



HAL
open science

Acoustique et physiologie phonatoires

Raoul Husson

► **To cite this version:**

Raoul Husson. Acoustique et physiologie phonatoires. J. Phys. Phys. Appl., 1957, 18 (S3), pp.23-35.
10.1051/jphysap:0195700180302300 . jpa-00212671

HAL Id: jpa-00212671

<https://hal.science/jpa-00212671>

Submitted on 4 Feb 2008

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

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

ACOUSTIQUE ET PHYSIOLOGIE PHONATOIRES

Par RAOUL HUSSON,

Chargé de Recherches au C. N. R. S.,
Chargé d'un Cours Libre sur la Phonation à la Faculté des Sciences de Paris.

PLAN

- I. — Introduction.
- II. — Le fonctionnement du larynx.
- III. — La vibration des cordes vocales sans pression sous-glottique.
- IV. — La vibration des cordes vocales avec courant d'air.
Rôles de la pression sous-glottique.
- V. — La classification des voix en étendues tonales.
- VI. — Structure acoustique des phonèmes.
- VII. — Réaction des cavités sus-glottiques sur la vibration des cordes vocales.
- VIII. — Réactions des qualités acoustiques d'une salle sur la vibration des cordes vocales.
- IX. — Sur la théorie mathématique du larynx.
Bibliographie.

I. Introduction.

§ 1. Il est admis depuis plus d'un siècle que les cordes vocales de l'homme, pendant la phonation, constituent un système d'anches (battantes ou à bourrelets), écartées par la pression sous-glottique, et ramenées en contact par rappel élastique. Cette hypothèse ne repose toutefois sur aucune expérience. Elle n'est qu'une vue de l'esprit, d'apparence logique, résultant de la simple comparaison des cordes vocales accolées avec un système d'anches. En fait, elle est en contradiction avec une foule de données expérimentales et cliniques, dont nous rapporterons les trois suivantes seulement : 1° Lorsqu'un sujet passe d'un son de poitrine à un son de fausset, son sphincter glottique se décontracte ; le rappel étant plus lent, le son devrait baisser ; c'est le contraire qui a lieu, et la voix de fausset permet d'atteindre une fréquence double de celle à laquelle on accède en voix de poitrine. 2° Dans certains troubles vocaux, les deux cordes vibrent avec une différence de phase d'une demi-période, c'est-à-dire que la gauche s'écarte de la ligne glottique médiane lorsque la droite s'en rapproche, et inversement, mécanisme inexplicable avec la genèse ci-dessus invoquée. 3° Dans certaines affections centrales, les cordes vocales sont intactes, s'accolent normalement, mais ne vibrent jamais, quelle que soit la pression sous-glottique réalisée par le sujet et l'intensité de sa volition (paralysie limitée à la vibration).

Pour ces raisons, et d'autres, le problème de la genèse de la vibration des cordes vocales a dû être repris *ab ovo* [1]. Il a donné lieu, depuis 1950, à une suite de travaux expérimentaux nombreux et

parfois difficiles, dont la plupart ont été faits en France, conditionnant une révision complète de la physiologie phonatoire. Nous en donnons ci-dessous un exposé-résumé, en insistant sur les problèmes acoustiques nouveaux qui sont corrélativement apparus.

II. Le fonctionnement du larynx.

§ 2. Les expériences d'André Moulouguet. — Il convenait d'abord de rechercher les phénomènes électriques dont le nerf récurrent (nerf moteur du larynx) était le siège pendant la phonation. Pour cela, il fallait placer sur ce nerf, *in vivo*, des électrodes réceptrices durant l'émission des sons. L'expérience fut réalisée sur l'homme, à trois reprises, en 1952-1953, par le Dr André Moulouguet, membre de l'Académie de Médecine, dans

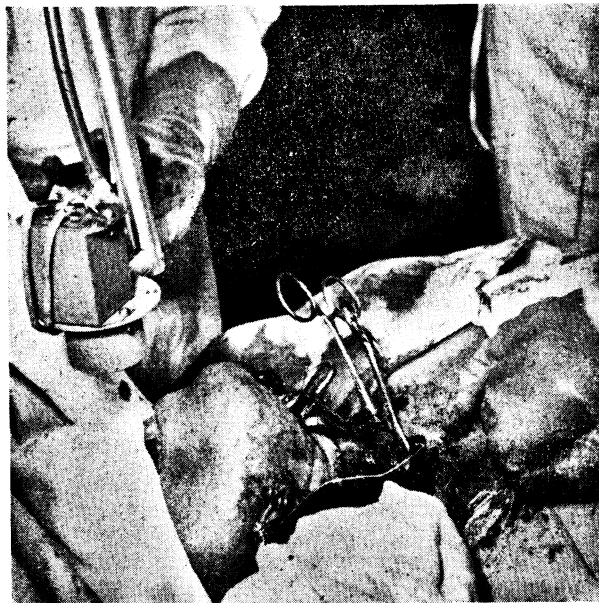


FIG. 1.

son Service de Laryngologie de l'Hôpital Boucicaut, à l'occasion de laryngectomies totales. Après la mise à nu du nerf et la pose des électrodes, le sujet est prié d'émettre une voyelle quelconque, captée par un micro placé devant ses lèvres (fig. 1). La

tension du microphone et l'activité électrique du récurrent, amplifiées, sont conduites sur un oscillographe cathodique à double trace, et photo-

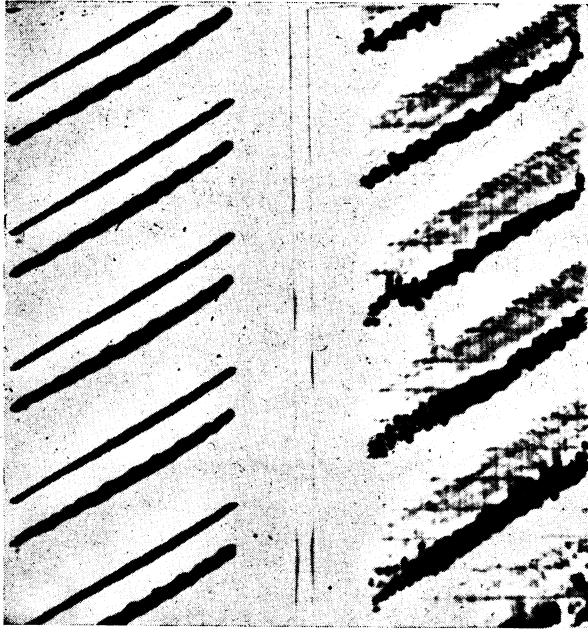


FIG. 2.

graphiées. La figure 2 représente une portion des enregistrements recueillis : à gauche, à vide ; et à droite, pendant la 110^e seconde. Les traces doivent se lire en descendant ; celle du dessus est donnée par le microphone, et celle du dessous issue de l'activité récurrentielle. Les traces figurées à gauche traduisent un léger bruit de la salle d'opérations et un bruit de fond électrique de l'amplificateur. Les traces de droite montrent que, à chaque instant, les vibrations vocales sont homorythmiques des influx récurrentiels. Comme ces derniers, en certains points des enregistrements, non représentés ici, apparaissent 7 à 8 centièmes de seconde avant les vibrations vocales, ils ne peuvent résulter, ni d'un effet microphonique, ni d'un arc réflexe d'origine myotatique, et sont des influx moteurs d'origine centrale. Les influx moteurs récurrentiels, résultant d'une activité centrale, commandent donc « coup pour coup » la vibration des cordes vocales. Pour tous détails concernant ces célèbres expériences, nous renverrons aux mémoires originaux [2].

§ 3. **Les travaux de Kurt Goerttler sur l'anatomie des cordes vocales.** — Pour bien comprendre comment les cordes vocales se comportent lorsqu'une salve de potentiels d'action récurrentiels leur parvient, nous rappellerons d'abord leur structure anatomique particulière. Dans un important travail paru en 1950, confirmé par Behringer [4] et

par Vosteen [5], Kurt Goerttler [3] a mis en évidence le fait fondamental suivant : la corde vocale de l'homme ne contient aucune fibre musculaire parallèle à son bord libre ; toutes les fibres musculaires qui la composent viennent s'insérer « en dents de peigne » sur le revêtement conjonctif élastique qui les recouvre à l'intérieur du larynx ; les unes proviennent de la base externe de l'aryténoïde, formant le système ary-vocal ; les autres sont issues de la face interne du cartilage thyroïde, formant le système thyro-vocal ; les deux systèmes étant étroi-

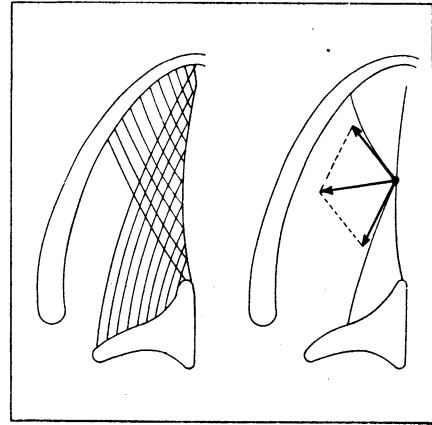


FIG. 3.

tement intriqués (fig. 3, gauche). Il résulte de cette disposition que, lorsqu'une salve de potentiels d'action tombe sur les cordes vocales, chaque point de son bord libre est sollicité par un parallélogramme de forces dont la résultante est dirigée vers l'extérieur (fig. 3, droite) ; les deux aryténoïdes demeurant accolés, on voit que les bords libres des deux cordes vont s'incurver vers l'extérieur, démasquant ainsi l'ouverture glottique. Ce mouvement n'est pas autre chose que celui qui est observé, avec un laryngo-stroboscope [[1], pp. 7-32], pendant la phase vibratoire des cordes vocales.

Cette disposition anatomique particulière des fibres musculaires des thyro-aryténoïdiens internes provient, comme Goerttler l'a également établi, de l'apparition d'un « blastème » pour chaque corde vocale dès le premier âge de la vie utérine. Ce blastème n'apparaît que chez l'homme [6], circonstance qui enlève tout intérêt à l'expérimentation sur l'animal pour des fins phonatoires.

§ 4. **Les travaux de Georges Portmann et collab. sur l'électromyographie des cordes vocales.** — La réponse électrique des cordes vocales aux salves rythmiques de stimulus leur parvenant par le nerf récurrent peut être étudiée par l'électromyographie. Cette dernière fut réalisée sur les cordes vocales du chien, en 1954-1955, par Paul Laget et J.-L. Robin [7], pendant que, concurrentement, le récurrent était

stimulé électriquement. Mais elle fut réalisée sur l'homme, *in vivo*, à plusieurs reprises en 1954-1956 [8], à l'Hôpital Bellan à Paris, par le P^r George Portmann et ses collaborateurs. La figure 4 en

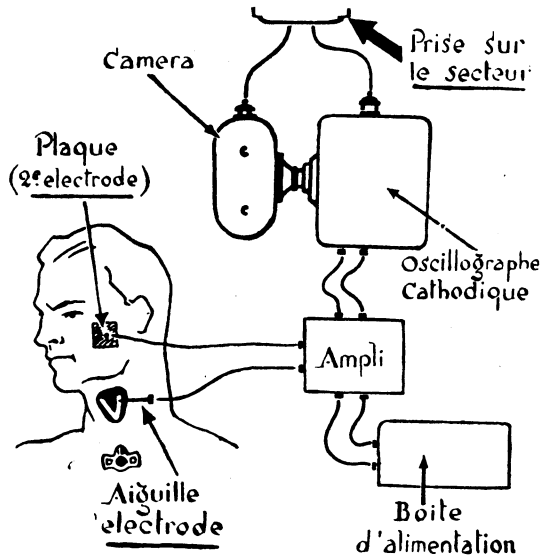


FIG. 4.

représente le principe, très simple, sur un opéré ayant subi une exérèse de la base de la langue par

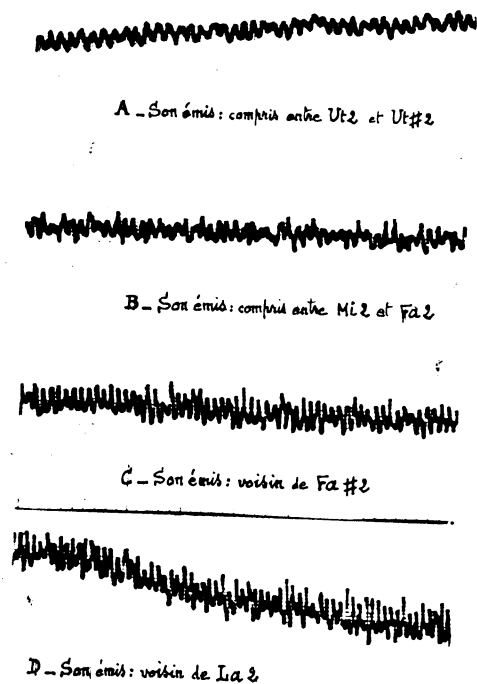


FIG. 5.

voie translaryngée sus-glottique, intervention permettant la vue et l'accès direct des cordes vocales. Parmi tous les résultats ayant pu être mis en évidence, nous ne rapporterons ici que les deux

suyvants : 1° La durée de contraction d'une unité motrice de corde vocale est extrêmement brève, de l'ordre de 0,8 à 0,9 milliseconde. 2° Si le sujet émet un son pendant l'expérience, les unités motrices de la corde vocale se contractent simultanément et de façon rythmique, à une fréquence à chaque instant identique à celle du son émis. La figure 5 représente les enregistrements oscillographiques obtenus sur différents sons émis par le sujet. Des précautions avaient été prises pour supprimer tout réflexe proprioceptif et tout effet microphonique.

§ 5. La stimulation récurrentielle aux fréquences élevées. — Comme la période réfractaire des fibres motrices récurrentielles est en moyenne de l'ordre de 2 millisecondes, la fréquence la plus élevée sur laquelle le récurrent peut conduire des influx « en phase » est nécessairement de l'ordre de : $1\ 000/2 = 500$ par seconde. Pour des fréquences globales plus élevées, les fibres récurrentielles doivent se diviser en 2 groupes travaillant alternativement. La fréquence globale ainsi atteinte est alors double : c'est le mécanisme observé dès 1935 par Stevens et Davis [9] sur les fibres du nerf auditif pour les fréquences sonores assez élevées. En vue de mettre ce phénomène en évidence sur le nerf récurrent, Édouard Coraboeuf, Rémi Saumont et Michel Gargouil ont stimulé un récurrent de chien *in vitro*, en 1955 [10], sur des fréquences croissant de 100 à 1 000. Ils ont constaté que, à partir de 700 par seconde, le nerf offre deux

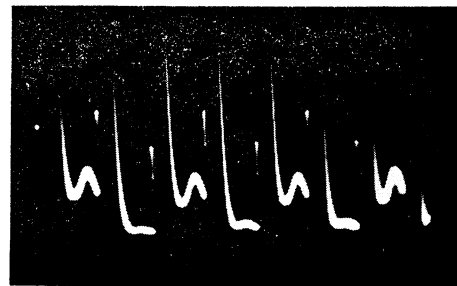


FIG. 6 A.

réponses possibles : dans la première (fig. 6, A), le nerf ne répond qu'une fois sur deux, mais avec une forte amplitude ; dans la seconde (fig. 6, B), le nerf répond à chaque stimulation, mais avec une amplitude diminuée de moitié environ (ce qui prouve que les fibres se sont divisées en deux groupes à peu près égaux répondant l'un après l'autre).

Ces deux mécanismes de conduction récurrentielle et de réponses laryngées corrélatives correspondent, le premier à l'émission de la voix de poitrine ou registre monophasé, le second à la voix de tête (femme) ou de fausset (homme) ou registre biphasé [11, 13]. Certains sopranos aigus présentent

un registre triphasé, leur permettant l'émission de sons plus aigus dans la limite d'une quinte ([12], p. 127), et M^{me} Mado Robin, de l'Opéra de Paris, possède même un registre quadriphasé qui lui

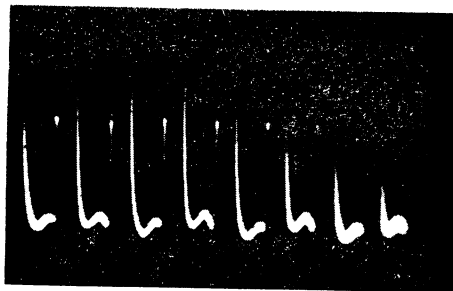


FIG. 5 B.

permet de graver une quarte supplémentaire ([12], p. 127). Le problème des registres de la voix humaine reçoit ainsi sa solution définitive par la considération de la conduction récurrentielle polyphasée, en fonction de hauteurs tonales exactement définies par la période réfractaire de ce nerf (voir plus loin §§ 13 et 14).

§ 6. **Les travaux anatomo-histologiques de M^{me} Jelena Krmpotic.** — Les données expérimentales relatées ci-dessus constituent le fondement de ce que André Soulairac a pu appeler « la genèse cérébrale de la vibration des cordes vocales ». Une difficulté demeurerait cependant : le récurrent gauche est plus long que le récurrent droit ; dans ces conditions, comment les influx récurrentiels peuvent-ils atteindre les deux cordes vocales simultanément ? L'explication a été donnée par M^{me} Jelena Krmpotic, professeur d'Anatomie à la Faculté de Médecine de Zagreb, dans son remarquable travail de 1955-1956 [14]. Des coupes histologiques en série lui ont notamment montré que les axones moteurs récurrentiels gauches étaient plus gros de $1,9 \mu$ (millième de millimètre) en moyenne que ceux du récurrent droit. La différence de longueur étant de : $42,4 - 31,7 = 10,7$ cm, et la vitesse dans un axone rapide de mammifère croissant de 6 m par seconde environ lorsque son calibre croît de 1μ , l'accroissement du calibre des fibres du récurrent gauche compense exactement sa longueur en excès.

III. La vibration des cordes vocales sans pression sous-glottique.

§ 7. **La possibilité de la vibration des cordes vocales sans pression sous-glottique.** — Dès 1933, en assimilant la vibration des cordes vocales aux battements des ailes d'insectes pendant le vol, Louis Lapicque regardait déjà comme « possible » cette vibration sans courant d'air. En 1952, ce

phénomène pouvait être affirmé avec plus de force ([12], p. 132). Il fut observé pour la première fois par Paul Laget et ses collaborateurs en 1952 [15] en stimulant le nerf récurrent d'un chien (de 100 à 600 par seconde) avec observation stroboscopique concomitante de la réponse laryngée ; il fut noté une réponse homorythmique de 100 à 400 environ, avec une amplitude maxima vers 200, et une réapparition de la vibration vers 600 avec de faibles stimulations. Mais cette expérience, refaite par différents auteurs (dans des conditions expérimentales d'ailleurs totalement différentes), donna des résultats assez inconstants. Dans de telles expériences, toutefois, la stimulation réalisée est loin de reproduire celle d'une synapse récurrentielle *in vivo*, et, par ailleurs, la structure anatomique d'une corde vocale humaine présente d'importantes particularités absentes chez le chien [6].

§ 8. **Les expériences de Piquet, Decroix, Libersa et Dujardin sur l'homme.** — Il appartient à Jean Piquet, professeur de Clinique O.-R.-L. à Lille, aidé de Gabriel Decroix, Claude Libersa et Jacques Dujardin, en février et avril 1956, d'avoir réussi à filmer à la caméra ultra-rapide (et en couleurs) la vibration des cordes vocales sans courant d'air sur l'homme [16]. L'expérience se déroula comme suit : le sujet avait subi une thyrotomie translaryngée sus-glottique ; les cordes vocales étaient directement visibles (*fig. 7, a*) ; une première bande de film (durant une seconde et demie, commençant à 400 cycles et finissant à 4 000) enregistra d'abord la vibration avec pression sous-glottique normale (d'origine pulmonaire). Puis le sujet fut trachéotomisé (*fig. 7, b*), et le bout laryngé de la trachée

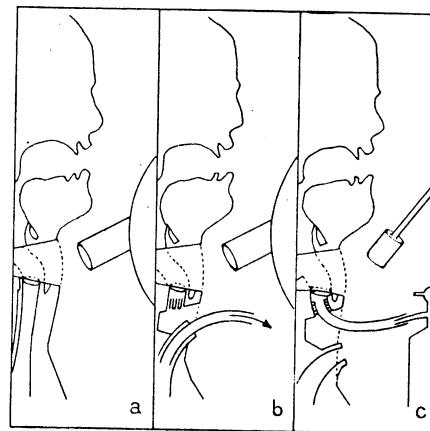


FIG. 7.

fut hermétiquement bouché ; dans ces conditions, le sujet fut prié de tenter d'émettre « le même son que précédemment ». Pendant ces efforts de phonation, aucun son ne fut bien entendu émis, mais une seconde bande de film fut prise : elle révéla que les cordes vocales avaient vibré sur la même fré-

quence, et la comparaison des deux bandes montra que, avec ou sans pression sous-glottique, le comportement vibratoire des cordes vocales avait été pratiquement identique. Au cours de la prise de cette seconde bande de film, les nerfs laryngés supérieurs avaient été sectionnés bilatéralement, de sorte que la vibration filmée reproduisait le mouvement des cordes vocales résultant uniquement des stimulus récurrentiels rythmiques parvenant au larynx.

Dans un troisième temps de l'expérience, le bout laryngé de la trachée fut raccordé avec un tube de soufflerie (muni d'un manomètre), de sorte que la pression sous-glottique d'origine pulmonaire était remplacée par une pression artificielle connue à chaque instant et réglable à volonté (fig. 7, c). Le sujet fut prié d'émettre un son tenu, tandis qu'on faisait varier la pression sous sa glotte et que en même temps, un microphone étaloné recueillait le son émis et permettait de mesurer sa fréquence et

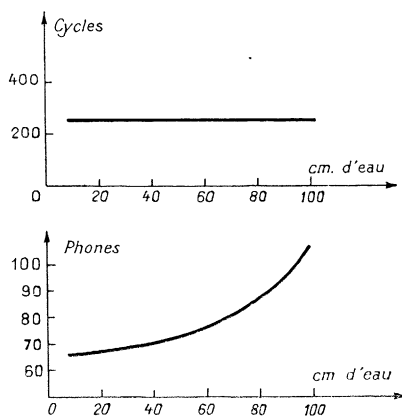


FIG. 8.

son intensité. Il fut ainsi établi que : 1° La pression sous-glottique n'exerçait aucune influence sur la hauteur du son. 2° La pression sous-glottique n'influa que sur l'intensité du son : nulle lorsque la pression était nulle, l'intensité du son mesurée en phones croissait plus vite que la pression mesurée en centimètre d'eau (fig. 8).

§ 9. **Analyse neuro-musculaire de ladite « vibration » des cordes vocales.** — L'étude des bandes de film prises au cours de l'expérience ci-dessus décrite ayant montré l'identité pratique du comportement vibratoire des cordes vocales avec ou sans courant d'air, il s'ensuit que ce comportement n'est nullement une « vibration » au sens ordinaire du mot, c'est-à-dire nullement assimilable à une oscillation auto-entretenu par un mécanisme quelconque (aérodynamique ou autre).

Cette soi-disant « vibration » n'est constituée que par des contractions ultra-brèves, rapides et rythmées des unités motrices composant les cordes vocales, contractions dont chacune est déclenchée

par l'arrivée d'une salve d'influx récurrentiels sur les thyro-aryténoïdiens internes. Chaque contraction incurve chaque corde vocale vers l'extérieur (§ 3 et fig. 3), et ainsi décolle les deux cordes en démasquant la fente glottique. La soi-disant « vibration », — terme impropre —, n'est donc qu'une suite rythmique de démasquages ultra-brefs de la fente glottique.

Bien entendu, si aucune pression n'existe sous la glotte, aucun son n'est créé. Mais si une telle pression existe et est entretenue par un effort expiratoire (ou par une soufflerie), chaque démasquage de la fente glottique permet la fuite d'une bouffée d'air. Ces bouffées périodiques déterminent une pression acoustique au sein des cavités sus-glottiques, et la voix est ainsi créée. Elle a nécessairement la fréquence des démasquages de la glotte.

IV. La vibration des cordes vocales avec courant d'air. Rôle de la pression sous-glottique.

§ 10. Évaluation des forces mises en jeu au niveau des cordes vocales pendant leur vibration.

— La force mise en jeu par chaque contraction des fibrilles transversales du thyro-aryténoïde interne s'obtient en assimilant cette contraction à une percussion. Si F est cette force, agissant pendant un temps dt , et communiquant à la corde de masse m une vitesse v et une elongation e , on a la relation :

$$F dt = mv = m \frac{e}{dt}$$

Supposons F constante pendant la durée d'application dt , et prenons : $dt = 1$ millième de seconde, $m = 10$ grammes, $e = 1$ millimètre. Il vient : $F = 10^6$ dynes. Cette évaluation est fortement par défaut car F n'est pas constante pendant le temps dt , et se développe suivant une courbe présentant un clocher de sorte que F est en réalité comprise entre 10^6 dynes et 2×10^6 dynes.

La force aérodynamique f s'obtient à partir de la pression sous-glottique P en cm d'eau par la relation :

$$f = P \times d \times g \times s,$$

où d est la densité de l'eau (égale à 1), g l'accélération due à la pesanteur (981 cm), et s la surface de la tranche d'une corde vocale (soit 1 cm²). Si on prend : $P = 100$ cm d'eau, valeur rarement atteinte, on trouve : $f = 10^5$ dynes (par excès).

Il en résulte que, au cours de chaque période vibratoire, la force neuro-musculaire qui s'exerce sur chaque corde vocale pour la décoller de sa congénère (durant la phase vibratoire d'écartement) est 10 à 15 fois plus forte (environ) que la force aérodynamique résultant de la pression sous-glottique. On s'explique ainsi que, sur les bandes de film prises au cours des expériences de Piquet,

Decroix, Libersa et Dujardin, le comportement des cordes vocales ait été trouvé pratiquement le même avec et sans courant d'air.

§ 11. Les deux rôles de la pression sous-glottique.

— Nous venons de voir (§ 8, *in fine*, et *fig. 8*) que la pression sous-glottique ne modifie en rien la fréquence de la vibration des cordes vocales (ce qui n'est pas étonnant, puisque celle-ci est imposée par la fréquence des salves récurrentielles), mais qu'elle commandait à chaque instant l'intensité du son émis.

L'observation révèle qu'un second rôle doit également lui être accordé : par stimulation myotatique locale des baro-cepteurs et des tensio-cepteurs superficiels ou profonds des cordes vocales, elle élève le tonus (c'est-à-dire la raideur) du sphincter glottique, accroît l'excitabilité des fibres musculaires thyro-aryténoïdiennes (et leur recrutement tonique), et accroît la brièveté de leur réponse. Des preuves nombreuses peuvent en être données : 1° Sur un son filé (c'est-à-dire émis à hauteur constante et à intensité croissante), la durée de la phase d'ouverture de la glotte diminue du « piano » au « forte », comme l'ont montré les mesures de Rolf Timcke [17]. 2° Sur le même son filé, l'observation laryngo-stroboscopique directe montre que le sphincter laryngien se contracte fortement en passant du « piano » au « forté », tandis que l'amplitude vibratoire diminue (*fig. 9*, en haut).

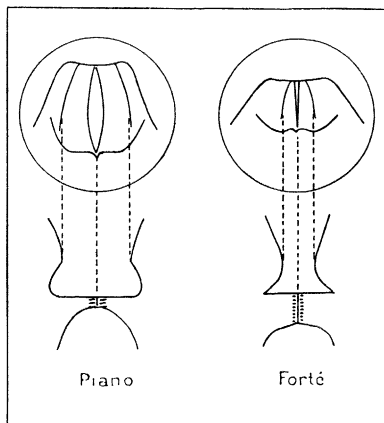


Fig. 9.

3° Par la prise de tomographies frontales de larynx en phonation sur un son filé [[18], p. 132], on voit la partie vibratoire des cordes vocales s'épaissir en passant du « piano » au « forte » (*fig. 9*, en bas).

§ 12. Le son laryngien initial. Travaux de G. Beckmann. Rôle des ventricules de Morgagni.

— Sur les sujets ayant subi des interventions chirurgicales du type des laryngectomies translaryngées sus-glottiques (*fig. 4* et *7* par exemple), le son laryngien initial, c'est-à-dire produit hors de toute

intervention des cavités sus-glottiques, peut être obtenu, écouté, capté par un micro, et analysé au spectromètre. Cette analyse a été faite pour la première fois par G. Beckmann [19], dans un très remarquable travail, qui a mis ceci en évidence : 1° Ce son laryngien initial est dépourvu de caractère vocalique. 2° Il est formé par un mélange complexe de fréquences comprises entre 160 et 2 000 Herz (son émis de 160 Herz), d'amplitudes à peu près égales. 3° Il est analogue au son produit par un « impuls-generator » à ondes carrées.

En raison de ces faits, ce son est à rapprocher d'un son de sirène, auquel d'ailleurs l'en rapproche encore son propre mécanisme d'émission.

G. Beckmann a également étudié le rôle acoustique éventuel des ventricules de Morgagni (qui se trouvent au-dessus des cordes vocales) en comparant les spectres des sons émis en les comblant ou en les laissant vides. Il ne trouve que des modifications de timbre quasi insignifiantes, et de ce fait dépourvues de signification. Husson et Djian [[18], p. 135], par la comparaison de tomographies systématiques de larynx en phonation, avaient déjà pu conclure à un rôle acoustique nul ou négligeable. Ces recherches expérimentales mettent fin aux « romans ventriculaires » édifiés dans le passé, dont le dernier en date est l'hypothèse d'un rôle de « filtre passe-bas » [20].

V. La classification des voix en étendues vocales.

§ 13. La remarque fondamentale. — On doit à Bremer la remarque fondamentale qu'un tissu nerveux quelconque ne peut conduire des influx rythmiques à une fréquence supérieure à celle dans laquelle deux influx successifs sont séparés par la durée d'une période réfractaire. L'application au récurrent est immédiate : la fréquence la plus aiguë que peut atteindre un sujet en voix de poitrine (§ 5) est donnée par la relation :

$$N(\text{max.}) = \frac{1\ 000}{R},$$

où R est la période réfractaire pratique de son récurrent. Si on mesure l'excitabilité de son récurrent par sa chronaxie C , on a : $R = 18 C$, d'où la formule fondamentale :

$$N(\text{max.}) = \frac{1\ 000}{18 C}. \quad (I)$$

Elle permet de calculer, inversement, la chronaxie du récurrent d'un sujet donné en connaissant la note la plus aiguë qu'il peut émettre en voix de poitrine.

Cette formule (I), déjà très remarquable, conduisit à chercher à mesurer directement la chronaxie du récurrent sur un sujet donné. Cette recherche permit à Christian Chenay [21] de découvrir que, chez tout sujet (des deux sexes), la chronaxie

récurrentielle est égale à celle du muscle sterno-cléido-mastoïdien (très facile à mesurer directement). Cette égalité provient des relations anatomiques étroites et étendues qui existent, chez l'homme, entre les noyaux moteurs récurrentiels, d'une part, et d'autre part les noyaux moteurs bulbaires et médullaires du spinal [22, 23, 24, 25].

Par la suite, il fut mis en évidence [26] que des formules identiques permettaient de calculer, à partir de la chronaxie récurrentielle C , la note la plus grave que le sujet peut émettre en voix de poitrine (II), ainsi que la note de « passage » sur les voyelles « ouvertes » (III) :

$$N(\text{min.}) = \frac{1\ 000}{120\ C}, \quad (\text{II})$$

$$N(\text{pas.}) = \frac{1\ 000}{32\ C}. \quad (\text{III})$$

TABLEAU DE CORRESPONDANCE ENTRE LA CHRONAXIE RÉCURRENTIELLE MESURÉE ET LE CLASSEMENT VOCAL TONAL D'UN SUJET

VOIX MASCULINES	CHRONAXIE EN MILLI- SECONDES	VOIX FÉMININES
	0,055	
	0,060	
Ténor { suraigu	0,065	Soprano { ultra-aigu ultra-aigu suraigu aigu central grave
aigu	0,070	
central	0,075	
grave	0,080	
Voix intermédiaire	0,085	Voix intermédiaire
Voix intermédiaire	0,090	
Baryton { aigu	0,095	Mezzo-Soprano { aigu central grave
central	0,100	
grave	0,105	Voix intermédiaire
Voix intermédiaire	0,110	
Voix intermédiaire	0,115	Mezzo-Contralto { aigu central grave
Basse chantante { aiguë	0,120	Voix intermédiaire Voix intermédiaire
grave	0,130	
Basse centrale	0,140	Contralto
Basse centrale	0,150	Contralto
Basse profonde	0,160	

Ce tableau appelle les remarques suivantes : 1° Pour chaque sexe, il n'y a pas trois (ou quatre) types de voix, mais une infinité formant une suite continue. 2° Certaines voix sont « intermédiaires » entre les types classiques admis par la composition musicale traditionnelle ; c'est ce qui explique les difficultés de classement rencontrées pour certains sujets. 3° Cette classification n'est relative qu'à la hauteur tonale ; elle ne préjuge en rien, ni du timbre, ni de l'intensité, de la voix du sujet, qui dépendent d'un conditionnement physiologique différent [27]. 4° Si un homme et une femme de chronaxies récurrentielles identiques présentent des étendues vocales exactement déplacées d'une octave, c'est que l'homme utilise normalement son registre monophasé (voix de poitrine), tandis que la femme utilise communément son registre biphasé (voix de tête), dont les limites tonales sont décalées d'une octave (§ 5, *in fine*, et § 13, *in fine*).

Pour les deuxième, troisième et quatrième registres, les mêmes formules subsistent, respectivement multipliées par 2, 3 et 4. Nous renvoyons aux travaux originaux pour plus de détails, ainsi que pour l'interprétation physiologique des coefficients 18, 32 et 120 de ces formules [26].

§ 14. **Tableau de correspondance entre le classement vocal tonal d'un sujet et son excitabilité récurrentielle.** — En 1953 et 1954, des mensurations chronaximétriques systématiques ont été effectuées sur 110 sujets, chanteurs et chanteuses professionnels, possesseurs de tessitures stabilisées et bien connues. Elles ont permis d'établir le tableau reproduit ci-dessous de correspondance entre la chronaxie récurrentielle d'un sujet et son classement vocal tonal [28].

VI. Structure acoustique des phonèmes.

§ 15. **Classification des phonèmes.** — Les phonèmes, ou sons du langage, se divisent en deux types irréductibles : 1° Les sons vocaliques, ou voyelles, caractérisés par une fourniture laryngée énergétiquement considérable. 2° Les bruits pharyngo-buccaux, qui sont des sons d'écoulement engendrés par l'air expiré au passage de certains étranglements sus-glottiques, accompagnés de fournitures laryngées en général nulles (ou très faibles) ; parmi ces derniers, les seuls usités par une langue donnée prennent le nom de consonnes.

§ 16. **Composantes périodiques, presque-périodiques, et aléatoires des phonèmes.** — L'expérience montre que la fourniture laryngée est périodique dans la voix chantée, et presque-périodique au sens de Favard [29] dans la voix parlée [30, 31]. Cette

particularité est due à ce que, dans le chant, la vibration des cordes vocales est intégrée en fréquence par l'activité nerveuse du cortex auditif. Dans la voix parlée, le sujet se désintéresse de la hauteur tonale, et cette intégration cesse ; dès lors, les salves récurrentielles n'ont plus une fréquence tenue, et la période vibratoire des cordes vocales fluctue d'une période à l'autre (comme l'avait déjà observé autrefois Abas [32] avec étonnement).

Quant aux sons d'écoulement produits au sein du pavillon sus-glottique (du type consonnes ou autres), ils ont une structure aléatoire, comme Meyer-Eppler l'a montré dès 1952 [33].

Si une voyelle est représentée par une suite finie du type :

$$f(t) = \sum_1^N A_n e^{i\Lambda_n t},$$

les exposants Λ_n sont de la forme $2\pi n/T$ pour les voyelles chantées de période T , et sont quelconques pour les voyelles parlées : ces dernières sont donc en principe dépourvues de hauteur tonale. En fait, si on ne considère qu'un groupe de périodes restreint dans une voyelle parlée (d'ailleurs toujours brève), on peut admettre que les Λ_n sont de la forme :

$$\Lambda_n = p_1 \alpha_1 + \dots + p_k \alpha_k,$$

où les p_i sont des entiers et les α_i des nombres voisins, et une hauteur tonale peut apparaître sur la moyenne des α_i .

En ce qui concerne les sons de structure aléatoire, on peut les étudier en calculant à leur sujet une intégrale d'auto-corrélation :

$$\varphi(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) f(t + \tau) dt,$$

étendue à la durée totale (ou partielle) T du phénomène : sa valeur mettra en évidence le degré de pseudo-périodicité qu'il contient [34]. Ils peuvent être classés de ce point de vue [30].

§ 17. **Structure spectrale des voyelles.** — Les premiers acousticiens qui se sont préoccupés de la structure acoustique des voyelles (Helmholtz, Hermann, Koenig, Pipping, etc...) avaient remarqué que la prédominance d'un seul son, de hauteur déterminée, dans un son complexe (périodique ou non), suffisait déjà pour imprimer à ce complexe une certaine « vocalité », c'est-à-dire une parenté avec une voyelle donnée. Étaient assez bien reproduites les voyelles fermées « ou » et « i », et les voyelles ouvertes « O », « A » et « AIS ». Mais les autres ne purent jamais être reproduites ainsi.

Le succès fut atteint d'emblée avec des sons complexes présentant deux partiels prédominants. En choisissant convenablement la hauteur des deux partiels et leurs intensités relatives, toutes les vocalités fondamentales purent être reproduites. On remarqua même que, pour garder la même vocalité avec des sons complexes de fonda-

mentaux différents, il suffisait d'assurer aux deux partiels prédominants des hauteurs relativement fixes dans l'échelle absolue des sons. Ce fait fut exprimé en disant que chaque voyelle est caractérisée par deux formants (ou régions formantiques) de hauteur absolues assez bien déterminées. Les formants relatifs à chaque voyelle furent déterminés expérimentalement par un grand nombre d'auteurs, soit par l'analyse, soit par synthèse, dont les résultats sont dans l'ensemble concordants ; ils

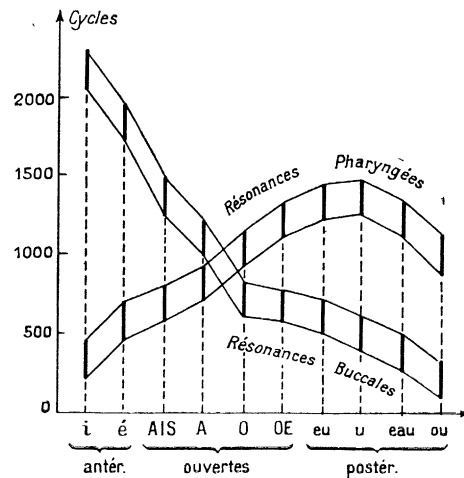


FIG. 10.

sont donnés par la figure 10 pour les 10 voyelles principales. Il est remarquable que tous les formants soient compris entre 200 et 2 250 cycles. Les travaux du Bell Telephone Laboratories [35, 36 et 37] et de Winckel [38] peuvent être considérés, de ce point de vue, comme définitifs.

Dans l'analyse des voix chantées puissantes, on met souvent en évidence des harmoniques dépassant 2 250 cycles, et pouvant même atteindre (et dépasser) 5 000 cycles. L'expérience montre qu'ils sont sans influence sur la vocalité du son émis : ils ne modifient que son éclat (ou mordant). C'est donc à tort qu'ils sont parfois désignés sous les noms de 3^e et 4^e formants. En fait, ils confèrent à la voyelle émise une qualité qui n'est plus vocalique. Au surplus, cette limite supérieure de 2 250 cycles n'est pas autre chose que la fréquence de coupure de la cavité pharyngobuccale assimilée à un pavillon. Pour les fréquences inférieures, l'air vibre en bloc, et des résonances peuvent être accrochées ; pour des fréquences supérieures, il y a propagation [[39], p. 374].

§ 18. **Relations entre la structure acoustique des voyelles et leur genèse physiologique.** — On sait depuis longtemps que les 2 formants vocaliques correspondent aux sons de couplage du résonateur double constitué par la bouche et le pharynx, cavités relancées par les jets périodiques qui fuser

pendant la phonation à travers la glotte (§ 9). Le couplage de ces deux cavités écarte leurs « sons propres » respectifs. Pour les voyelles « i » et « é », le formant aigu est buccal : elles forment la série « antérieure ». Pour les voyelles « ouvertes » « A », « AIS », « OE », et « O », les deux formants sont peu écartés. Pour les voyelles fermées « eu », « u », « eau » et « ou », le formant aigu est pharyngien : elles sont dites « postérieures » (*fig. 10*). Les deux formants vocaliques ont donc pour origine la configuration posturale sus-glottique adjointe à chaque instant à la fourniture laryngée.

Il n'en est plus de même des harmoniques aigus supérieurs à 2 250 cycles. Lorsqu'ils apparaissent, c'est qu'ils existent intenses dans la fourniture laryngée. Ils proviennent d'une phase d'accolement des cordes vocales assez longue durant chaque période [1], p. 65], donc témoignent du tonus glottique. Liés à des qualités purement laryngées, il n'est pas étonnant qu'ils soient conditionnés par la constitution endocrinienne du sujet, et surtout cortico-surrénalienne [40, 41].

VII. Réaction des cavités sus-glottiques sur la vibration des cordes vocales.

§ 19. C'est vers 1932 [42, 43] que la réaction des cavités sus-glottiques fut invoquée pour expliquer les « passages » de la voix ; on assimilait alors cette réaction à celle exercée périodiquement par un tuyau sur la hauteur du son émis par l'anche qui lui est adjointe, phénomène initialement décrit par Wien [44] et bien analysé par Auger en 1943 [45]. On sait maintenant que les passages de la voix (§ 5) ont une genèse neurologique [13], et n'ont aucun rapport avec une réaction acoustique de la cavité pharyngo-buccale au sens défini ci-dessus.

Mais, en fait, les phénomènes résonantiels qui ont leur siège au sein des cavités sus-glottiques exercent cependant sur le fonctionnement phonatoire du larynx plusieurs types de réaction, que nous allons décrire ci-dessous.

§ 20. **La réaction impédantielle.** — Lorsqu'un haut-parleur débite à travers un pavillon, le premier se charge de toutes les impédances du second ([39], p. 387), et le larynx ne saurait faire exception. Toute impédance transférée par le conduit pharyngo-buccal sur le larynx se manifeste par une élévation de la pression intra-glottique, comme le fait observer Conturie [46], et celle-ci apparaît, d'une part au laryngo-stroboscope par une vibration plus ample des cordes vocales ([1], p. 20), et d'autre part sur des clichés tomographiques par un épaississement de la partie vibrante des cordes vocales (§ 11 et *fig. 9*), comme l'ont montré des recherches récentes. Cette réaction s'accuse notamment : 1° Lorsque la cavité buccale accroche une résonance assez marquée sur un partiel laryngien ; 2° lorsque l'ouverture bucco-labiale diminue.

§ 21. **La réaction excito-réflexe née des sensibilités internes pharyngo-buccales.** — Un second phénomène, distinct du précédent, prend également sa source au sein des cavités sus-glottiques pendant la phonation. La pression acoustique développée dans la bouche (surtout) et le pharynx stimule les terminaisons sensibles de la muqueuse, tandis que les vibrations recueillies par le squelette naso-facial stimulent les terminaisons sensibles osseuses et tendineuses. Transmises en majeure partie par le trijumeau, ces stimulations convergent sur la formation réticulée facilitatrice bulbo-protubérantielle [47], et contribuent à élever à la fois le tonus du sphincter glottique et le niveau vigile du sujet, comme l'a analysé Soulairac [48]. Ces faits ont été mis en évidence à la fois par des expériences de stimulation électrique [49] et par des épreuves contraires de cocaïnisation [50]. Ces sensibilités internes ont une importance considérable dans le chant à grande puissance.

§ 22. **Les réactions laryngées aux stimulations auditives.** — Des expériences nombreuses ont également montré, récemment, que toute stimulation sonore parvenant à l'oreille d'un sujet qui chante (ou parle) exerce une action très nette sur la vibration de ses cordes vocales. Cette action, de nature neurologique, emprunte la voie suivante [51] : nerf auditif, noyaux auditifs bulbaires, substance réticulée bulbaire, noyaux sensitifs et moteurs du trijumeau, noyaux moteurs récurrentiels, et musculature laryngée. Ses effets sont très complexes et peuvent se résumer comme suit : 1° Si la stimulation est faible et n'intéresse qu'une oreille, elle ne se répercute que sur la corde vocale homolatérale ; si son intensité croît, elle se répercute sur les deux cordes [50]. 2° Si la stimulation est homorythmique au son émis, elle stabilise la vibration laryngée ; si sa fréquence est très peu différente de celle des cordes vocales, la vibration de celles-ci peut être diversement perturbée [52]. 3° Si le son perturbateur est grave (moins de 500 cycles), le tonus du sphincter glottique est diminué ; s'il est aigu (plus de 2 000 cycles), le tonus du sphincter laryngien est accru, comme le montrent des expériences de Tomatis [51, 53] et pourraient l'expliquer des mesures d'excitabilité récurrentielle de Chenay [54] et de Chauchard et Mazoué [54 *bis*]. Toutes ces actions se répercutent sur le timbre de la voix : non pas sur son timbre « vocalique », mais sur ses qualités laryngées d'éclat et de mordant (§ 18, *in fine*).

VIII. Réactions des qualités acoustiques d'une salle sur la vibration des cordes vocales.

§ 23. **Position du problème.** — Depuis Sabine, l'acoustique des salles a fait l'objet de travaux ininterrompus en tous les pays en vue de rechercher

les conditions géométriques et physiques susceptibles d'y assurer une audition optima pour tous genres de phénomènes sonores : chant, discours, musiques diverses, etc... Ce n'est qu'en 1952 qu'est apparue, en France, la première (et encore la seule) étude de l'acoustique des salles du point de vue du chanteur et de l'orateur [55], c'est-à-dire se préoccupant de définir les qualités acoustiques susceptibles d'y assurer des conditions phonatoires optimas.

On sait en effet qu'un chanteur peut se fatiguer rapidement dans une salle où cependant l'audition est excellente ; inversement, il existe des théâtres (l'Opéra de Paris par exemple) où l'audition est médiocre, alors que le chanteur connaît une pleine euphorie. L'expérience a d'ailleurs fait connaître, depuis longtemps, que les conditions phonatoires les plus pénibles ont lieu à l'air libre ou dans les salles mates ou insonores. A mesure que le temps de réverbération T du local s'élève, ce caractère pénible s'atténue progressivement. Les expériences faites en 1951-1952 ont permis aux auteurs ([55], p. 61) de dresser le tableau suivant, faisant connaître les conditions subjectives de la phonation en fonction du temps de réverbération sabinien (en secondes) :

VALEUR EN SEC. DU TEMPS DE RÉVERBÉRATION	CONDITIONS SUBJECTIVES DE LA PHONATION
$T < 0,5$	Phonation très pénible et rapidement fatigante.
$0,5 < T < 1$	Phonation pénible. Un chanteur exercé peut, toutefois, modifier volontairement son mode d'émission vocale de façon à atténuer ce caractère pénible.
$1 < T < 2$	Une gêne légère est encore ressentie au niveau du larynx, mais elle est souvent supprimée par une appropriation pharyngobuccale réflexe.
$2 < T < 4$	Phonation facile. Le chanteur « sent à l'aise », et déclare qu'il « sent sa voix ».
$4 < T < 8$	Phonation très facile. Le chanteur « sent sa voix » et a l'impression que « sa voix sonne dans la salle ».
$T > 8$	Phonation très facile, avec apparition de la sensation très particulière que « la salle fait corps avec la bouche ». Apparition de gênes légères, au niveau du larynx, sur certaines hauteurs tonales qui coïncident avec les « sons propres » graves de la salle.

§ 24. Analyse physiologique des effets observés.

— Les conditions pénibles ou euphoriques de la phonation, selon la réverbération du local, s'expliquent entièrement à partir des trois types de réactions analysées au chapitre VII précédent.

Lorsque le temps de réverbération s'abaisse, il en est de même du niveau d'énergie sonore aux environs du chanteur ; l'impédance du milieu pré-

buccal diminue ainsi que l'impédance de sortie. Dès lors la pression acoustique diminue dans la cavité buccale, et avec elle la réaction excito-réflexe exercée sur le sphincter laryngien (§ 21) : le sujet déclare qu'il a du « coton dans la bouche », tandis que le mordant de sa voix disparaît. Conjointement l'impédance ramenée sur le larynx (§ 20) diminue, et le sujet perd son souffle de façon incoercible. Phénomènes inverses lorsque la réverbération croît aux alentours du chanteur.

Lorsque le chanteur est placé au milieu (ou très près) de l'orchestre, il peut être gêné par des dissonances (§ 22, 2°). Mais si la musique est bien consonante, l'élévation du niveau de l'énergie sonore devant l'orifice buccal produit un accroissement de la pression acoustique intra-buccale, ce que le chanteur exprime en disant que « l'orchestre porte la voix » ; de plus, l'effet cochléo-récurrentiel facilitateur (§ 22, 3°) peut se manifester énergiquement.

On peut également observer que seule compte, pour le chanteur, la réverbération locale de l'endroit où il se trouve, et non celle de la salle tout entière, qui peut en différer notablement. C'est ce qui explique l'existence de scènes et de salles de qualités inversées, tant pour l'auditeur que pour le chanteur. Un décor très absorbant (rideau par exemple) suffit pour rendre la phonation pénible sur une scène, tandis qu'un décor réfléchissant assure à la même scène des qualités d'euphorie phonatoire. On se reportera au mémoire original [55] pour le cas de l'orateur (un peu différent) et de la femme (qui chante sur des fréquences plus élevées, comportant des conditions de réverbération différentes).

IX. Sur la théorie mathématique du larynx.

§ 25. La théorie de Wegel. — Wegel a donné,

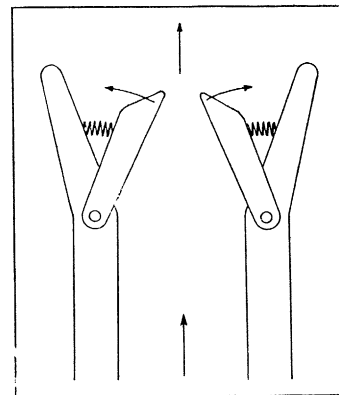


FIG. 11.

en 1930 [56], une théorie de la vibration des cordes vocales qui n'est, en fait, qu'une analyse mathématique du fonctionnement d'une anche à bourrelet (fig. 11). Nous allons d'abord la rappeler en ses

grandes lignes, car elle fera mieux comprendre en quoi le fonctionnement du larynx humain, analysé au § 9, en est profondément différent.

Wegel forme d'abord les expressions de l'énergie cinétique totale et de l'énergie potentielle du larynx et leur applique les équations de Lagrange en introduisant dans la mise en équations les 3 hypothèses suivantes : 1° Aucune force extérieure n'agit sur le système, en dehors du courant d'air, de la réaction élastique des cordes, et d'une réaction éventuelle des volumes d'air sus- et sous-glottiques. 2° Aucune compression n'existe sous la glotte, étant à chaque instant annihilée par un écoulement d'air dans le pharynx. 3° Pour pousser son analyse, il considère comme négligeable la réaction exercée par les cavités adjointes au larynx. En désignant par p une fonction ayant les dimensions d'une fréquence, il parvient à une équation de la forme :

$$D = \left\| \begin{array}{cc} ap^2 + bp & cp^2 + d \\ cp^2 & ep^2 + bp + f \end{array} \right\| = 0,$$

analogue à celle d'un « tuned grid oscillator ». Dans cette analogie, les termes de la diagonale principale représentent des impédances alvéolaires, et les autres des impédances mutuelles ; la glotte joue le rôle du filament-plaque, les cordes vocales celui du filament-grille, et la vitesse de l'air dans la glotte correspond au courant-plaque. Cette équation, du 4^e ordre en p , admet une racine nulle (sans intérêt), une racine négative réelle (également sans intérêt) puisque défirissant un mouvement non vibratoire), et deux racines quelconques. Un mouvement périodique entretenu sera alors possible si l'une au moins de ces dernières est imaginaire pure. En écrivant les conditions pour qu'il en soit ainsi, Wegel forme les conditions d'existence d'une oscillation auto-entretenu qui déterminent sa fréquence. Puis il cherche dans quelles limites cette fréquence peut varier en imposant des variations petites aux coefficients du système, problème de calcul des variations qu'il traite fort élégamment.

Nous ne nous étendrons pas sur cette analyse, car les hypothèses qui sont à sa base sont en contradiction évidente avec les faits : 1° D'une part le larynx n'est pas un système isolé, car il reçoit pendant la phonation des stimulations récurrentielles jouant le rôle d'une force extérieure imposée (§ 9). 2° D'autre part il existe sous la glotte, pendant la phonation, de fortes compressions (atteignant facilement 50 cm d'eau chez un sujet normal). 3° Enfin la réaction des cavités sus-glottiques ne saurait être négligée (§ 20) : si elle ne peut modifier la fréquence du système, imposée par les influx récurrentiels (alors qu'elle la modifie dans l'analyse de Wegel), elle modifie certainement la fourniture glottique.

Retenons que ce qui caractérise essentiellement cette analyse, c'est qu'elle est nécessairement dirigée vers la détermination d'une fréquence

(d'oscillation auto-entretenu), alors que, dans la réalité, la fréquence est une donnée expérimentale, imposée au système.

§ 26. **Théorie moderne du larynx et de la phonation.** — Dans la réalité, nous avons vu (§ 9) que le larynx joue le rôle d'un robinet à ouvertures rythmées (dont la fréquence des ouvertures est imposée par le récurrent) qui débite de la pression dans le pavillon sus-glottique, au sein duquel elle est transformée en pression acoustique [57]. La stimulation récurrentielle peut être assimilée à une suite de chocs (périodique dans la voix chantée, et presque-périodique dans la voix parlée), représentable en fonction $F(t)$ du temps par un graphique du type de la figure 12, A pour chaque corde vocale. Chaque choc écarte la corde vocale, qui revient à sa position initiale avant le choc suivant : on peut en rendre compte en admettant qu'elle est pourvue à la fois d'une raideur K considérable et d'un amortissement f supérieur à l'amortissement critique. L'équation de son mouvement sera du type :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + 2f \frac{dx}{dt} + Kx = F(t), \quad (1)$$

et son élongation en fonction du temps sera représentable par un graphique analogue à celui de la figure 12, B. En face d'elle, la seconde corde vocale obéira à une équation du même type :

$$m' \frac{d^2x'}{dt^2} + 2f' \frac{dx'}{dt} + K'x' = F(t + \tau), \quad (1')$$

où, dans le cas d'un organe sain et d'une phonation normale, les coefficients homologues de (1) et de (1') seront égaux et où la différence de phase τ sera nulle.

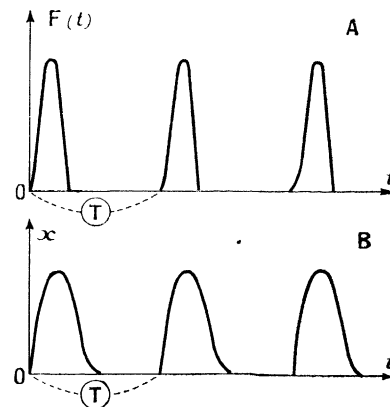


FIG. 12.

A chaque période T (période ou presque-période des influx récurrentiels), la glotte s'ouvrira d'une largeur totale $(x + x')$, quantité qui est également fonction périodique ou presque-périodique

du temps. Si P est la pression sous-glottique, une bouffée d'air fuse à travers la glotte à chaque période, introduisant dans le pharynx une masse d'air $M(P, x + x', y)$, où y est la pression intra-pharyngée. Cette quantité M est calculable en application des lois de l'écoulement des gaz et de la thermodynamique. La pression intra-pharyngée y va donc subir, de ce fait, un accroissement périodique ou presque-périodique Δy de période T (imposée). Si l'on désigne par z et z' les pressions existant dans la bouche et les cavités nasales, par Z et Z' les impédances de sortie bucco-labiale et naso-narinaire, nous pourrions écrire des relations des types suivants :

a) pour la cavité buccale,

$$A \frac{d^2 z}{dt^2} + ZI \frac{dz}{dt} + z - Ly = 0 ; \quad (4)$$

b) pour la cavité nasale,

$$B \frac{d^2 z'}{dt^2} + Z'J \frac{dz'}{dt} + z' - Ny = 0 ; \quad (3)$$

c) pour la cavité pharyngée,

$$C \frac{d^2 y}{dt^2} + y + Oz + Qz' - \Delta(P, x + x', y) = 0. \quad (2)$$

L'ensemble des équations (1), (1'), (2), (3) et (4) définit le problème dans le cas le plus général. Si les conditions phonatoires laryngées sont normales, on a : $x \equiv x'$, et l'équation (1') disparaît. Si le son ne comporte aucune nasalisation, on a : $z' \equiv 0$, et l'équation (3) disparaît.

Il convient en outre de tenir compte des relations suivantes : 1° La raideur K est une fonction croissante de la pression sous-glottique P (§ 14). 2° La raideur K est également une fonction croissante de y , z et z' (§ 21). Cette seconde condition complique considérablement les équations laryngées (1) et (1'), mais son importance ne saurait échapper, puisque c'est elle qui permet de mettre en évidence par le calcul la réaction des cavités pharyngo-bucco-nasales sur la fourniture glottique (en sus de la réaction impédancielle traduite par la présence de y dans la valeur de M).

Quant à la voix, elle est en principe constituée par la superposition des deux ondes progressives extérieures créées par les pressions périodiques z et z' à travers les orifices labial et narinaire. Mais en fait, l'onde créée par z' (nasalisée) ne porte en général qu'une très faible énergie (moins de 10 % du total dans le cas le plus favorable). La voix est donc essentiellement créée par la pression z . L'assimilation des échanges de pressions à travers le goulot labial à un va-et-vient de piston plat [[39], p. 330] permet de raccorder la fonction $z(t)$ aux fonctions de Bessel caractérisant la propagation extérieure, et par suite aux caractéristiques acoustiques de la voix telles qu'elles sont saisies par l'oreille ou les instruments d'enregistrements.

Nous pensons en avoir assez dit, dans le cadre réduit de cet article, pour donner une idée des directions de recherche qui découlent des nouveaux problèmes posés par l'étude de la phonation.

Manuscrit reçu le 24 novembre 1956.

BIBLIOGRAPHIE

(bornée aux mémoires cités)

- [1] HUSSON, Thèse Fac. Sc., Paris, 17 juin 1950. *Revue Scientifique*, 1950, nos 3306, 3307 et 3308 (couronnée par l'Institut).
- [2] MOULONGUET, *Bull. Acad. Méd.*, Paris, 1953, **137**, n° 29, 475. *Ibid.*, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1954, 110-127.
- [3] GOERTTLER, *Z. Anat. Entwickl.*, 1950, **115**, 352-401.
- [4] BEHRINGER, *Z. Anat. Entwickl.*, 1955, **118**, 324-342.
- [5] VOSTEEN, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1957.
- [6] SEITER (G.), *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de mai 1956, 408.
- [7] LAGET et ROBIN, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de mai 1956, 428.
- [8] PORTMANN, HUMBERT, ROBIN, LAGET, VANNIER et HUSSON, *C. R. Soc. Biol.*, 1955, **149**, 296-300 et 1783-1787.
- [9] STEVENS et DAVIS, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1936, **8**, 1.
- [10] CORABOEUF, SAUMONT et GARGOUIL, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de mai 1956, 445-454.
- [11] HUSSON, *J. Physiol.*, 1951, **43**, 757.
- [12] HUSSON, *Ann. Oto-Laryng.*, 1952, n° 2, 124-137.
- [13] HUSSON, *J. Physiol.*, 1956, **48**, n° 3, 573.
- [14] KRMPOTIC (J.), Données anatomiques et histologiques relatives à la stimulation récurrentielle droite et gauche pendant la phonation, ainsi que sur la longueur des voies motrices relatives à la phonation, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1957.
- [15] LAGET, *J. Physiol.*, 1953, **45**, 131. *Ibid.*, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1953, 132.
- [16] PIQUET et DECROIX, *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1956, **242**, 1223. *Ibid.*, *Bull. Acad. Méd.*, Paris, Séance du 24 avril 1956.
- [17] TIMCKE, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1957.
- [18] HUSSON et DJIAN, *J. Radiol. Électrol.*, 1952, **33**, 3-4, 127-135.
- [19] BECKMANN, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1957.
- [21] HUSSON et CHENAY, *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1953, **236**, 1077. *Ibid.*, *J. Physiol.*, 1953, **45**, 131. *Ibid.*, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1954, 260-294.
- [22] CLARA, *Das Nervensystem des Menschen*, Barth, Leipzig, 1942.
- [23] RANSON et CLARK, *The anatomy of the nervous system, etc.*, Saunders, London, VIII^e éd., 1947.
- [24] STRAUS et HOWELL, *Quart. Rev. Biol.*, 1936, **11**, 387.
- [25] KRMPOTIC (J.), Considérations anatomo-physiologiques sur le système fonctionnel formé par les noyaux mot. bulb. du X (Ambiguus) et bulb. et médull. du XI, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1957.
- [26] HUSSON, *J. Physiol.*, 1954, **46**, 386.
- [27] HUSSON, *J. Physiol.*, 1955, **47**, 197.
- [28] HUSSON, *Bull. Acad. Méd.*, Paris, 1955, 1-2, 25.
- [29] FAVARD, Leçons sur les fonctions presque-périodiques, Gauthier-Villars, Paris, 1933.

- [30] HUSSON et SAUMONT, *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1953, **237**, 1555.
- [31] HUSSON, *Rev. Gén. Sc.*, mai-juin 1956, LXIII, 159.
- [32] ABAS, *Arch. Néerl. Phon. Expér.*, 1928, **11**, 93-171.
- [33] MEYER-EPPLER, *Z. Phon. u. allg. Sprachwiss.*, 1952, **6**, 5-6, 269. *Ibid.*, 1953, **7**, 1-2, 89. *Ibid.*, 1953, **7**, 3-4, 196.
- [34] MOLES, *Cahiers d'Acoust.*, 1952, **IV**, 46.
- [35] DUNN, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1950.
- [36] POTTER et STEINBERG, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1950, **22**, 6, 807.
- [37] SCHOTT, *Bell. Labor. Rec.*, 1950, XII.
- [38] WINCKEL, *Funk und Ton*, 1953, **3**, 124.
- [39] ROCARD, *Dynamique générale des vibrations*, Masson, Paris, 1953, 2^e éd.
- [40] AMADO (J.-H.), Glandes endocrines et phonation, l'endocrino-phoniatry, *Confér.*, Palais de la Découverte, Série A, n° 211, 12 février 1955.
- [41] HUSSON, *J. Physiol.*, 1954, **46**, 388.
- [42] WEISS, *Z. f. H.-N.-O.-heilk.*, 1932, **30**, 353.
- [43] HUSSON, *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1933, **196**, 1535.
- [44] WIEN, *Ann. Physik, Neue Folge*, 1897, **61**.
- [45] AUGER, *Thèse Fac. Sc.*, Paris, 1933.
- [46] CONTURIE, *L'acoustique dans les bâtiments*, Eyrolles, Paris, 1955.
- [47] EYRIES, Voies nerveuses de la phonation, *Encyclop. Méd.-Chirurg.*, Vol. O.-R.-L., 20.632 A 10, Paris, novembre 1955.
- [48] SOULAIRAC, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de novembre 1955, 666.
- [49] HUSSON, *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1951, **231**, 1247.
- [50] HUSSON, *J. Physiol.*, 1952, **44**, 268.
- [51] HUSSON, Physiologie phonatoire du larynx, *Encyclop. Méd.-Chirurg.*, Vol. O.-R.-L., 20.632 A 10, Paris, novembre 1955.
- [52] VANNIER, SAUMONT, LABARRAQUE et HUSSON, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1954, 160.
- [53] TOMATIS, Exposés Ann. d'O.-R.-L., Masson, Paris, 1954, 264.
- [54] CHENAY, *Rev. Laryng.*, Portmann, Suppl. de février 1957.
- [54 bis] CHAUCHARD et MAZOUÉ, Congrès A. F. A. S., Dijon, juillet 1956.
- [55] HUSSON, L'acoustique des salles du point de vue du chanteur et de l'orateur, *Ann. Télécom.*, 1952, VII, 2 et *Cahiers d'Acoust.*, 1952, IV.
- [56] WEGEL, *Bell System Technical J.*, 1930, IX, 207-227.
- [57] HUSSON, *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1953, **236**, 1697.
-
-