'ouverture de la glotte pendant la phonation chez l'homme et in vivo, effectuées avec un stroboscope synchronisé, in *Revue Laryng. Portmann*, suppl. juillet 1957, pp. 619-624.

Théories de la Phonation :

a) *Théorie myo-élastique*

- 19) FLANAGAN J.L. — *Speech Analysis, Synthesis and Perception*, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New-York, 1965, pp. 9-14.
- 20) LAFON J. Cl. — Eléments de « Message et Phonétique », in *Bulletin d'Audio-phonologie*, n^o 2, 1972, pp. 49-58.
- 21) LIBERMAN P., — *Intonation, Perception, and Language*, Research Monograph. n^o 38, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1966, pp. 5-37.
- 22) SMITH S. — Théorie Aérodynamique de la vibration des cordes vocales, (Observations sur un larynx artificiel, avec démonstration filmée), in *Larynx et Phonation*, Paris, 1957, P.U.F., pp. 71-73.
- 23) VAN DEN BERG J. W. — Mechanism of the larynx and the laryngeal vibrations, in *Manual of Phonetics*, B. Malmberg Ed., North-Holland Publishing C^o, Amsterdam, 1968, pp. 278-308.
Physiologie et physique de la vibration des cordes vocales, in *Larynx et Phonation*, Paris, 1957, P.U.F., pp. 52-69.
Sur les théories myoélastique et neurochronaxique de la phonation, *Revue de laryngologie*, 75, 494, 1954.
- 24) ZINKIN N. L. — *Mechanisms of Speech*, Mouton, The Hague - Paris, 1968, pp. 340-414.

b) *Théorie neuro-chronaxique*

- 25) HUSSON R. — *Physiologie de la phonation*, Paris, Masson & C^{ie}, 1962.
Les mécanismes physiques de la phonation, in *Acta Technica*, C. S. A. V., n^o 5, 1065.
Etude des phénomènes physiologiques et acoustiques fondamentaux de la voix chantée, Thèse Fac. Sc. - Paris, 17 juin 1950.. *Revue Scient.*, 88, 1950, pp. 67-112. 131-146, 217-235.
La voix chantée, Gauthier-Villars - Paris, 1960.
Comment vibrent nos cordes vocales, in *La Nature*, n^o 3 261, janv. 1957.
Comment se classent les voix humaines, in *La Nature*, n^o 3 262, fév. 1957.
Comment se forment les voyelles, in *La Nature*, n^o 3 267, 1957.
- 26) RUBIN H. — The Neurochronaxie Theory of voice Production : A Refutation, in *Archives of Otolaryngology*, 71, 1960, pp. 913-920.

Musculature du larynx et structure histologique du muscle vocal :

- 27) BERENDES J. — Neuere Ergebnisse über Bewegungsstörungen des Kehlkopfes, in *Archiven für Obren, Nasen und Kehlkopfheilkunde*, 169, 1956, pp. 1-172.
- 28) BEHRINGER S. — Die Anordnung des Muskulatur in des menschlichen Stimmlippe und im Gebiet des Conus elasticus, in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*, 118, 1955, pp. 324-342.
- 29) GOERTLER K., — Die Anordnung, Histologie und Histogenese der quergestreiften Muskulatur im menschlichen Stimmband, in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*, 115, 1950, pp. 352-401.
- 30) HUSSON R. — *Physiologie de la phonation*, Paris, Masson & C^{ie}, 1962, pp. 96-98.

- 31) ISSHIKI N. — Regulatory mechanisms of voice intensity variation, *Journal of Speech and Hearing Res.*, 7, 17, 1964.
- 32) RUEDI L., — Some Observations on the Histology and Function of the Larynx, in *Journal of Laryngology and Otology*, 73, 1959, pp. 1-20.
- 33) SONESSON B., — The functional anatomy of the Speech organs, in *Manual of Phonetics*, éd. Bertil Malmberg, North-Holland Publishing C°, Amsterdam, 1958, pp. 45-75.
- 34) TRUFFERT P., — Muscles du larynx, in *Larynx et Phonation*, Paris, P.U.F., 1957, pp. 3-20.
- 35) VAN DEN BERG J. et MOLL J. — Zur Anatomie des menschlichen Musculus vocalis, in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*, 118, 1955, pp. 465-470.
- 36) WUSTROW F., — Bau und Funktion des menschlichen Muskulus vocalis, in *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte*, 116, 506, 1952.

Innervation des cordes vocales :

- 37) PERLMUTER et WALIGRA. — *Cabiers d'Anatomie* (Tête et Cou), Paris, Masson et Cie, 1965, coll. 7/8.
- 38) RETHI A., — L'Innervation du larynx, in *Larynx et Phonation*, Paris, P.U.F., 1957, pp. 21-47.
- 39) RUDOLPH G., — Multiple Innervation von Muskelfasern im Muskulus Vocalis des Menschen, *Experientia*, 16, 1960, p. 551.

Embryologie :

- 40) SEITER G., — Embryologie comparée des cordes vocales in *Revue Laryng. Portmann*, suppl. mai 1956, pp. 408-413.

Tissu musculaire des cordes vocales :

- 41) MANNI E., — Sur la distribution des sarcosomes et des mitochondries dans le muscle vocal humain, in *Rev. Laryng., Portmann*, juillet 1960, pp. 468-472.

Anatomo-histologie :

- 42) KRMPOTIC J., — Données anatomiques et histologiques relatives à la stimulation récurrentielle droite et gauche pendant la phonation et données anatomiques sur la longueur des voies motrices bulbo-effectrices relatives à la phonation, in *Revue Laryng. Portmann*, suppl. juillet 1957, pp. 533-546.

Electrophysiologie — Neurophysiologie — Electromyographie :

- 43) ARSLAN M. et MOLINARI G., — L'activité du nerf récurrent. Etude électrophysiologique, in *Phonétique et Phonation* (A. Moles et B. Vallancien), Masson et Cie, Paris 1966, pp. 69-82.
- 44) CORABOEUF Ed., SAUMONT R., GARGOUIL Y.M., — Etude comparée de l'activité électrique du récurrent du chien et de celle d'autres nerfs de mammifères, in *Revue Laryng. Portmann*, suppl. mai 1956, pp. 445-454.
- 45) FESSARD A. et VALLANCIEN B. — Observations et enregistrements électromyographiques au cours de l'activité phonatoire provoquée ou spontanée chez le chien, in *Larynx et Phonation*, Paris, 1957, P.U.F. pp. 93-111.
- 46) FESSARD et VAN DEN BERG. — Discussion de la communication de M.P. LAGET, in *Larynx et phonation*, Paris, 1957, P.U.F. pp. 89-90.
- 47) HUMBERT et LAGET. — Données récentes sur l'électromyographie des cordes vocales de l'homme, in *Larynx et Phonation*, Paris, 1957, P.U.F. pp. 81-91.
- 48) ISCH F. — *Electromyographie* Ed. Doin, Paris, 1963, pp. 236-241.

- 49) LAGET P. — Reproduction expérimentale de la vibration des cordes vocales en l'absence de tout courant d'air, par stimulation électrique d'un récurrent de chien, avec observation stroboscopique de la réponse laryngée, in *Revue Laryng. Portmann*, suppl. fév. 1953, pp. 132-142.
- 50) ROBIN J.L. — L'électromyographie des cordes vocales du chien in *Revue Laryng. Portmann*, suppl. mai, 1956, pp. 428-433.
- 51) LINDEMANN. — Studies of Action Currents in Laryngeal Nerves, in *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 27, 1930, p. 479.
- 52) LULLIES H. — Physiologie der Stimme und Sprache in *Gehör, Stimme, Sprache*, Berlin, Springer-Verlag, 1953, pp. 163-293.
- 53) MOULONGUET A. — Enregistrement simultané, sur l'homme et in situ, des potentiels d'actions récurrentiels et de la voix au cours d'une opération de laryngectomie totale. *Revue Laryng. Portmann*, suppl., février 1954, pp. 110-127.
Démonstration chez l'homme de l'existence dans le nerf récurrent de potentiels d'actions moteurs synchrones avec les vibrations des cordes vocales. *Bull. Acad. Nat. Méd.* 137, 1953, pp. 475-482.
Notions nouvelles sur la physiologie laryngée in *Revue du praticien* VII, 21-7-1957, pp. 2247-2351.
- 54) PIQUET J. et DECROIX G. — Etude expérimentale peropératoire du rôle de la pression sous-glottique sur la vibration des cordes vocales. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 242, 1956.
- 55) PORTMANN G., HUMBERT R., ROBIN J.L., LAGET P., HUSSON R., — Etude électromyographique des cordes vocales chez l'homme, *C.R. Soc. Biol.* 149, 1955, pp. 296-300.
- 56) PORTMANN G., HUMBERT R., ROBIN J.L., LAGET P., VANNIER J., — L'électromyographie des cordes vocales de l'homme pendant la phonation, *C.R. Soc. Biologie*, 149, 1955, pp. 1783-1787.
- 57) PREISENDORFER. — Versuche über die Anpassung der willkürlichen Innervation an die Bewegung, in *Zeitschrift für Biologie*, 70, 1920, pp. 505-514.
- 58) SPOOR A. et VAN DISHOEK. — Electromyography of the Human Vocal Cords and the Theory of HUSSON, in *Practica oto-rhino-laryngologica*, 20, 1958, pp. 353-360.
- 59) VAN DEN BERG J. — Physiologie et physique de la vibration des cordes vocales, in *Larynx et phonation*, Paris, 1957, P.U.F. pp. 51-69.
- 60) WEVER. — *Theory of hearing* New-York, 1949, Wiley ed. et V. BONNET : in *Physiologie*, Ch. KAYSER, éd. méd. Flammarion, 1963, t. II.

Faits cliniques et pathologiques :

- 61) CHESNI Y. — Vitesse comparée de la formulation à voix haute et de la pensée verbale chez des sujets normaux et dans quelques cas pathologiques, *Revue de Laryngologie*, 1958, pp. 1410-1444.
- 62) GALLI L.A. et DEQUIROS J.B. — *Quelques observations récentes sur la vibration des cordes vocales*, Buenos-Aires, 1957.
- 63) HUSSON R. — Interprétation neuro-physiologique de l'effet Kaiser, in *Physiologie de la Phonation*, Paris, Masson, 1962, p. 219.
- 64) LAFONT J. Cl. — Eléments de Message et Phonétique, *Bulletin d'Audiophonologie*, n° 2, 2^e année, 1972.
- 65) SABOURAUD O. et GREMY F. — Sur la possibilité de mouvement des cordes vocales sans émission sonore, in *Comptes rendus de la Société de Biologie*, 152, 1958, pp. 953-956.

« Voix singulières » :

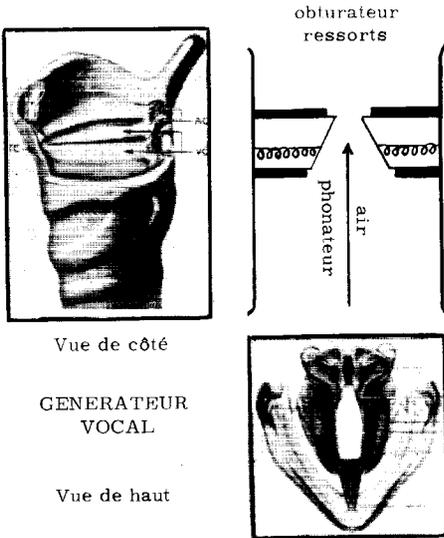
- 66) BUSNEL R.G., MOLES A., VALLANCIEN B. — Sur l'aspect phonétique d'une langue sifflée des Pyrénées françaises, in *Proceedings of the 4 th. International Congress of Phonetic Sciences*, The Hague, Mouton, 1962, pp. 533-546.
- 67) CLASS A. — Phonetics of the Silbo Gomero, *Archivum Linguisticum*, 1957, 9, pp. 44-61.
- 68) DAMSTE P.H. — *Oesophageal speech after laryngectomy*, Groningen, 1958.
- 69) GOTTSTEIN G. — Pseudostimme nach Totalexstirpation des Larynx, *Archiv. für klinische Chirurgie*, 62, 1900, pp. 126-146.
- 70) SCRIPTURE E. — Speech without Using the Larynx, in *Journal of Physiology* 50, 1956, pp. 397-403.
- 71) VALLANCIEN B., DINVILLE E., CHERIGIE F., BESANÇON F., HERBERT F. — Contribution à l'étude du mécanisme de la voix œsophagienne in *Médecine et Hygiène*, 19, 1961, pp. 396-397.
- 72) VAN DEN BERG. — Etude fonctionnelle du sphincter œsophagienne, *Ann. O.R.L.*, 1957, t. 74, n° 6, pp. 411-413.

Jugements récents relatifs aux théories de la phonation :

- 73) LEBRUN Y. — *Anatomie et physiologie de l'appareil phonatoire*, éd. Labor, Bruxelles, Fernand Nathan, Paris, 1968. Collection Langues et Culture.
- 74) MALMBERG B. — *Les Nouvelles Tendances de la Linguistique* P.U.F., Paris, 1966, p. 158.
- 75) VALLANCIEN B. — Physiologie de la phonation. La Fonction Vocale. in *Phonétique et Pbonation* (A. Moles et B. Vallancien), Masson & Cie, 1966, p. 66.

THEORIES DE LA PHONATION

LA THEORIE MYO-ELASTIQUE : Schéma initial du mécanisme laryngé



Le mouvement phonatoire des cordes vocales serait comparable à celui que connaîtraient de petites masses munies de ressorts que le courant d'air écarterait sur son passage et qui reviendraient à leur position initiale dès que son action aurait cessé.
(d'après S.N. RZEVKIN, *Slux i rec.* Moscou-Leningrad ONTI, 1935 p. 240; schéma repris par N. L. ZINKIN dans trad. *Mechanismus of Speech*, Mouton 1968 p. 343)

(photographies d'après Farnsworth et Pernkopf)

LA THEORIE MYO-ELASTIQUE : Physiologie et Physique de la vibration des cordes vocales (revue et corrigée)

(compte tenu de l'effet BERNOUILLI)

Explications dans le texte

A) Schéma du larynx et des forces qui sont à prendre en considération

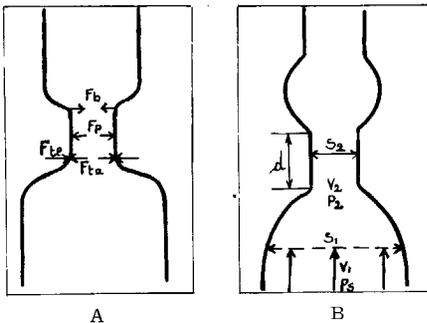
F_p : force exercée sur les cordes vocales par la surpression sous-glottique

F_b : effet Bernouilli

F_{ta} ; F_{te} : forces inhérentes à la tension des membranes

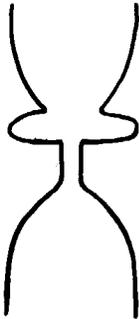
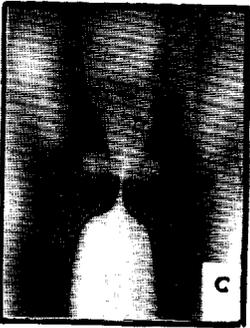
B) Illustration du mécanisme - très complexe en définitive - de la vibration des cordes vocales

(d'après Philip LIEBERMAN ; *Intonation, Perception and Language*, MIT N 38 1967 PP 15 et 16)



A

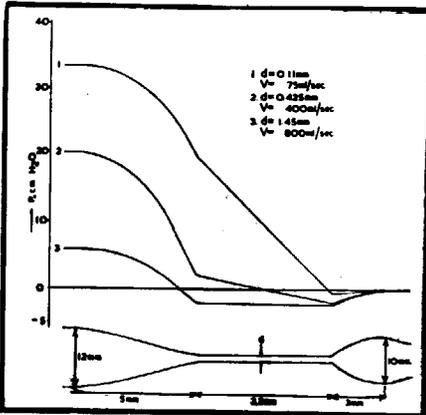
B



C) Illustration de l'effet BERNOULLI

La pression exercée par l'air phonateur contre les parois du générateur vocal est positive au-dessous de la glotte et devient négative dans la zone d'accolement des cordes vocales.

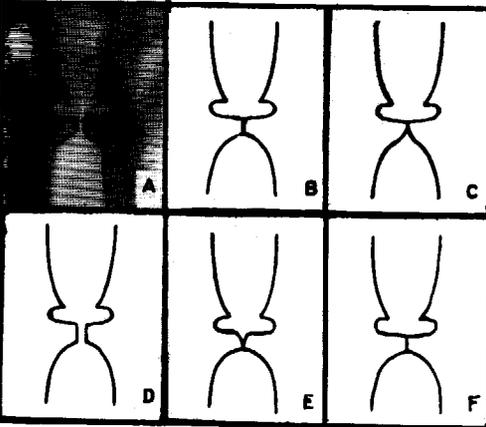
(d'après Jw. van den Berg ;
The larynx and laryngeal vibrations
in Manual of Phonetics , p 291
B. Malmberg/Editor



D) Le Graphique de la figure (d)

illustre d'une manière plus précise encore les variations de pression (évaluées en cm. H₂O) enregistrées le long d'un modèle de larynx normal et en fonction de l'ouverture glottique.

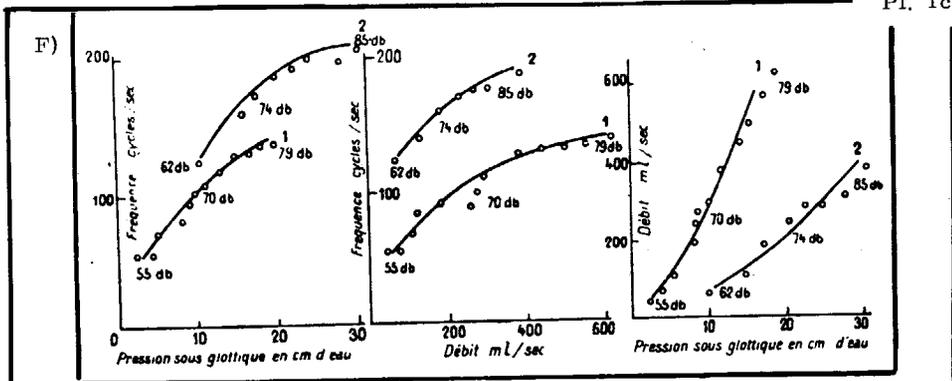
(d'après Jw. van den Berg ;
Larynx et Phonation p. 60)



E) Tomographies frontales prises pendant une période d'un larynx en phonation.

" Dans le registre de poitrine, quand la glotte est fermée pendant la partie d'un cycle, les vibrations se produisent du fait que la pression sous-glottique écarte les C.V., parce que cette pression augmente beaucoup quand la glotte est fermée. Les C.V. sont alors poussées obliquement vers le haut, de sorte que le mouvement possède une composante horizontale et verticale. Ainsi, elles obtiennent un certain écartement, puis se rapprochent, ce qui fait que la glotte se ferme à nouveau et que le cycle peut se répéter. "

Tomographies frontales d'un larynx en phonation.
(d'après Jw. van den Berg)



Courbes prises avec un larynx isolé: variations de la pression sous-glottique de la fréquence et du débit.

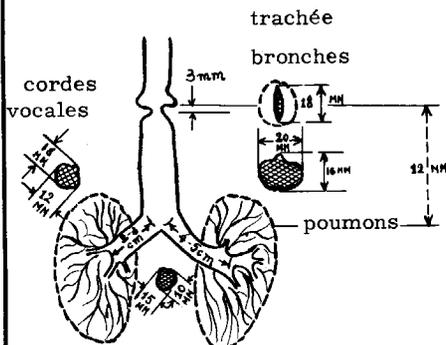
(deux forces latérales différentes appliquées aux cordes vocales)

- D'une façon générale, la forte tension latérale(2) entraîne un son plus aigu, une pression sous-glottique plus forte, un débit plus faible, une intensité sonore plus grande et inversement pour une faible tension. (1)
- La pression sous-glottique entraîne, en augmentant, une élévation de la hauteur du son émis, du débit et de l'intensité acoustique.
- L'augmentation du débit élève le son et son intensité.

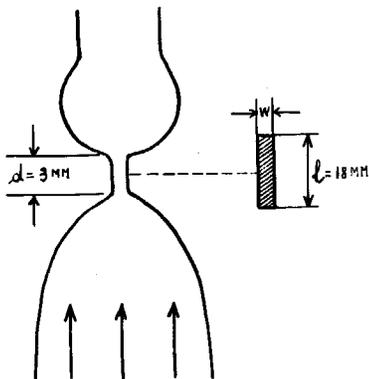
(d'après Van den Berg, 1959)

G) Les approximations de J. L. FLANAGAN: Schéma du fonctionnement phonatoire de la glotte assimilé à un écoulement permanent dans un orifice percé en paroi mince.

Représentation schématique de l'appareil phonatoire - cavités sous-glottiques



Représentation schématique du larynx

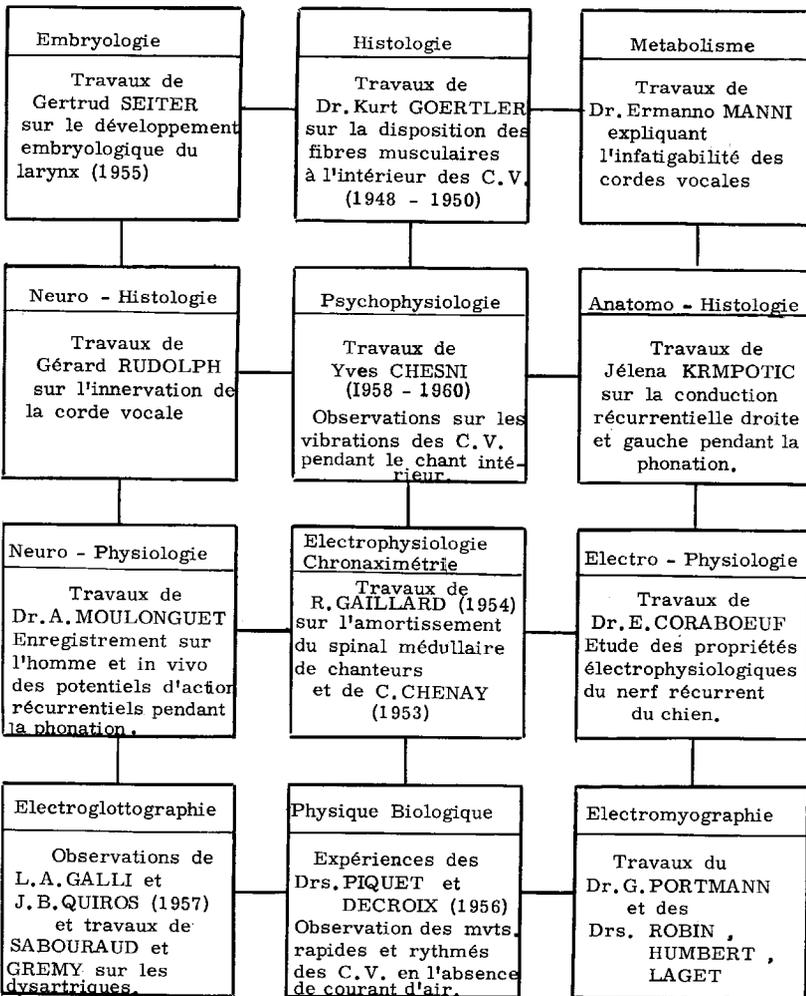


(D'après J. L. FLANAGAN ; Speech Analysis, Synthesis and Perception Springer Verlag , 1965 pp38-40)

LES THEORIES DE LA PHONATION
LA THEORIE NEURO - CHRONAXIQUE DE R. HUSSON

Pl. 2a

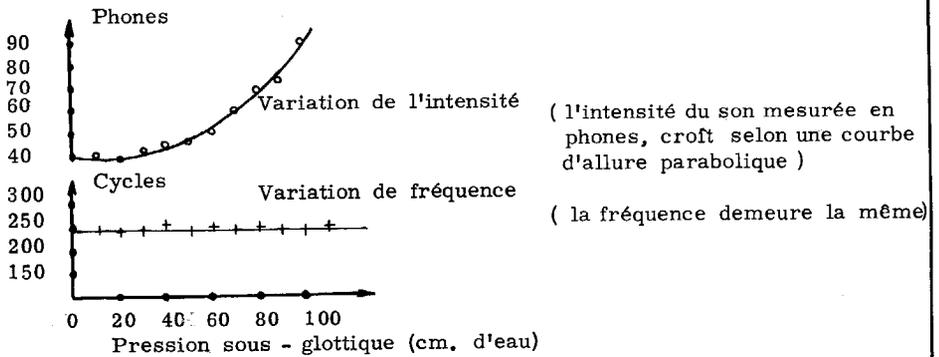
FONDEMENTS



FONDEMENTS DE LA THEORIE NEURO - CHRONAXIQUE

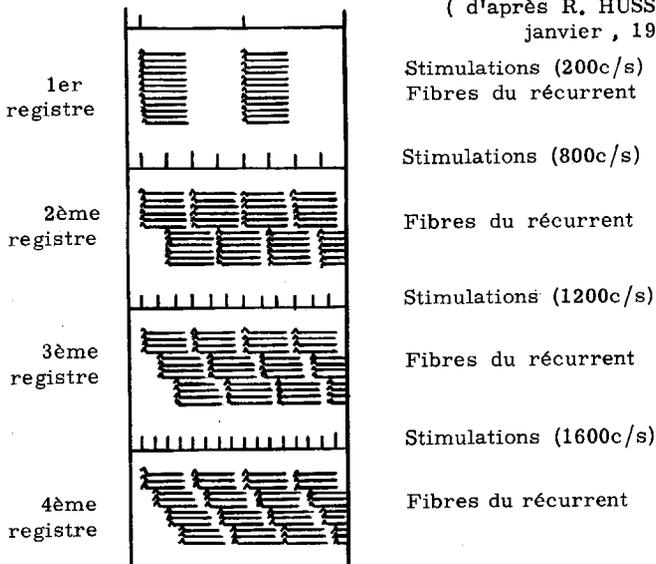
FONDEMENTS DE LA THEORIE NEURO - CHRONAXIQUE

FONDEMENTS DE LA THEORIE NEURO - CHRONAXIQUE (R. HUSSON)
(1950)



A) Variations de la fréquence et de l'intensité du son laryngien, en fonction de la pression sous - glottique , enregistrées dans les expériences de Piquet, Decroix , Libersa et Dujardin (Lille, 1956)

(d'après R. HUSSON : La Nature janvier , 1957)



B) Schéma des quatre types de conduction récurrentielle pendant la phonation, chacun caractérisant un registre de la voix .
 d'après R. HUSSON

Structure anatomo-histologique des thyro-aryténoïdiens internes chez l'homme
(d'après Kurt Goertler)



Coupe au travers de la corde vocale



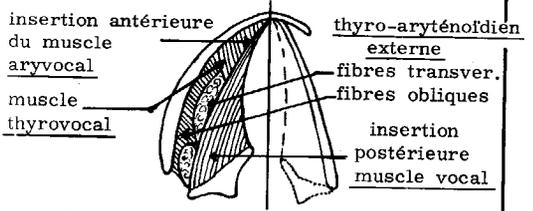
Coupe au travers de la corde vocale



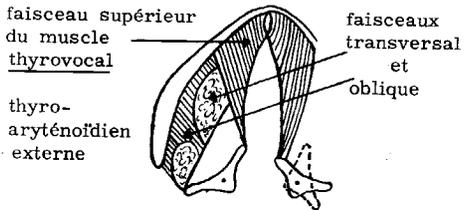
Coupe au travers de la corde vocale

Croquis d'après R. HUSSON

Physiologie de la Phonation, op. cit, p. 96

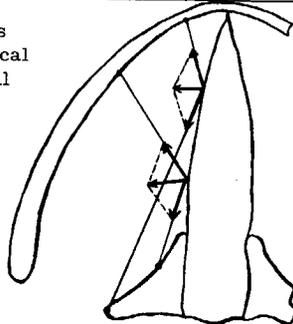


Coupe transversale de la corde vocale



Coupe transversale de la corde vocale

muscles thyrovocal aryvocal

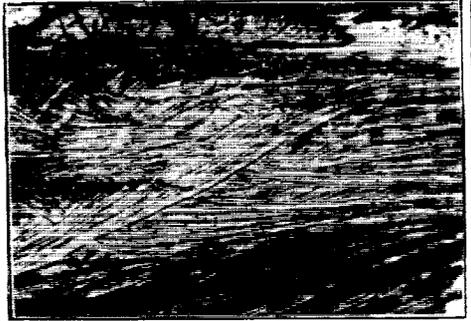


Action combinée des muscles aryvocal. et thyrovocal.

D'APRES KURT GOERTLER: Die Anordnung, Histologie und Histogenese
der quergestreiften Muskulatur im menschlichen
Stimmband. Pl, 3b

(Ouvrage cité. - Explications dans le texte)

A l'appui de cette thèse: deux photographies publiées par BEHRINGER ,
élève de GOERTLER



Coupe verticale à travers la corde
vocale

Coupe horizontale à travers la corde
vocale

D'après BEHRINGER:

Die Anordnung der Muskulatur in der menschlichen
Stimmlipe und im Gebiet des Conus elasticus .

A l'encontre de cette thèse : l'opinion classique selon laquelle "le ligament
vocal est libre de toute insertion dans toute
son étendue"(cf. P. Truffert)



Moitié gauche d'un larynx

St : aryténoïde
S : Thyroïde

Moitié gauche d'un larynx

(le tissu conjonctif a été
enlevé)

D'après J. Van den BERG
et MOLL :

Zur Anatomie des menschlichen Musculus Vocalis