

MARCEL FOUCHÉ

Étude expérimentale des tuyaux à anse Phénomène de Weber

Annales de la faculté des sciences de Toulouse 3^e série, tome 20 (1928), p. 237-336

http://www.numdam.org/item?id=AFST_1928_3_20__237_0

© Université Paul Sabatier, 1928, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de la faculté des sciences de Toulouse » (<http://picard.ups-tlse.fr/~annales/>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES TUYAUX A ANCHE

PHÉNOMÈNE DE WEBER

PAR M. MARCEL FOUCHÉ.

INTRODUCTION¹

Le sujet et le plan de ce travail ne sont pas choses nouvelles. En février 1827 — voilà cent ans — W. Weber présentait comme thèse de doctorat la dissertation latine : « *Leges oscillationis oriundæ si duo corpora diversa celeritate oscillantia ita conjunguntur ut oscillare non possint nisi simul et synchronice, exemplo illustratæ tuborum linguatorum* ». Vers la même époque, Weber consacrait aux tuyaux à anche cinq autres Mémoires.

Je reprends les travaux de Weber pour les confirmer et les compléter.

§ 1. — Définitions. Anches + E, anches + I.

1° L'anche est une languette, ordinairement rectangulaire, de laiton battu, d'acier, de roseau,... fixée par son talon T sur l'un des bouts d'un cadre C (fig. 1). Son épaisseur n'est pas nécessairement uniforme.



FIG. 1.

1. M. H. Bouasse, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse, ayant bien voulu demander à l'auteur de ce Mémoire sa collaboration expérimentale aux ouvrages : « *Tuyaux et Résonateurs* », « *Instruments à vent* », qu'il publie dans la *Bibliothèque de l'Ingénieur et du Physicien* (Delagrave, éd., Paris), il est inutile de donner ici la bibliographie du sujet et la critique des recherches antérieures.

D'autre part, M. Bouasse s'est réservé la discussion théorique des travaux qu'il a conseillés et dirigés. Ce Mémoire contient donc ce que des ouvrages didactiques ne peuvent publier : le détail et la technique des expériences.

L'anche est *libre*, quand elle peut vibrer librement entre les parois du cadre; elle est *battante*, quand elle ne peut pénétrer dans le cadre.

On appelle *lumière* l'ouverture du cadre; l'anche battante est plus large que la lumière.

En général l'anche n'est pas dans le plan du cadre (pour simplifier, supposons infiniment minces le cadre et l'anche). Appelons e la *levée* de la languette — distance au cadre du bout libre. e mesure, si l'on veut, le bâillement de l'anche.

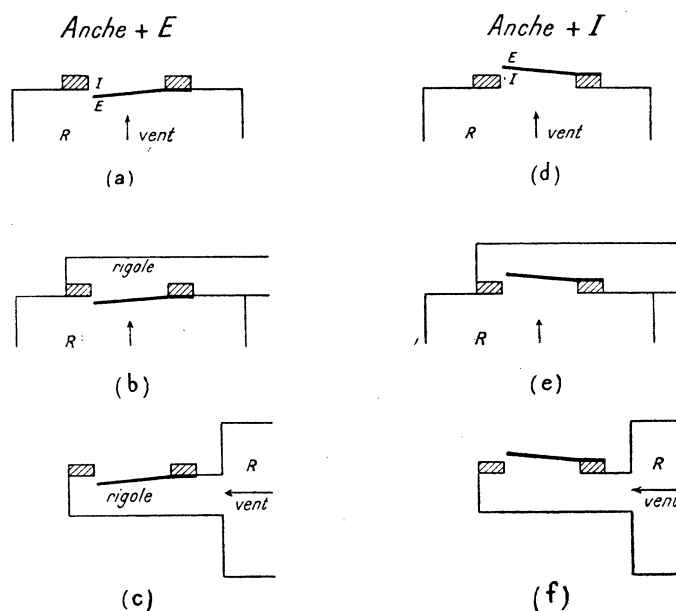


FIG. 1 bis.

Désignons par I la face de la languette qui regarde le cadre; par E , la face opposée.

2° Fixons le cadre sur la paroi d'un réservoir à air de grand volume R .

Pour faire parler l'anche, nous créons une différence de pression entre ses deux faces. Nous donnerons à E et I les signes $+$ ou $-$; $+$ indiquera un excès de pression sur la face considérée, $-$ un vide relatif.

Par rapport au vent, l'anche peut occuper les deux positions $+E - I$, $-E + I$ (*fig. 1 bis, a, d*). Pour abrégé nous dirons que l'anche est $+E$ ou $+I$.

Supposons très mince le cadre: l'anche $+E$ ne parle pas, l'anche $+I$ parle.

3° Augmentons l'épaisseur du cadre. A partir d'une certaine épaisseur les phénomènes s'inversent. L'anche $+I$ se tait, l'anche $+E$ parle. Cette épaisseur est d'autant plus petite que l'anche est plus aiguë.

Sans toucher à l'épaisseur du cadre, plaçons le creux de la main sur le cadre, de manière à créer un petit volume sur une face de l'anche; ou mieux (*fig. 1 bis, b, e*),

soudons au cadre un bout de tuyau de petit diamètre (*rigole*) : l'anche $+I$ se tait, l'anche $+E$ parle.

Mêmes résultats en disposant la rigole comme l'indique la *fig. 1 bis, c, f*.

En définitive, par rapport au vent et à la rigole, l'anche peut occuper quatre positions (b, c, e, f). Au point de vue des phénomènes et pour des raisons évidentes de symétrie, elles se réduisent à deux : $+E(b, c)$, $+I(e, f)$.

Les notations $\pm E$, $\pm I$ proposées par M. Bouasse remplaceront les dénominations de Helmholtz : *anche en dedans*, *anche en dehors*, qui prêtent à confusion.

4° La rigole ne saurait être assimilée à un résonateur.

Quand l'anche est associée à un tuyau ou à un résonateur, la partie du tuyau ou du résonateur voisine de l'anche joue le rôle de rigole.

L'anche $+E$ avec rigole parle sans résonateur. On l'utilise dans l'harmonium.

L'anche $+I$ avec rigole ne parle qu'avec résonateur.

Son emploi dans la facture instrumentale est pour ainsi dire nul; nous ne la rencontrerons que dans un instrument d'Extrême-Orient : le *Cheng*.

5° Donnons un signe à la levée e : e sera par exemple compté négativement dans le sens de l'écoulement du vent; nous supposons que le vent s'écoule normalement au cadre. Pour l'anche $+E$, la levée est négative; elle est positive pour l'anche $+I$.

Supposons l'excès de pression sur l'une des faces de la languette, et le résonateur, convenables. L'anche vibre. Soit e' la levée de sa position moyenne.

En pratique, e' garde le signe du bâillement e (vent nul); quelle que soit la force du vent, l'anche reste $+E$ ou $+I$.

Il peut arriver cependant, dans le cas de l'anche libre $+E$ montée sur un cadre mince, que la levée e' change de signe : la position moyenne passe d'un côté à l'autre du cadre. L'anche devient $+I$.

Mais pour changer de signe, e' s'annule. L'expérience montre que l'entretien par le vent est alors impossible : l'anche se tait; elle reparle lorsque l'anche est devenue $+I$.

4° Supposons $e = 0$: par vent nul; l'anche est dans le plan du cadre.

L'expérience montre que l'anche est $+I$. Le résultat est évident. Le vent produit un bâillement dans son propre sens; d'après nos conventions ce bâillement est négatif. Quel que soit le sens du vent par rapport au résonateur, l'anche est nécessairement $+I$.

§ 2. — Plan.

1° L'anche est associée à un résonateur; le cadre est soudé quelque part sur la paroi de celui-ci.

J'étudie les phénomènes qui se rattachent aux excitations $+E$, $+I$. L'anche

est libre ou battante. Le résonateur est un tuyau cylindrique ou conique. On trouvera dans « *Instruments à vent* », de M. Bouasse, mes expériences sur les résonateurs proprement dits et sur les anches membraneuses.

2° L'excitation + E, position *b*, est la seule utilisée dans la facture instrumentale; je lui consacre le développement le plus long (1^{re} Partie).

Le résonateur est un bourdon cylindrique.

Soit, pour une pression donnée *p*, n_a la fréquence d'une anche + E, séparée du bourdon. Soit *l* la longueur variable du bourdon. En fonction de *l*, fréquences du système anche-bourdon, amplitudes de l'anche, débits à travers l'anche. On fait varier la pression, le diamètre et la réaction du bourdon.

Adaptons à un bourdon de longueur donnée, une anche de fréquence n_a variable. Fréquences du système en fonction de n_a . Sons propres, sons forcés, sons privilégiés. Application aux instruments à vent.

Mêmes recherches sur un bourdon conique ou tronconique.

Mêmes recherches sur l'anche + I (2^e Partie).

3° Dans une 3^e Partie, intitulée « Expériences diverses », j'étudie les cas suivants : bourdon à deux anches; anche associée à un tuyau ouvert aux deux bouts; anche associée à un tuyau et à un porte-vent; anche associée à un bourdon plus ou moins obturé au bout ouvert.

§ 3. — Souffleries, tuyaux, mesure des fréquences.

1° Des pressions de 0 à 800 mm. d'eau sont nécessaires.

Le plus simple est de placer l'anche dans sa bouche et de souffler. Ainsi faisait Weber. Certes il est incorrect *a priori* de procéder ainsi; cela revient à utiliser un résonateur porte-vent dont l'action sur l'anche peut ne pas être négligeable. Nous étudierons au paragraphe 31 l'influence du porte-vent et justifierons l'usage de la bouche comme soufflerie.

Au demeurant la bouche est la meilleure des souffleries à haute et basse pression : inutile d'ajouter qu'elle est la moins coûteuse. Il est d'ailleurs facile de mesurer la pression exercée sur l'anche, partant de la rendre constante pendant la courte durée d'une expérience. On soude sur le cadre un tube de 2 mm. de diamètre qui met en communication la cavité buccale avec un manomètre.

Comme autre soufflerie à haute pression, j'ai utilisé des bouteilles d'air comprimé d'une quarantaine de litres de capacité. L'industrie automobile (gonflement des pneus d'autos) les livre chargées à 200 kilos; un détendeur permet d'utiliser l'air à la pression désirée.

Les pressions usuelles de 0 à 200 mm. sont fournies par une soufflerie de petit

orgue, actionnée par un moteur électrique. On fait varier la pression en surchargeant plus ou moins les réservoirs.

La soufflerie à eau qui m'a servi à la mesure des débits (§ 14) est utilisable jusqu'à 500 mm. de pression.

2° Les anches utilisées sont quelconques : anches libres d'harmonium ou d'orgue — leur épaisseur, on le sait, n'est pas uniforme, — anches libres ou battantes constituées par une languette de laiton battu ou d'acier. Le talon de l'anche est solidement fixé sur le cadre au moyen d'un étau ; le cadre est l'une des mâchoires. Cet étau limite exactement la longueur de la partie vibrante. La rasette des facteurs d'orgue ne convient pas ; son défaut est de vibrer avec l'anche ; son effet varie avec l'amplitude, donc avec la pression et la réaction du tuyau. Avec cette rasette, l'anche n'est jamais comparable à elle-même.

Les anches en acier s'imposent pour l'étude des fortes pressions ; les baleines de corset en fournissent d'excellentes. Leur fréquence et leur bâillement restent les mêmes après une longue série d'expériences. Le bâillement des anches de laiton se modifie facilement ; bien pis, l'anche se brise souvent au niveau de la section d'encastrement.

3° Les tuyaux cylindriques sont des tubes de laiton étiré à paroi épaisse. On se les procure aisément chez les quincailliers. Une épaisseur de paroi inférieure à 1 mm. ne convient pas : la paroi vibre, les phénomènes sont profondément modifiés. Pour empêcher la caisse à vent et le tube de vibrer, je soude au tube, tout près de l'anche, un lourd anneau de plomb.

Les tuyaux coniques sont des tuyaux d'un jeu de trompette d'orgue.

4° Je détermine les fréquences au sonomètre. L'erreur sur les mesures, pour les fréquences comprises entre 50 et 2.000, n'excède pas 3 savarts.

PREMIÈRE PARTIE

ANCHE + E

CHAPITRE PREMIER

Anche de fréquence invariable, bourdon cylindrique de longueur variable.

§ 4. — Expériences et Schème de Weber.

1° Weber a longuement étudié le cas de l'anche libre. Voici une de ses expériences. Je transforme les pouces et les lignes de Paris en millimètres.

La languette de laiton (longueur 28,3 mm., largeur 5,6 mm., épaisseur 0,49 mm.) donne le sol₃, fréquence $n_a = 388$, lorsque, le talon encastré dans un étau, elle est pincée. Le tuyau a 12,3 mm. de diamètre. C'est un bourdon cylindrique; l'extrémité libre de l'anche est au niveau du tampon.

Weber met l'anche dans sa bouche et se sert des poumons comme soufflerie. Il ne spécifie pas la pression; mais on peut affirmer qu'il souffle toujours très fort, de manière à donner, quelle que soit la longueur du tuyau, un son intense, indépendant de la pression.

La demi-longueur d'onde $\lambda_a : 2$ correspondant à la fréquence 388 est 43,8 cm. (vitesse du son : 340 m.-sec.); le quart de longueur d'onde $\lambda_a : 4$, 21,9 cm.

Weber trouve que pour des longueurs l du tuyau, comprises entre 0 et 21,9 cm. (8 pouces 1, 6 lignes), le son du système anche-bourdon est à peu près celui de l'anche pincée. En réalité le son baisse, mais d'un petit intervalle : pour $l = 21,9$ cm. la fréquence est $n = 361,0$; l'abaissement, 31 savarts, un peu plus d'un demi-ton.

Au contraire, l croissant de 21,9 à 43,8 cm., $\lambda_a : 4 < l < \lambda_a : 2$, le son baisse beaucoup. La fréquence n du système est celle du fondamental du bourdon de longueur l , $n = V : 4l$.

Quand $l = 43,8$ cm. (16 pouces 3,3 lignes), brusquement apparaît le son $n = 387,8$. C'est le son n_a de l'anche pincée. On peut toutefois émettre le son du

bourdon $n = 193,3$; il est à l'octave grave de n_a . Allongeons de très peu le tuyau : on n'obtient que n_a .

Aux abaissements près, les phénomènes se répètent, l croissant.

De 43,8 cm. à 65,9 cm. (24 pouces 4,9 lignes), $\lambda_a : 2 < l < 3\lambda_a : 4$, le son est presque celui de l'anche pincée. La fréquence baisse de 387,8 à 365,2 : intervalle, 26 savarts.

De 65,9 à 87,6 cm. (32 pouces 6,6 lignes), $3\lambda_a : 4 < l < 2\lambda_a : 2$, le son est le partiel 2 du bourdon, $n = 3V : 4l$.

Quand $l = 87,6$ cm., on saute brusquement de ce partiel (283,5) au son de l'anche pincée (387,0). L'intervalle du saut est une quarte (3 : 4).

Pour des longueurs de tuyau comprises entre $2\lambda_a : 2$ et $5\lambda_a : 4$, $3\lambda_a : 2$ et $7\lambda_a : 4$,... Weber obtient à peu près le son n_a de l'anche pincée. Entre $5\lambda_a : 4$ et $3\lambda_a : 2$, $7\lambda_a : 4$ et $4\lambda_a : 2$, il sort les partiels 3, 4 du bourdon. Quand $l = 3\lambda_a : 2$, $4\lambda_a : 2$ le son de l'anche pincée sort brusquement. L'intervalle des sauts est 6 : 5, 8 : 7.

2° Dans sa « Dissertation latine », Weber donne les lois simples suivantes. Nous les appellerons *schème de Weber*.

Supposons l'anche libre.

On sait que, en l'absence de tout résonateur, la fréquence de l'anche libre + E (munie d'une rigole) est quasi-indépendante de la pression ; elle est égale à la fréquence de l'anche pincée. Nous verrons plus loin comment il faut modifier les énoncés pour l'anche battante.

Soit n_a la fréquence de l'anche pincée,

λ_a la longueur d'onde correspondante,

$l_a = \lambda_a : 2$ la longueur du tuyau demi-onde pour n_a .

On a la relation

$$n_a = V : 2l_a.$$

Plus généralement

$$n_a = (k + 1) \frac{V}{2(k + 1)l_a}, \quad k = 0, 1, 2, \dots;$$

n_a est le partiel $k + 1$ d'un tuyau ouvert aux deux bouts, de longueur $(k + 1)l_a$.

Supposons la longueur l du tuyau telle que

$$k\lambda_a : 2 < l < (2k + 1)\lambda_a : 4, \quad k = 0, 1, 2, \dots;$$

le système anche-bourdon émet le son n_a . Nous dirons que le bourdon ne réagit pas.

Pour

$$(2k + 1)\lambda_a : 4 < l < (k + 1)\lambda_a : 2,$$

le système donne le partiel $2k + 1$ du bourdon de longueur l .

La fréquence est

$$n = (2k + 1) \frac{V}{4l}.$$

Nous dirons que le bourdon réagit.

Les changements brusques de fréquence — sauts — ont lieu pour $l = (k + 1) l_a$.
Les deux sons possibles sont :

$$n_a = (k + 1) \frac{V}{2l}, \quad n = (2k + 1) \frac{V}{4l};$$

leur intervalle est

$$\frac{n_a}{n} = \frac{2(k + 1)}{2k + 1}.$$

Pour

$k = 0,$	$l = l_a,$	$n_a : n = 2 : 1,$	octave,
$k = 1,$	$l = 2l_a,$	$n_a : n = 4 : 3,$	quarte,
$k = 2,$	$l = 3l_a,$	$n_a : n = 6 : 5,$	tierce mineure, etc.

3° Dans le plan fréquences-longueurs, traçons les hyperboles $n = kV : 2l$ (trait interrompu), $n = (2k + 1)V : 4l$ (trait plein), $k = 0, 1, 2, \dots$ (*fig. 2*). Elles donnent en fonction des longueurs les fréquences des partiels des tuyaux cylindriques ouverts aux deux bouts ou bouchés à l'un des bouts. Donnons à ces hyperboles les noms de *nodales* (hyperboles des bourdons), et de *ventrales* (hyperboles des tuyaux ouverts), (on verra plus loin la raison de ces dénominations); k est leur numéro d'ordre. L'axe des fréquences et l'hyperbole $n = V : 4l$ sont la ventrale et la nodale 0; les hyperboles $n = V : 2l$, $n = 3V : 4l$ sont la ventrale et la nodale 1, etc.

Plus simplement nous utiliserons les notations plus expressives de nodales $\lambda : 4$, $3\lambda : 4$, ..., de ventrales $\lambda : 2$, $2\lambda : 2$, ..., rappelant que le tuyau est quart d'onde, trois-quart d'onde, demi-onde, deux demi-ondes du son émis par le système anche-résonateur.

Traçons la droite $n = n_a$; nous l'appellerons *palier* de l'anche pincée. Cette droite coupe le réseau des nodales et des ventrales aux points ABDEGHJ.

Le phénomène de Weber, réduit au schème, consiste à parcourir le tracé en gros trait ABCDEFGHIJ, composé de bouts de paliers et d'arcs de nodales.

§ 5. — Degrés de réaction du bourdon. Forme des courbes des fréquences. Accords.

1° Le schème de Weber, caractérisé par l'alternance régulière des sons de l'anche pincée et des partiels 1, 2, 3 ... du bourdon, ne représente pas tous les phénomènes de réaction. Les arcs de nodale peuvent être plus longs au détriment des paliers correspondants; ils peuvent être plus courts à l'avantage des paliers. Cas limites : les

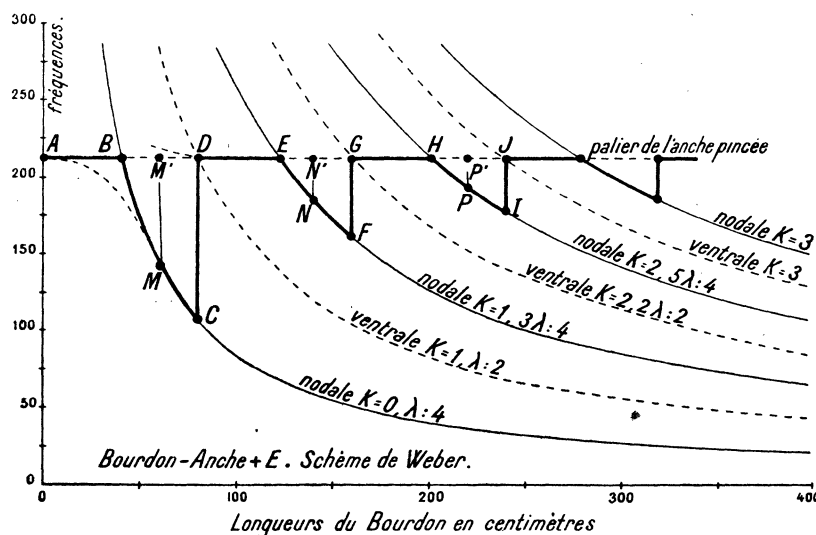


FIG. 2.

arcs de nodale peuvent se réduire à rien; la courbe des fréquences est le palier n_a . Inversement les paliers peuvent disparaître; la courbe des fréquences se réduit à une nodale. Cette nodale n'est pas nécessairement la nodale $\lambda:4$, $k=0$.

Le schème de Weber correspond donc à un phénomène moyen. D'où son importance. Mais ce n'est qu'un schème; il n'est jamais suivi avec rigueur.

En effet, on n'est jamais sur le palier; on est plus ou moins au-dessous. Weber le sait bien qui écrit « sonus tubi linguati sono linguæ æqualis est, si parvas differentias non curamus ». Il a consacré un long mémoire « Theorie der Zungenpfeifen » à ces « petites différences ». On ne prend les nodales que bien au delà de $\lambda_a:4$, $3\lambda_a:4$... Les points anguleux B, E, H, ... n'existent pas; on passe avec continuité d'un pseudo-palier à une courbe qui épouse à peu près la forme d'une nodale.

Quoi qu'il en soit, nous utiliserons les dénominations : sons de paliers, sons nodaux; leur signification sera, dans tous les cas, évidente.

2° En définitive, nous pouvons classer les phénomènes comme suit :

a) La réaction du tuyau est *moyenne* lorsque l'allure de la courbe des fréquences

est celle du schème de Weber : quasi-palier de o à $\lambda_a : 4$, nodale o de $\lambda_a : 4$ à $\lambda_a : 2$, brusque retour sur le palier pour $\lambda_a : 2$, etc.

b) La réaction est *forte* lorsque, au delà de $\lambda_a : 4$, on se maintient sur la nodale o quelle que soit la longueur du tuyau. Les retours sur le palier ne se font plus. Si l'on force la pression, on quitte la nodale o pour une nodale de numéro supérieur. Le système anche-bourdon fait alors entendre la douzième, la dix-septième du bourdon de longueur l .

c) La réaction est *faible* lorsqu'on décrit des nodales $o, 1, 2$ des arcs plus courts que les arcs correspondant au schème de Weber. Des points $M, N, P, \dots$ on saute brusquement sur le palier (points $M', N', P', \dots$). En réalité, on saute sur un son de fréquence plus aiguë que n_a . Plus faible est la réaction, et plus rapprochés de $\lambda_a : 4, 3\lambda_a : 4, \dots$ sont les points $M', N', \dots$

d) La réaction est *nulle* lorsque les points B, M et $M'; E, N$ et $N'; H, P$ et $P', \dots$ sont confondus. On décrit le palier n_a .

3° Nous supposons dans ce qui précède que le tuyau parle toujours, donnant tantôt un son de palier, tantôt un son nodal.

Mais alors que les sons de palier sortent avec des pressions très faibles de l'ordre du centimètre d'eau, les sons nodaux exigent pour se produire des pressions relativement fortes. Dans mes expériences, des pressions d'au moins 120 mm. sont nécessaires pour que le tuyau ne cesse de parler quel que soit le parcours. Il peut donc arriver, par suite d'une pression insuffisante, que le tuyau se taise pour des longueurs qui correspondent à des sons nodaux. Le *tacet* est, au même titre qu'un parcours nodal, une manifestation de la réaction du tuyau. Nous dirons que nous nous déplaçons sur une nodale, même lorsque le système est tacet.

4° De ce que nous venons de dire résulte que, pour certaines longueurs de tuyau, plusieurs régimes sont à la fois possibles : le palier n_a , les nodales k . En principe, ils ne jouissent pas d'une stabilité égale. A chaque pression correspond un régime de stabilité maxima. Mais le système n'adopte nécessairement pas ce régime.

Expliquons-nous sur un exemple. Soit p , la pression invariable; soit $\lambda_a : 2$, la longueur du tuyau. Supposons que, à droite de cette longueur, le régime n_a soit de stabilité maxima; à gauche, le régime nodal $n = V : 4l$.

Partons du régime n_a . Diminuons la longueur du tuyau, continûment, c'est-à-dire sans que l'anche ne cesse de parler. Pour cela, utilisons un tube à coulisse.

Le son n_a se maintient à gauche de $\lambda_a : 2$, bien que nous ne soyons plus dans les conditions de stabilité pour ce son. Mais un rien, une chiquenaude sur l'anche, fait brusquement apparaître le son du bourdon. Ce brusque changement de régime se produit d'ailleurs sans qu'on le provoque, lorsque le raccourcissement du tuyau atteint une valeur convenable.

Inversement, supposons-nous sur la nodale $\lambda : 4$. Allongeons continûment le tuyau. Nous pouvons conserver le son du bourdon après $\lambda_a : 2$.

Les régimes peuvent avoir des stabilités à peu près égales. On passe de l'un à l'autre par les procédés les plus divers : percussion sur l'anche, augmentation ou diminution momentanées de la longueur du tuyau, obturation momentanée du bout ouvert. Quand on souffle avec la bouche, on *accroche* les divers régimes en chantant la note convenable.

Si les régimes ont le même degré de stabilité, ils peuvent coexister.

C'est ainsi qu'on obtient aisément l'accord d'octave $n_a : n_a/2$, au voisinage de $\lambda_a : 2$; l'accord de quarte $n_a : 3n_a/4$ au voisinage de $2\lambda_a : 2$, etc.

Si le tuyau est long — 2 à 3 mètres — on peut obtenir un accord de trois et quatre sons où l'on reconnaît divers partiels du bourdon et parfois le son de l'anche pincée.

Supposons faible la réaction du tuyau. Le retour au palier se fait peu après $\lambda_a : 4$. L'intervalle du son du bourdon au son de palier est quelconque. Le système peut cependant émettre simultanément les deux sons.

Naturellement la coexistence de plusieurs régimes modifie la vibration de l'anche : elle n'est plus sinusoïdale. Quand les fréquences des sons de l'accord sont dans un rapport quelconque, cette vibration n'est plus périodique. Ce que montre la photographie.

Nous rencontrerons souvent l'émission simultanée de deux sons. Dans les tableaux d'expérience nous les signalerons en écrivant à côté des longueurs du tuyau le mot « Accord ».

5° Reste à dire les conditions d'une réaction forte, moyenne ou faible. L'expérience montre que l'intensité de la réaction dépend de l'excès de pression p qui agit sur l'anche et du rapport α de la surface de l'anche à l'aire de la section droite du tuyau.

Elle est d'autant plus grande que p et α sont plus grands.

Si $\alpha \geq 1$, quelle que soit la pression, la réaction est forte ; si la pression est inférieure à une certaine valeur, le système ne parle pas.

Si $\alpha < 1$, mais supérieur à une certaine valeur β de l'ordre du dixième, la réaction est forte ou moyenne suivant la force du vent. Avec les pressions usuelles, de 0 à 300 mm. d'eau, on n'obtient que le schème de Weber.

Si $\alpha < \beta$, les pressions usuelles donnent une réaction faible. De fortes pressions sont nécessaires pour obtenir les réactions moyenne et forte.

Si $\alpha = 0$, c'est-à-dire si l'anche est trop petite ou le tuyau de trop grand diamètre, quelle que soit la pression, la réaction est nulle.

6° Weber place l'anche au niveau du tampon. C'est ce que nous ferons nous-même pour des raisons de commodité. Mais nous verrons au paragraphe suivant que cette position n'a rien de nécessaire. L'expérience montre que, toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité de la réaction dépend de la distance de l'anche au tampon.

Une remarque : la réaction dépend de la pression. D'où la nécessité, contrairement à ce que faisait Weber, de faire les expériences avec une pression invariable.

Les réactions forte et nulle sont des cas limites. Cette étude a pour objet les cas intermédiaires.

Avant d'aborder le détail des phénomènes, voici deux expériences fondamentales pour la théorie (§§ 6 et 7).

§ 6. — Anche à distance du tampon du bourdon. Réaction moyenne.

Quand le bourdon réagit, l'allure des phénomènes est indépendante de la position de l'anche par rapport au tampon.

Soit l'anche parfaitement libre (§ 8) de fréquence pincée $n_a = 203,0$.

Elle a 46 mm. de long, 6 mm. de large.

La demi-longueur d'onde correspondant à cette fréquence est 83,7 cm., la vitesse du son V étant prise de 340 mètres à la seconde. Une remarque en passant : dans les calculs je donnerai toujours cette valeur à cette vitesse. La température moyenne du laboratoire est 16°.

Associons l'anche à un bourdon de 16 mm. de diamètre, sans l'intermédiaire d'une rigole.

Vu le diamètre, négligeons les corrections aux bouts : les longueurs de tuyau demi-onde et onde pour n_a seront 83,7 et 167,4 cm.; les longueurs quart d'onde et trois quarts d'onde seront 41,8 et 125,4 cm.

Faisons varier la longueur l du bourdon de telle sorte que le milieu de l'anche soit toujours à égale distance du tampon et du bout ouvert. Faisons parler l'anche avec une pression invariable de 120 mm. d'eau.

l longueur du bourdon	n , fréquence	$\frac{\lambda}{4} = \frac{V}{4n}$	
27,0 cm.	197,0		
40,6	194,7		
42,6	187,6		$\lambda_a : 4 = 41,8 \text{ cm.}$
47,0	177,2	47,9 cm.	
60,0	138,5	61,3	
72,4	117,5	72,3	
84,3	101,0	84,1	
89,0	96,0	88,5	$\lambda_a : 2 = 83,7 \text{ cm.}$
89,5	200,1		

C'est le schème de Weber dans presque toute sa rigueur.

La fréquence ne baisse vraiment qu'à partir de $\lambda_a : 4$. Alors le tuyau donne le fondamental du bourdon : la comparaison des colonnes l et $V : 4n$ le démontre.

Une particularité : avec la pression utilisée nous revenons au palier après $\lambda_a : 2$; corrélativement le saut est supérieur à une octave. De plus, le son de palier est légèrement plus grave que l'anche pincée.

Voici les fréquences pour $\lambda_a : 2 \leq l \leq 2\lambda_a : 2$.

l	n	$\frac{3\lambda}{4}$	
89,5 cm.	200,1		
92,0	199,9		
107,0	199,9		
121,0	197,0		$3\lambda_a : 4 = 125,4$ cm.
135,4	185,0		
155,2	163,7	155,7 cm.	
165,6	153,6	165,9	$2\lambda_a : 2 = 167,4$ cm.
166,0	199,9		

Comparons les fréquences 203 (anche pincée) et 153,6. L'intervalle est 121 savarts, à peu près une quarte (125 savarts) comme le veut le schème de Weber. Remarquons cependant que le saut se fait sur la fréquence 200 : le saut réel n'est que de 114 savarts.

2° Soit $l = 60$ cm., longueur pour laquelle le système donne le son du bourdon $n = 138,5$.

Déplaçons l'anche vers le tampon : la fréquence demeure invariable. Déplaçons l'anche vers le bout ouvert : brusquement, quand le milieu de l'anche est à 13,5 cm. de ce bout, la fréquence saute de 138,5 à n_a , fréquence de l'anche pincée. L'anche se trouve alors à 40,6 cm. du tampon.

Plaçons dans le tuyau une sonde reliée à une capsule manométrique; regardons la flamme dans un miroir tournant.

Soit le son du bourdon $n = 138,5$. La sonde indique un nœud au tampon, un ventre au bout ouvert. Promenons la sonde du bout ouvert au tampon. Les dents, vues dans le miroir, d'abord peu accusées, s'allongent progressivement. Fait capital : le passage de la sonde dans la région de l'anche ne se traduit par aucune modification brusque de la flamme. Au tampon, les dents sont acérées et séparées par du noir.

Mêmes résultats, quelle que soit la position de l'anche sur le tuyau, lorsque le bourdon réagit.

3° Soit $l = 89,5$ cm. La fréquence est voisine de celle de l'anche pincée.

Le tuyau résonne, puisqu'on voit des dents au miroir tournant. Mais quelle que soit la position de la sonde ou de l'anche, les dents restent petites, informes : la résonance est très faible et de nature assez vague. Où placer en effet le nœud et les ventres de l'onde stationnaire λ_a , puisqu'au bout ouvert existe nécessairement un ventre, au tampon un nœud. On constate d'ailleurs que l'agitation de la flamme est plus faible du tampon à l'anche que de l'anche au bout ouvert.

Cas particulier : l'anche est au tampon. La sonde indique un nœud au milieu du tuyau, un ventre au bout ouvert *et à l'anche*. La résonance est assez forte. Le résultat n'est pas contradictoire. Le tuyau n'est plus nécessairement un bourdon.

Laissons l'anche au tampon. Allongeons le tuyau.

De $\lambda_a : 2$ à $3\lambda_a : 4$, la fréquence du système change peu, partant l'onde proposée au tuyau. Le tuyau résonne de plus en plus; l'agitation de la flamme augmente. Le nœud médian se rapproche du bout ouvert, ainsi que le ventre V_a qui primitivement se trouvait à l'anche.

A partir de $3\lambda_a : 4$, sur l'anche se trouve un nœud de l'onde stationnaire. Nous retombons sur le 2°. Déplaçons l'anche vers le ventre V_a . Tant que l'anche est assez

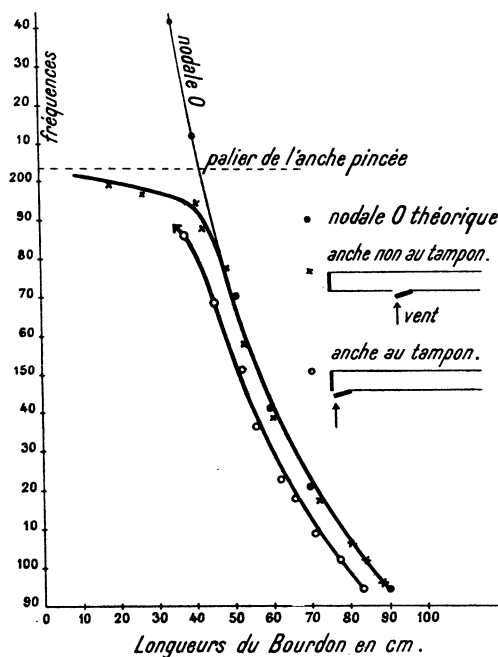


FIG. 3.

éloignée de ce ventre, la fréquence du système est indépendante de la position de l'anche. On entend le partiel 3 du bourdon. Au voisinage de V_a nous sautons brusquement sur le son de l'anche pincée. Plaçons l'anche de l'autre côté de V_a . Nous retrouvons le partiel 3; nous le conservons jusqu'au voisinage du bout ouvert.

4° Pour la simplicité de l'exposé, nous avons dit que, à partir de $\lambda_a : 4$, le son était celui du bourdon (nodale 0), que la fréquence était indépendante de la position de l'anche.

C'est vrai tant que l'anche n'est pas trop près du tampon (fig. 3). Au tampon le son est plus grave. La courbe des fréquences ne se confond pas avec la nodale 0; elle est décalée vers la gauche. Pour l'anche et le tuyau utilisés dans les expériences de ce paragraphe, le décalage est de 6 cm. en moyenne. Le tuyau est donc plus court que le quart d'onde du son émis : l'anche introduit une correction *additive*, indépendante de la fréquence.

La théorie indique la nécessité et le sens de ce décalage. Mais pour le mettre en

évidence, il est nécessaire d'utiliser, comme nous l'avons fait, une anche libre et une colonne d'air de section assez petite et uniforme. Nous verrons en effet que pour l'anche libre et une grande section, pour les anches battantes, le décalage est pratiquement nul. Bien mieux, le décalage peut se faire vers la droite quand on utilise une rigole, que l'anche soit libre ou battante. Le système anche-rigole introduit une correction *soustractive* indépendante de la fréquence. Le tuyau compté à partir du tampon de la rigole est plus long que le quart d'onde du son émis.

5° Pour bâtir une théorie simple du phénomène de Weber, réduit au schème, il faut donc supposer l'anche à distance du tampon.

L'anche n_a propose au bourdon l une onde de longueur $\lambda_a = V : n_a$. Quelle que soit sa longueur, le bourdon répond. Mais il résonne avec l'intensité maxima, quand un ventre de l'onde coïncide avec le bout ouvert, un nœud avec le tampon. L'onde vérifie alors les conditions aux bouts.

L'expérience montre que la résonance est encore intense quand le nœud se loge dans le tuyau, à une distance du tampon inférieure à $\lambda_a : 4$. Nous dirons que dans ces conditions le nœud est *réel*. Quand cette distance est $\lambda_a : 4$, le tuyau est demi-onde pour n_a . La résonance est nulle; elle impliquerait l'existence d'un ventre au tampon.

Résumons. La résonance est nulle ou faible pour les longueurs du bourdon comprises entre 0 et $\lambda_a : 4$, $\lambda_a : 2$ et $3\lambda_a : 4$, ..., longueurs pour lesquelles un ventre *réel* de l'onde λ_a est au voisinage du tampon; elle est intense pour les longueurs comprises entre $\lambda_a : 4$ et $\lambda_a : 2$, $3\lambda_a : 4$ et $2\lambda_a : 2$, pour lesquelles un nœud *réel* se trouve au voisinage du tampon.

Quand la résonance est faible, la fréquence de l'anche n'est pas modifiée; la réaction du bourdon est nulle.

Quand elle est intense, le bourdon impose sa fréquence à l'anche. Le mécanisme de la réaction serait le suivant : le nœud de l'onde λ_a est attiré par le tampon, d'où, un allongement de l'onde, partant un abaissement du son. L'onde ainsi créée impose à l'anche la fréquence d'un partiel du bourdon.

Voilà pour le schème de Weber. Mais quand la réaction est forte, l'attraction du tampon peut s'exercer sur le nœud de λ_a le plus voisin du bout ouvert, bien que un ou plusieurs ventres séparent ce nœud du tampon. Le système anche-bourdon émet alors, quelle que soit la longueur du tuyau, le fondamental du bourdon.

§ 7. — Anche entretenue par un électro. Vent nul. Réaction faible.

1° La caractéristique de l'anche + E est de parler sans résonateur. Seule une rigole est nécessaire. Associons l'anche à un résonateur : le vent entretient l'anche sans le

secours de l'onde stationnaire créée dans le résonateur. L'onde se borne à modifier la fréquence de l'anche.

Supprimons le vent. Entretenons l'anche par un électro. D'après notre définition, l'anche est encore + E. L'expérience suivante met en évidence la modification de la fréquence par l'onde stationnaire.

2° Au tampon d'un bourdon, adaptons une anche libre de fréquence pincée n_a . On constate que, quelle que soit la longueur du tuyau, l'anche écartée de sa position d'équilibre, puis lâchée brusquement, donne le son n_a . L'action du tuyau se borne à renforcer le son $2n_a$, octave aiguë de n_a , quand $l = \lambda_a : 4$; le son n_a , quand $l = \lambda_a : 2$.

Entretenons électriquement l'anche : mêmes phénomènes.

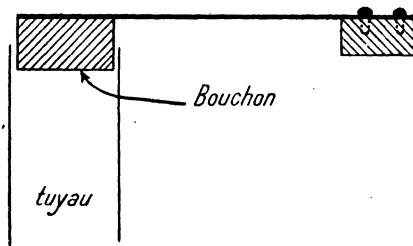


FIG. 4.

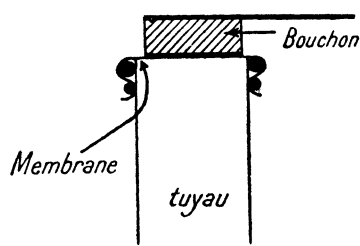


FIG. 5.

Déplaçons une sonde dans le tuyau; on vérifie qu'il résonne toujours. Au bout ouvert existe un ventre; à l'anche se trouve n'importe quoi, mais jamais un nœud.

Lorsque $l = \lambda_a : 4$ ou $\lambda_a : 2$, l'anche est à un ventre de l'onde stationnaire correspondant à $2n_a$ ou à n_a . L'agitation dans le tuyau est maxima. Pinçons l'anche : l'amortissement est minimum.

Mêmes résultats avec le dispositif de la figure 4, que l'anche soit entretenue ou non. La liaison de l'anche et du tuyau est insuffisante pour que la réaction soit possible.

Mais introduisons de l'huile entre le bouchon et la paroi du tuyau : la fréquence de l'anche varie avec la longueur du tuyau; la réaction a lieu. Malheureusement l'huile, même épaisse, est projetée; l'étanchéité est de courte durée.

On tourne ainsi la difficulté. Bouchons le tuyau avec de la feuille anglaise très peu tendue; collons le bouchon à la membrane. Entretienons l'anche.

L'anche est en acier (longueur 47 mm., largeur 6 mm., épaisseur 0,4 mm.).

Sa fréquence pincée (avec la surcharge et sans résonateur) est $n_a = 185,0$.

D'où

$$\lambda_a : 4 = 45,9 \text{ cm.}, \quad \lambda_a : 2 = 91,9 \text{ cm.}$$

Le tuyau a 16 mm. de diamètre.

La figure 6 donne la courbe des fréquences, $0 < l < \lambda_a : 2$. Elle se compose de deux branches, l'une AB au-dessous, l'autre CD au-dessus du palier n_a . La branche CD se continue à droite de $\lambda_a : 2$ par un arc A'B' homologue de l'arc AB.

Pour $l = 51,5$ cm., deux fréquences sont possibles. L'aiguë est privilégiée; une chiquenaude sur l'anche fait sauter de $n = 149,8$ à $n = 200,5$. Le son grave est d'ailleurs très faible.

Nous retrouverons les deux branches AB, CD avec l'entretien par le vent, et une

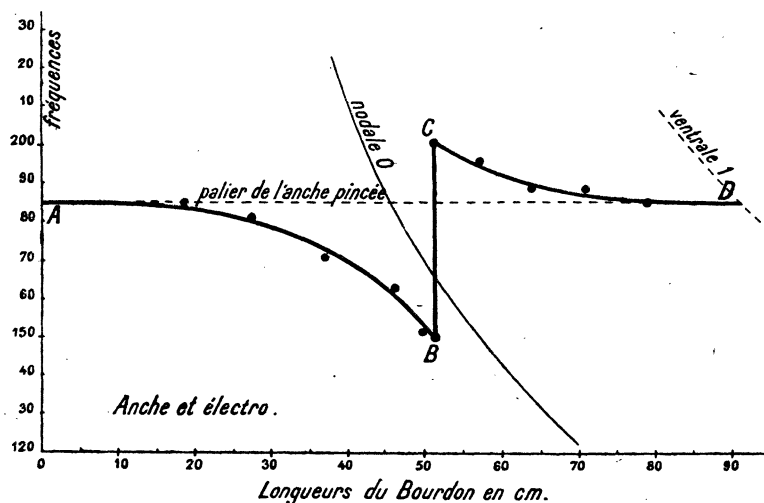


FIG. 6.

réaction faible du bourdon. Avec une réaction forte ou moyenne, seule existe la branche AB. Elle se continue d'ailleurs par la nodale 0.

Nous verrons que la courbe des fréquences de l'anche + I se réduit à la branche CD pour les réactions faibles et moyennes. Quand la réaction est forte la courbe se confond avec la nodale 0. En aucun cas on n'obtient le palier des branches AB, A'B'.

Nous connaissons l'allure des phénomènes; étudions le détail.

§ 8. — Anche parfaitement libre.

L'anche est parfaitement libre quand lumière et anche ont même longueur. Nous étudierons plus loin le cas où la lumière est plus courte que l'anche.

Pour simplifier les phénomènes, la section de la colonne d'air sera parfaitement uniforme du tampon au bout ouvert.

Donc, pour allonger ou raccourcir la colonne d'air, on s'interdira de faire coulisser l'un dans l'autre deux tuyaux de diamètres nécessairement différents.

Le cadre de l'anche sera soudé sur la paroi même du tuyau. On sait que dans les tuyaux d'orgue, l'anche n'est pas soudée sur le tuyau : elle est portée par une rigole de plus petit diamètre. Nous verrons au paragraphe 9 l'influence de cette rigole.

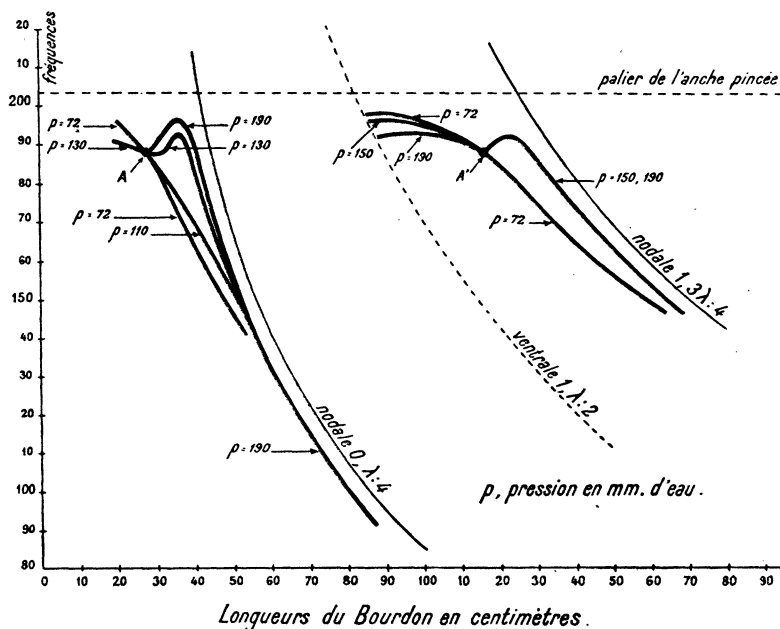


FIG. 7.

Pour annuler l'action du porte-vent, nous utiliserons une caisse de grand volume ($42 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$).

L'anche est une languette de laiton battu d'épaisseur uniforme (longueur 46 mm., largeur 6 mm., épaisseur 0,25 mm.).

Épaisseur du cadre, 1 mm. Levée de l'anche, 0,51 mm.

Fréquence pincée $n_a = 203,0$.

Les tuyaux ont 16, 40, 80 mm. de diamètre. L'anche est au voisinage du tampon.

Pour permettre la discussion théorique des phénomènes, je donne les tableaux complets des expériences.

Tuyau de 16 mm. (fig. 7).

$$n_a = 203,0.$$

$$\lambda_a : 4 = 41,8 \text{ cm.}, \quad \lambda_a : 2 = 83,7 \text{ cm.}, \quad 3\lambda_a : 4 = 125,6 \text{ cm.}, \quad 2\lambda_a : 2 = 167,5 \text{ cm.}$$

1°

Pression 28 mm.

l , longueurs du tuyau	n , fréquences	Observations.
5,8 cm.	200,5	Mêmes fréquences ou tacet pour
19,9	194,1	des pressions inférieures à 28 mm.
25,8	189,2	L'intensité du son décroît à
27,8	185,5	mesure que l augmente. Le son
29,6	184,0	d'abord criard, s'assourdit pro-
33,7	179,1	gressivement.

Pour $l > 33,7$ cm., le tuyau se refuse à parler, quels que soient les moyens utilisés pour accrocher la vibration de l'anche.

Le tuyau reparle pour $l = 85,5$ cm.; mais il est *lent à parler* : l'anche ne vibre qu'un long instant — de l'ordre d'une dizaine de secondes — après que, sur la face E, l'on a créé l'excès de pression. Le son est faible, voilé. Il faut donner 89,0 cm. à l pour que le tuyau soit *prompt à parler* : l'anche vibre aussitôt que sur la face E, l'on a créé l'excès de pression. Le son est fort, le timbre criard.

La fréquence est 197 pour $l = 85,5$ cm.; 198,1 pour $l = 89,0$. La hausse est légère; elle n'échappe pas à l'auditeur averti.

Le son réapparaît donc avec une fréquence inférieure à celle de l'anche pincée.

La demi-onde de $n = 198,1$ (son d'intensité maxima) est 85,8 cm.; c'est la longueur de réapparition du son; c'est aussi bien un point de la ventrale 1.

Anticipons sur les résultats qui vont suivre.

On ne revient jamais au son de l'anche pincée; le son de retour est d'autant plus grave que la pression est plus forte; corrélativement le palier commence à partir de longueurs de tuyau de plus en plus grandes. Le son, d'abord faible et voilé, monte légèrement avant de sortir fort et criard.

Pour $l = 84$ cm., le tuyau ne parle pas. Mais tout en envoyant du vent, écartons l'anche de sa position d'équilibre et lâchons-la brusquement. On entend le son métallique de l'anche pincée. Le tuyau ne répond pas. Il ne s'ensuit pas que son action soit nulle : en effet, l'amortissement de l'anche est amoindri. Le son peut s'entendre 3 secondes et plus. L'amortissement est d'autant plus faible, l'anche vibre d'autant plus longtemps que le tuyau est plus proche de la longueur pour laquelle l'entretien de l'anche par le vent est possible.

Mêmes phénomènes sans vent; les amortissements sont plus grands qu'avec vent.

Voici la suite de l'expérience $p = 28$ mm.

l	n	
85,5	197,0	son faible, timbre voilé.
89,0	198,1	son intense, timbre criard.
96,8	196,4	Progressivement l'intensité du son diminue, le timbre s'assourdit.
104,6	193,6	
110,4	190,3	
115,7	187,1	
121,5	182,0	
126,1	179,1	

Pour l plus grand, tacet.

2°

Pression 72 mm.

L'amplitude de l'anche + E est d'autant plus grande que la pression est plus forte et la réaction du tuyau plus faible. Pour ne pas modifier le bâillement de l'anche, je commence les expériences à partir de $l = 19,9$ cm.

l	n	l	n
19,9	195,3	41,0	161,4
25,8	191,4	44,1	154,3
29,6	185,5	46,9	152,2
32,6	180,0	50,7	143,4
35,4	173,1	53,7	140,2
37,6	168,7	pour l plus grand, tacet.	

Le son 140,2 est émis par saccades au rythme de deux par secondes; allongeons le tuyau de quelques millimètres : le rythme des saccades se ralentit; puis c'est le tacet.

l	n	l	n
87,4	196,0 lent à parler.	131,4	174
88,0	196,0 moins lent à parler.	141,0	164,5
90,9	198,7 prompt à parler.	152,3	153,2
99,3	194,7	163,2	146,5 par saccades.
108,9	193,6	de 163,2 à 173,4	tacet
116,8	189,7	173,4	196,2 lent à parler.
123,4	183,0	175,8	197,0

Comparons 87,4 cm. et 173,6 cm., longueurs pour lesquelles la fréquence (retour au palier) est $n = 196,0$. Leur différence est 86 cm. C'est précisément la demi-onde du son 196.

Les courbes des fréquences $p = 28$, $p = 72$ mm. sont, à peu de chose près, des arcs d'une même courbe. De cette courbe, située fort au-dessous du palier n_a et de la nodale 0, nous décrivons des arcs d'autant plus longs que la pression est plus forte.

3°

Pression 110 mm.

l	n	l	n
19,9	194,7	36,7	172,6
25,8	190,8	39,5	170,0
27,8	187,0 Point A.	43,4	163,7
29,6	186,1	49,2	151,2
33,7	182,0	57,1	134,2

Pour $l > 57,1$, tacet.

La courbe des fréquences, d'abord confondue avec les courbes $p \leq 72$ mm., passe légèrement au-dessus d'elles à partir d'un point A de coordonnées $n = 187,0$, $l = 27,8$ cm. Nous allons voir que toutes les courbes p se coupent en ce point. Conséquence : donnons au tuyau 27,8 cm. La fréquence est indépendante de la pression. Pour cette longueur le tuyau est *expressif*.

Pour toutes les courbes $p \leq 110$ mm., l'abaissement de la fréquence est continu. Le son d'abord criard et fort, comme l'est celui d'une anche sans résonateur, devient progressivement faible et sourd; le timbre est alors celui d'un bourdon.

4° A partir de $p = 120$ mm., les courbes changent d'allure. Elles présentent un minimum : le point A.

A droite de ce point elles se redressent assez brusquement, passent par un maximum, puis redescendent le long de la nodale 0, sans toutefois se confondre avec elle. Nous avons vu, au § 6, que la courbe des fréquences était parallèle à la nodale 0 et décalée vers la gauche de 6 cm. environ.

Fait capital : les maxima ont une abscisse commune $l = 36$ cm. Cette longueur du système anche-bourdon est quart d'onde pour le son n_a de l'anche pincée. En effet, ajoutons à cette longueur 6 cm., décalage moyen de la courbe des fréquences : nous obtenons le $\lambda_a : 4$ théorique.

Il est dès lors facile d'expliquer le brusque relèvement des courbes. Peu important les raisons de l'abaissement du son entre 0 et $l = 27$ cm. Nous verrons, au § 19, que l'harmonique 2 de l'onde λ_a joue nécessairement un rôle dans cet abaissement. Il est évident que si la pression et la réaction sont fortes le schème de Weber doit jouer (au décalage près) à partir de $\lambda_a : 4$: le système anche-bourbon doit alors donner le son le plus voisin de l'anche pincée.

On verra que les maxima sont d'autant plus rapprochés du palier n_a que la pression est plus forte. Le timbre des maxima est éclatant, et ne rappelle en rien le son criard de l'anche sans résonateur : nous savons que le tuyau résonne alors avec une intensité maxima.

A gauche de A, les courbes sont d'autant plus au-dessous du palier n_a que la pression est plus forte. Conséquence : les courbes $p \geq 120$ se croisent en ce point.

En définitive, nous avons à droite et au voisinage de A deux faisceaux de courbes nettement distincts : $p \leq 120$ mm., $p \geq 120$ mm. Ces faisceaux ne se rejoignent que loin sur la nodale.

D'où le phénomène suivant :

Donnons au tuyau 36 cm. Faisons croître la pression à partir de 0. Le son commence avec la fréquence 168, monte et se fixe un instant sur $n = 175$; le timbre est sourd. Brusquement, lorsque la pression est de 130 mm. environ, la fréquence saute à $n = 192$. Le saut est de 40 savarts. Le timbre est subitement devenu éclatant.

Mêmes phénomènes de part et d'autre et au voisinage de $l = 36$ cm.

Les deux faisceaux de courbes se rejoignent vers $l = 50$ cm.; p croissant, le son monte peu; le timbre demeure voilé.

Le point A de croisement des courbes a été signalé par Weber : aussi bien nous sommes-nous placés dans les mêmes conditions expérimentales. Mais ce point ne se retrouvera pas dans des conditions autres. La remontée des courbes au voisinage de la longueur quart d'onde pour n_a est au contraire un fait général.

5°

Pression 130 mm.

l	n		l	n
			33,7	191,4
19,9	191,9		35,5	193,0
25,8	189,4		36,7	193,6
27,8	187,1	Point A.	39,5	186,1
28,7	188,1		41,6	177,2
29,6	187,6		46,3	162,6
30,8	188,1		56,0	138,1
32,0	187,6		69,8	113,1
32,6	187,6		83,5	95,3

6°

Pression 150 mm.

l	n		l	n
			41,0	182,5
19,9	193,0		44,1	171,7
25,8	191,9		47,0	163,7
27,8	187,1	Point A.	50,7	154,0
30,8	191,4		54,7	141,6
32,6	193,6		60,0	131,1
33,7	195,7		69,9	113,8
35,5	196,2		77,6	102,1
38,5	194,7		82,6	97,8
39,4	190,8		85,4	93,7

Pour $l = 86,6$ cm., on obtient l'accord 100,2 — 200,4, sons à l'octave exacte l'un de l'autre. 200,4 est presque le son de l'anche pincée; par contre 100,2 n'appartient pas à la courbe des fréquences; il est bien plus aigu; il appartiendrait plutôt à la nodale théorique. Quoi qu'il en soit, les deux régimes nodale, palier, pour la pression et la longueur considérées, ayant la même stabilité, coexistent; mais ils s'accroissent de telle sorte que l'onde dans le tuyau et la vibration de l'anche ont une constitution périodique.

L'accord est agréable, le son bien étoffé. Lorsque les fréquences sont dans un rapport quelconque le son est *rauque, roulant* (on entend comme des battements).

l	n	l	n
86,6	100,2 et 200,4	144,3	167,4
88,5	197,0	151,7	160,2
89,6	197,0	159,6	152,6
105,5	192,7	165,4	148,2
120,4	190,4	169,2	144,0
128,3	187,6	172,7	150,0 et 200,1 Accord.
133,7	180,5	175,8	194,7 son voilé.
139,1	174,0	178,6	194,7 son clair.

L'accord 150,0 — 200,1 est une quarte juste.

$n = 150,0$ appartiendrait à la nodale théorique 1. Nodale et palier s'accordent : la vibration de l'anche est périodique.

7°

Pression 190 mm.

l	n		l	n
27,9	188,9	Point A.	41,9	184,0
30,9	190,3		44,7	172,6
32,6	193,0		52,7	148,2
33,7	194,7		63,0	124,9
35,5	195,3		76,8	100,2
37,3	193,6		86,9	91,0
38,4	193,6			
38,9	192,5		89,9	192,3

Pour cette pression au voisinage de $\lambda_a : 2$ on n'obtient pas d'accord.

l	n		l	n
105,8	192,5		123,4	190,8
115,4	189,2		126,4	190,3
116,7	187,6	Point A'.	128,5	188,6
118,6	189,7		135,7	179,6
120,6	193,0		156,2	154,3 etc.

Nous retrouvons un point A' de croisement de toutes les courbes p . En ce point, la fréquence est indépendante de la pression. Cette fréquence est celle de A, $n = 187,3$. Corrélativement la distance $\overline{AA'}$ est 88,9 cm. C'est à peu de chose près la demi-onde du son $n = 187,3$.

Insistons sur ce fait. Donnons aux diverses courbes, relatives à une même pression, les numéros des ventrales et nodales correspondantes. Les courbes 1, 2, 3, ... se déduisent point par point de la courbe 0, en portant 1, 2, 3, ... fois à droite de chaque point de fréquence n , la demi-onde $\lambda : 2 = V : 2n$ relative à cette fréquence.

Les courbes $p = 150$, $p = 190$ mm. sont confondues à droite de A'. A gauche,

la courbe $p = 190$ est très au-dessous de la courbe $p = 150$. Pour $l = 90$ cm., l'intervalle entre ces deux courbes est de 14 savarts (plus d'un quart de ton).

Au contraire à gauche de ce point, les courbes $p \leq 150$ mm. sont pour ainsi dire confondues.

Tuyau de 40 mm.

Pour le tuyau de 16 mm. les phénomènes sont assez compliqués. Ils se simplifient quand on adapte l'anche à un tuyau de plus grande section.

Les points de croisement A, A' n'existent pas. Entre 0 et $n_a : 4$ les courbes ne présentent ni maximum, ni minimum. On passe d'un palier, d'autant plus grave que la pression est plus forte, à la nodale théorique 0.

Le décalage vers la gauche est quasi nul.

Le tuyau parle avec des pressions plus faibles. Une expérience avec $p = 10$ mm. est possible.

Pression 10 mm.

l	n	l	n
16,4 cm.	203,0	40,2	196
26,8	201,7	de 40,2 à 84,0	tacet.
37,0	200,5	84,0	202,5

On ne quitte pour ainsi dire pas le palier n_a .

Pression 28 mm.

l	n	l	n
16,4	198,7	40,0	193,0
26,9	199,3	42,1	187,1
36,8	194,4	de 42,1 à 84,6	tacet.
84,6	199,5 très faible.	130,1	188,1
86,6	200,2 intense.	138,7	186,1
99,9	198,7	de 138,7 à 169,3	tacet.
123,8	196,0	169,3	199,9 très faible.

Pression 170 mm.

l	n	l	n
16,4	193,0	45,1	182,2
26,8	194,1	48,0	171,0
34,8	191,4	64,5	129,0
37,0	191,9	79,5	104,5
40,2	186,6	etc.	

Le palier est très au-dessous du palier n_a . Par contre les sons nodaux, sont vraiment des sons nodaux ; je veux dire par là que le décalage vers la gauche est nul. En effet, admettons une correction de 16 mm. (les huit dixièmes du rayon) au bout ouvert du bourdon ; nous retrouvons par le calcul les nombres expérimentaux.

Les sons nodaux sont très beaux ; leur timbre est celui de la clarinette. Avec le tuyau de 16 mm. les sons nodaux ont le timbre sombre des bourdons.

Tuyau de 80 mm.

1° Les dimensions de la section droite permettent de placer l'anche comme l'in-

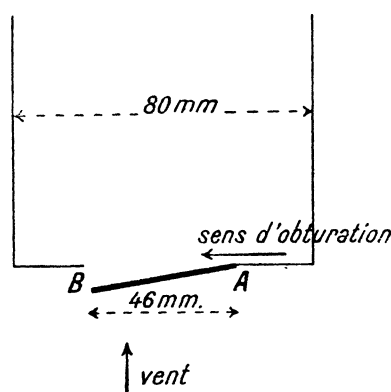


FIG. 8.

dique la figure 8. Le rapport α des aires de l'anche et de la section droite est 0,03.

Suivant la pression, la réaction du tuyau est moyenne, faible ou nulle.

Soit $p = 10$ mm. Quelle que soit la longueur, l'anche parle avec la fréquence n_a . Notons cependant une légère baisse au voisinage de $l = 39$ cm., longueur quart d'onde pour n_a (voir plus loin).

Soit $p = 170$ mm. Nous décrivons le palier n_a pour $0 < l < 39$ cm., puis la nodale 0. Le schème de Weber est presque rigoureusement suivi.

l	n	l	n
20,5	199,3	48,3	165,3
30,0	198,1	70,0	116,0
38,8	196,0	74,8	105,0 et 202,0 Accord.
		78,0	203,0

Le rapport des fréquences 105 et 202 est quelconque. Le son roule désagréablement.

On entend des accords analogues entre 74,8 et 78,0 cm.

$n = 105$ n'appartient pas à la nodale 0. C'est un fait général : l'accord modifie

légèrement les fréquences des sons constitutants, alors même que l'accommodation soit nulle (vibration de l'anche non périodique).

A partir de 78 cm., le son est pur. Nous sommes sur le palier n_a .

Déterminons l_a , longueur de tuyau demi-onde pour n_a .

Les expériences $l = 48,3$, $l = 70,0$ cm. donnent, pour la correction ε au bout ouvert, 3 cm. environ. D'où $l_a = \lambda_a : 2 - \varepsilon = 80,7$ cm. (la longueur quart d'onde est $\lambda_a : 4 - \varepsilon = 38,8$ cm.; voir plus haut).

Le palier apparaît donc un peu avant l_a . La réaction est faible.

Diminuons la pression; le palier apparaît de plus en plus avant l_a .

Pour $p = 100$ mm. et $l = 74,8$ cm., on a déjà le son 203,0 pur.

2° Que le retour au palier dépende du rapport α est démontré par les expériences suivantes :

Choisissons une pression et une longueur de tuyau telles que le tuyau réagisse. Soit $p = 170$ mm., $l = 48,3$ cm., $n = 165,3$.

Le tuyau parlant, obturons progressivement la lumière AB de l'anche. Pour cela, déplaçons une lourde lame de plomb sur la face intérieure du cadre, du talon A de l'anche à son extrémité libre B. Lorsque la surface s de la lumière est réduite à 40 mm² (longueur d'anche découverte 10 mm.), brusquement apparaît le son n_a . Le rapport des aires n'est plus que 0,008.

Faisons l'expérience inverse. Supposons la lumière obturée comme précédemment, et le son n_a émis. Débouchons la lumière; n_a sonne toujours. Lorsque $s = 80$ mm², brusquement $n = 165,3$ apparaît.

Ces expériences prouvent l'existence de deux régimes pour des aires de lumière comprises entre 40 et 80 mm².

Les nombres donnés n'ont rien d'absolu. On aurait d'autres valeurs si l'on diminuait la largeur de la lumière au lieu de sa longueur.

§ 9. — Emploi d'une rigole.

1° Dans la facture instrumentale, le cadre est soudé, non sur la paroi latérale du tuyau, mais sur un tuyau de petit diamètre, appelé rigole, long comme le cadre. Cette rigole s'adapte au bout d'un tuyau de plus grand diamètre. On réalise donc un bourdon à cheminée.

Il est faux de dire que, si la cheminée est courte devant la longueur du tuyau, son influence sur les phénomènes est nulle. Un nouveau facteur intervient : le rapport μ de la section droite de la rigole à la section droite du tuyau.

L'expérience montre que, toutes choses égales d'ailleurs, la rigole diminue la réaction du tuyau : pour avoir les mêmes phénomènes que sans rigole de plus fortes

pressions sont nécessaires. Corrélativement, pour les pressions usuelles — de 0 à 300 mm. — la règle est le retour au palier avant la longueur de tuyau demi-onde pour n_a .

2° Cette longueur demi-onde l_a , comptée à partir du tampon de la rigole, dépend d'ailleurs de μ .

Pour $\mu = 1$ (section droite uniforme du tampon au bout ouvert), l_a est égal à la demi-onde théorique $\lambda_a : 2 = V : 2n_a$, diminuée de la correction ε au bout ouvert. On a donc $l_a < \lambda_a : 2$.

Pour $\mu < 1$, on a $l_a = \lambda_a : 2 - \varepsilon + \beta$.

β est la correction due à la rigole : elle est de signe contraire à ε . Dans la pratique β est plus grand en valeur absolue que ε . D'où $l_a > \lambda_a : 2$.

Il est facile de calculer la correction β .

Soit l une longueur de tuyau donnant un son nodal n . Ce son est reconnaissable à son timbre, à son indépendance à l'égard de la pression. De la relation $V : 4n = l - \varepsilon + \beta$, on tire β ; ou mieux, pour écarter toute hypothèse sur la valeur de ε , la valeur de $\beta - \varepsilon$.

Pour des valeurs assez petites de μ , β peut être égal à la longueur de la rigole. Tout se passe comme si le tampon était au bout du tuyau de grand diamètre.

3° Le retour sur le palier se fait sur une courbe analogue à la branche CD du paragraphe 7 (anche et électro). On prend cette courbe en un point d'autant plus à gauche de l_a que la pression est plus forte.

4° Entre 0 et la longueur quart d'onde pour n_a existent deux faisceaux de courbes I et II, séparés par une certaine valeur de p . Les courbes I (faibles pressions) descendent et se rapprochent progressivement de la nodale 0. Les courbes II (fortes pressions) descendent d'abord; à partir d'une longueur L , la même pour toutes les courbes, elles se redressent vers le palier n_a , passent par un maximum, redescendent et se confondent avec la nodale.

Ces deux faisceaux ne se croisent pas en un point A. D'autre part, contrairement à ce qui a été dit pour l'anche sans rigole, les courbes II sont au-dessus des courbes I. A droite de L les deux faisceaux sont nettement séparés. Si, pour une longueur donnée, on fait croître la pression à partir de 0, la fréquence saute brusquement de plusieurs savarts : le timbre doux, voilé (faisceau I), devient subitement éclatant (faisceau II).

Expériences.

Anche en acier (longueur 38 mm., largeur 4,6 mm., épaisseur 0,5 mm.) surchargée au bout libre. $n_a = 178,4$, $\lambda_a : 2 = 95,5$ cm.

Le cadre est soudé sur une rigole, de diamètre 12 mm., de longueur 6,7 mm. Sa section droite, plus petite qu'un cercle de 12 mm. de diamètre, a 100 mm². La surface de l'anche est de 175 mm².

1° Tuyau de 16 mm. $\mu = 0,5$.

a) Détermination de $l_a = \lambda_a : 2 + \beta - \alpha$, longueur demi-onde pour n_a .

l longueur du tuyau (comptée à partir du tampon de la rigole).	n , fréquence. Sons nodaux, $p > 170$ mm.	$\frac{\lambda}{4} = \frac{V}{4n}$	$\beta - \alpha = l - \frac{\lambda}{4}$
59,3 cm.	147,5	57,6 cm.	1,7 cm.
68,0	128,2	66,4	1,6
75,0	116,0	73,2	1,8
83,4	104,2	81,5	1,9
87,0	99,6	85,4	1,6

Soit 1,7 cm. la valeur de $\beta - \alpha$;
d'où

$$l_a = 95,5 + 1,7 = 97,2 \text{ cm.}$$

Ce que confirme l'expérience. Sans doute 97,2 cm. n'est pas la longueur de retour au palier (voir ci-après); mais c'est la longueur pour laquelle le tuyau parle avec le plus de facilité : avec des pressions infimes, de l'ordre de 2 mm. d'eau, le tuyau parle « avec promptitude ».

De même on trouve expérimentalement que les longueurs deux demi-ondes, trois demi-ondes sont 193 et 288 cm. Ces nombres vérifient les égalités suivantes :

$$97,2 + 95,5 = 192,7 \text{ cm.}, \quad 192,7 + 95,5 = 288,2 \text{ cm.}$$

b) Retour au palier. Branche CD (§ 7).

Pour $l \geq 76$ cm., le tuyau peut émettre soit le son nodal n , soit un son n' plus aigu que n_a .

Dans le tableau suivant, je donne pour diverses longueurs de tuyau, les pressions minima nécessaires à l'émission du son nodal et du son de palier. Au voisinage de $l = 76$ cm., il faut des pressions considérables pour faire parler l'anche sur la branche CD : d'où une modification profonde de la levée moyenne de l'anche qui pourrait faire croire à la transformation de l'anche de + E en + I (voir § 16).

Fait à noter : sur la branche CD la fréquence est indépendante de la pression.

l , longueur du tuyau.	Sons nodaux.		Branche CD.	
	n , fréquences.	p , pressions minima.	n'	p minimum.
76,0 cm.	114,0	160 mm.	201,7	360 mm.
83,9	106,3	160	187,6	300
86,6	104,6	160	186,1	180
87,9	pour $l \geq 87,9$ cm., le tuyau ne donne plus que les sons de palier.		185,0	110
89,4			182,5	50
92,3			179,5	15
94,4			179,5	10
95,5			179,0	10
97,8			178,0	2

Pour $l = 94,4$ cm. et $p = 10$ mm., le tuyau est très lent à parler : le retard est de l'ordre de 20 secondes.

Pour $l = 95,5$ cm. et $p = 10$ mm., le retard n'est que de 5 secondes.

Pour $l = 97,8$ cm. et $p = 2$ mm., le tuyau est prompt à parler : le retard est nul.

Le timbre de la branche CD, d'abord voilé comme celui d'un bourdon, devient criard au voisinage de l_a .

Nous retrouvons une branche CD avant la longueur deux demi-ondes 192,7 cm.

Branche CD.

l	n'	p minimum.
184,7	180,0	160 mm.
186,7	180,0	60
189,6	179,1	20
193,0	178,0	2

c) *Accords.* — On entend l'accord d'*octave* pour les valeurs de l comprises entre 80 et 88 cm. ; l'accord de *quarte* au voisinage de 184 cm. ; l'accord de *tierce mineure* au voisinage de 284 cm. Ces intervalles sont rigoureusement justes. Le son ne roule pas. L'accommodation baisse le son nodal; le son de palier (branche CD) ne bouge pas.

Ainsi pour certaines longueurs, suivant la pression on peut obtenir soit le son nodal, soit le son de palier, soit les deux à la fois. Bien mieux, en modifiant la pression on peut dans l'accord faire prédominer l'un des deux sons. D'où les déformations curieuses de la vibration de l'anche.

2° Tuyau de 40 mm. $\mu = 0,07$.

La rigole est longue de 8,4 cm.

a) Détermination de l_a .

l	n	$\frac{\lambda}{4} = \frac{V}{4n}$	$\beta - \varepsilon = l - \frac{\lambda}{4}$
	Sons nodaux.		
59,6 cm.	161,0	52,8 cm.	6,8 cm.
63,2	151,0	56,2	7,0

Prenons pour $\beta - \varepsilon$ la valeur moyenne 6,9 cm. Posons que la correction au bout ouvert est 1,6 cm. (les $8/10$ du rayon). On a :

$$\beta = 6,9 + 1,6 = 8,5 \text{ cm. ;}$$

c'est précisément la longueur de la rigole.

Est-il correct de dire, comme nous l'avons fait pour le tuyau de 16 mm., que la longueur demi-onde est $\lambda_a : 2 + \beta - \varepsilon$, c'est-à-dire $95,5 + 6,9 = 102,4$ cm. ? L'expérience ne peut décider. Il faut tenir compte en effet de la faible réaction du tuyau. Les phénomènes (fréquences, amplitudes, débits) sont les mêmes pour toutes les longueurs de tuyau comprises entre 84 et 106 cm.

b) *Retour au palier. Branche CD.*

La longueur quart d'onde pour n_a est :

$$\lambda_a : 4 + \beta - \alpha = 54,6 \text{ cm.}$$

A partir de $l = 65$ cm., les sons de palier sortent facilement.

l	Sons nodaux.		Sons de palier.	
	n	p minima.	n	p minima.
62,0 cm.			181,0	400 mm.
63,2	151	140 mm.	180,5	330
65,4			180,0	40
73,1			180	10
etc.				

On remarquera la chute assez brusque de la pression minima.

c) *Accords.*

On les obtient pour les longueurs de tuyau comprises entre 62 et 65 cm. Les sons nodaux et de palier sont dans un rapport quelconque. La vibration de l'anche n'est plus périodique. Le son roule.

§ 10. — Anche battante.

1° Pour l'anche libre, la périodicité des phénomènes est réglée par la fréquence de l'anche pincée. Cela tient à ce que, en l'absence de tout résonateur, la fréquence de l'anche est indépendante de la pression.

Au contraire, pour les anches battantes la fréquence de l'anche sans résonateur dépend essentiellement de la pression. Soit n_{ap} la fréquence pour la pression p . La périodicité est réglée par cette fréquence. Cela ne veut pas dire que la fréquence n_a de l'anche pincée ne joue aucun rôle dans les phénomènes.

2° *Courbe des fréquences sans résonateur.* — Pour donner une idée de l'énorme variation de la fréquence avec la pression, voici une expérience.

L'anche de laiton a les caractéristiques suivantes :

longueur 22 mm., largeur 6,4 mm., épaisseur 0,22 mm.

Pincée, elle donne le son $n_a = 166$.

Pression p .	Fréquence n_{ap} .	p	n_{ap}	p	n_{ap}
36 mm.	$166 = n_a$	190	242	400	540
42	192	230	270	490	654
54	203	260	327	530	726
90	216	285	363	610	864
160	228	340	432	etc.	

Pour $p < 36$ mm. l'anche ne parle pas; la levée (1,5 mm.) est trop grande.

Pour $p = 36$ mm., l'amplitude est de 1 mm. : la levée de la position moyenne est celle de l'anche sans vent. Le choc sur le cadre ne se produit pas. Tout se passe comme si l'anche était libre : la fréquence est celle de l'anche pincée.

Pour $p > 200$ mm. la variation de n_{ap} est quasi linéaire.

L'intervalle entre les sons 166 et 864 est de 716 savarts (plus de 2 octaves et 2 tons). On pourrait, en forçant la pression, monter bien plus haut sans que l'anche se colle contre le cadre.

On comprend qu'avec une anche battante *sans résonateur variable* on puisse jouer des airs (musique des réparateurs de parapluies) ou produire les appels déchirants, imitant la sirène, des receveuses de tramways.

L'anche est ordinairement associée à un cornet formant pavillon.

Anche battante sans rigole (fig. 9).

La section de la colonne d'air est uniforme d'un bout à l'autre du tuyau.

Tuyau de 16 mm.; anche en laiton (longueur 37 mm., largeur 9,3 mm., épaisseur 0,43 mm.).

Fréquence de l'anche pincée $n_a = 163,0$ $\lambda_a : 2 = l_a = 105,2$ cm.

1°

Pression 22 mm.

$n_{ap} = 180,0$		$\lambda_{ap} : 2 = 94,4$ cm.	
l	n	l	n
6,0 cm.	180,0	111,4	163,3 lent à parler.
11,0	176,1	121,6	161,0
18,8	162,5	135,9	156,4
27,9	156,4	pour l plus grand	
de 28,8 à 111,4	tacet.		tacet.

Le tuyau ne veut parler qu'à partir de $l = 111,4$ cm., longueur supérieure à la demi-longueur d'onde de l'anche pincée. On se serait attendu à ce qu'il parlât dès $l = 94$ cm., longueur demi-onde pour n_{ap} .

2°

Pression 53 mm.

$$n_{ap} = 192,5 \quad \lambda_{ap} : 2 = 88,3 \text{ cm.}$$

l	n	l	n
6,0	192,5	110,0	176,0 lent à parler.
11,0	186,0	114,3	175,1
18,8	178,4	127,9	163,3
28,8	161,0	132,1	159,0
35,0	150,6	145,8	151,7
de 42,8 à 110	tacet.	au delà	tacet.

Le tuyau parle de lui-même à partir de $l = 110$ cm. Raccourcissons le tuyau au moyen d'une coulisse; il continue de parler jusqu'à $l = 103,8$. Pour cette longueur, la fréquence est $n = 182,9$. Il est impossible de faire parler l'anche avec un tuyau plus court. On le voit, nous sommes bien au delà de $\lambda_{ap} : 2$.

3°

Pression 94 mm.

$$n_{ap} = 206,0 \quad \lambda_{ap} : 2 = 82,5 \text{ cm.}$$

l	n	l	n
6,0	206,0	110,0	188,0
11,0	202,7	121,7	172,4
20,2	183,9	142,5	155,4
24,2	178,4	160,3	141,2
28,2	166,7	169,3	136,8
34,1	161,7	de 170 à 215	tacet.
36,2	153,1	215,0	176,0
40,4	146,9	225,0	169,2
42,5	140,9	etc.	
48,2	130,8		
de 52,5 à 110	tacet.		

Soit $l = 110$ cm., $n = 188,0$.

En utilisant une coulisse, on peut raccourcir le tuyau jusqu'à $l = 97,5$ cm., $n = 200,2$.

Soit $l = 215$ cm., $n = 176$; on peut raccourcir le tuyau jusqu'à $l = 200,6$ cm., $n = 184,5$.

4° Plus forte est la pression et plus les courbes des fréquences se rapprochent des nodales théoriques. Ainsi avec la pression $p = 196$ mm., on obtient à partir de $l = 80$ cm. des sons nodaux. Rappelons ce qui les distingue : timbre de clarinette ou de bourdon, fréquence indépendante de la pression.

Pression 196 mm.

l	n	l	n
32,2 cm.	184,0	59,0	127,8
45,9	149,8	64,9	120,2
51,1	139,5	77,8	107,2
		etc.	
		110,0	201,0

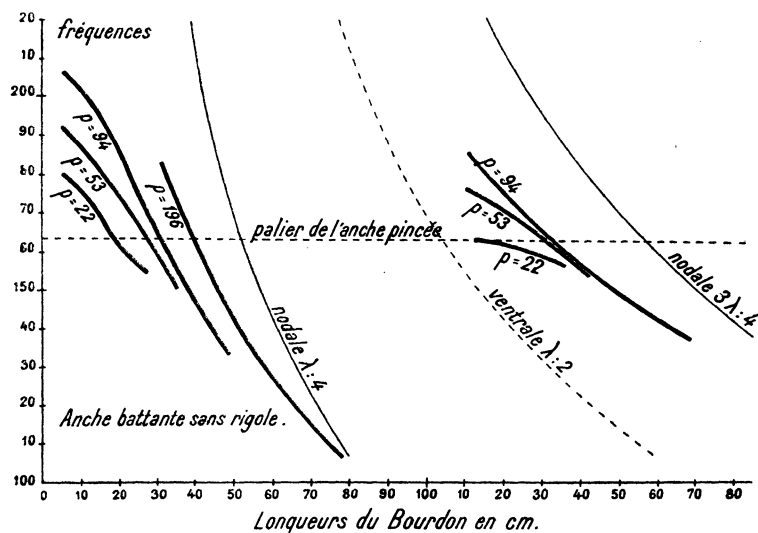


FIG. 9.

5° Conclusion : Quelle que soit la pression, le tuyau ne parle avec facilité qu'au delà de $\lambda_a : 2$.

Il ne faudrait pas ériger ce résultat en loi générale. Le phénomène dépend essentiellement de la réaction du tuyau. Nous verrons, au § 12, qu'en utilisant une rigole, le son réapparaît sur les ventrales quand $l = \lambda_{ap} : 2$, $2\lambda_{ap} : 2$.

§ 11. — Théorie de la clarinette.

Dans la clarinette l'anche est battante, le tuyau cylindrique, la section droite uniforme. Pour supprimer le désagréable cliquetis de l'anche métallique, toujours audible de près, l'anche est taillée dans une lame de roseau. L'épaisseur diminue du talon à l'extrémité libre.

Les surfaces de l'anche, et de la lumière, sont le plus grand possible; leurs largeurs sont de l'ordre du diamètre du tuyau; d'où une réaction intense du tuyau.

Voici les caractéristiques de la clarinette en *ut* du laboratoire : tuyau, diamètre 14 mm.; lumière, largeur 10 mm., longueur 30 mm.

L'anche est de 3 mm. plus large que la lumière. Sa longueur utile est de 35 mm. L'épaisseur au talon est de 1,5 mm.; à l'extrémité libre, 0,1 mm.

Tout comme pour les anches métalliques, et aussi aisément, on détermine la fréquence n_a de ces anches de roseau. Chose curieuse, toutes les anches du commerce, pour les clarinettes en *ut* et en *si^b*, donnent un son pincé compris entre *la₄* et *sol₄*. Weber trouvait les mêmes fréquences aux anches de son temps.

Le problème de la clarinette est le suivant :

On veut que la fréquence soit indépendante de la pression, en d'autres termes que l'instrument soit expressif. Quelle doit être la longueur minima du tuyau?

Soit une anche de roseau $n_a = 774$ (*sol₄*), $\lambda_a : 2 = 21,8$ cm. et un tuyau de 14 mm. Faisons varier la longueur du tuyau, opérons à diverses pressions. Nous traçons des courbes analogues à celles du paragraphe précédent.

Avec des pressions de 150 à 300 mm. d'eau (pressions usitées dans la pratique instrumentale), nous sommes sur la nodale $\lambda : 4$ à partir de $l = 12$ cm. La clarinette est donc utilisable à partir de cette longueur.

Allongons le tuyau, conservons à la pression une valeur supérieure à 150 mm.: nous nous déplaçons sur la nodale $\lambda : 4$ et ne revenons jamais à ce que, par extension, nous appelons toujours le palier. On peut ainsi donner au tuyau 2 mètres de long sans que l'émission du fondamental du bourdon présente de difficulté. Remarquons toutefois qu'il est possible, en diminuant la pression, d'émettre le palier quand la longueur du bourdon est voisine de $\lambda_a : 2$, $2\lambda_a : 2$, etc. Les clarinettistes savent qu'il est des longueurs de leur instrument favorables au « canardage ».

Pour $l > 2$ mètres, l'émission pure du son $V : 4l$ est difficile, sinon impossible. On sort en même temps le partiel 2 du bourdon. Pour des longueurs plus grandes du tuyau, on sort l'accord des 3, des 4 premiers partiels du bourdon.

Dans l'accord, les partiels n'ont pas nécessairement la même intensité. Au voisinage de $l = 2$ m., le fondamental est *nominal*; l croissant, son intensité diminue, tandis que celle du partiel 2 augmente. Peu à peu ce partiel devient nominal. Puis c'est au tour du partiel 3 et ainsi de suite.

Quand le tuyau est trop long, l'accord ne renferme que les partiels d'ordre supérieur. On ne peut émettre les partiels graves.

En donnant à la pression une valeur convenable, il est possible, pour une série de valeurs de l , d'émettre un nominal pur. On décrit ainsi un arc de nodale d'ordre supérieur.

Sur les petites longueurs, $12 \text{ cm.} < l < 100 \text{ cm.}$ (longueurs utilisées dans la facture instrumentale), il est difficile, même en forçant la pression, de sortir

autre chose que le fondamental. Mais soufflons avec la bouche, et chantons la douzième, la dix-septième du fondamental; nous les accrochons sans peine. Leur son est pur.

Accrochons un partiel supérieur; sans cesser de souffler, faisons varier l ; nous décrivons la nodale de ce partiel.

Plus simplement ouvrons un petit trou (2 mm.) sur la paroi du tuyau au tiers de la longueur à partir de l'anche, c'est-à-dire au niveau du ventre du partiel 2 du bourdon. Ce partiel 2 sort directement; l'accrochage est inutile.

Sans modifier la distance du petit trou à l'anche, allongeons ou diminuons le tuyau. A condition de forcer le vent, et de ne pas exagérer l'allongement ou le raccourcissement du tuyau, le partiel 2 sort avec facilité.

Dans la clarinette on utilise ce petit trou (trou de quintoisement) pour donner les douzièmes des fondamentaux (pour quinter, disent les musiciens).

De même, ouvrons un petit trou au niveau d'un ventre du partiel 3; on émet ce partiel avec facilité, sans qu'il soit nécessaire de l'accrocher en chantant.

On peut donc émettre tous les partiels du bourdon. Conclusion : l'anche + E peut donner des sons plus aigus que sa fréquence pincée n_a , ou que sa fréquence n_{ap} (anche sans résonateur, pression p).

Emploi d'une anche libre.

Remplaçons l'anche de roseau par une anche libre assez large pour que la réaction du bourdon soit forte.

On émet avec assez de facilité les divers partiels du bourdon, même quand le tuyau est demi-onde, deux demi-ondes du son de l'anche pincée.

Ces partiels peuvent être bien plus aigus que le son de l'anche pincée.

Soit $n_a = 196,0$ (sol₂), $\lambda_a : 2 = 86$ cm.; soit un tuyau de 14 mm.

$$l = 86 \text{ cm.}$$

$$l = 2 \times 86 \text{ cm.}$$

p	n		p	n	
de 0 à 250 mm.	196	palier n_a , sol ₂	de 0 à 150 mm.	196	palier n_a , sol ₂
400 à 620	98	nodale 0 sol ₁	150 à 400	49	nodale 0 sol ₁
620 à 800	294	— 1 ré ₂	400 à 600	147	— 1 ré ₂
au-dessus de 800	490	— 2 si ₂	au-dessus de 600	245	— 2 si ₂

§ 12. — Anche battante avec rigole (*fig. 10*).

1° Nous retrouvons les phénomènes de l'anche libre avec rigole : diminution de la réaction du tuyau, correction soustractive à la rigole β .

Mais dans le cas de l'anche battante l'influence de la rigole quant à la correction ne s'exerce pas nécessairement. D'où, pour chaque pression, deux courbes distinctes, A et B, suivant que la correction β joue ou pas. Que les deux régimes A et B existent est prouvé par l'émission simultanée de sons qui manifestement n'appartiennent pas à la même courbe.

Les courbes A (correction nulle) existent dans les régions du palier; les courbes B (correction soustractive) sont des courbes nodales.

La diminution de la réaction du tuyau se traduit par le retour sur le palier avant les longueurs demi-onde pour l'anche pincée. Conséquence : soit n_{ap} le son de l'anche sans résonateur pour la pression p . Le son n_{ap} reparait avec les longueurs demi-onde pour n_{ap} .

2° Expériences.

Anche de laiton (longueur 32 mm., largeur 10 mm., épaisseur 0,37 mm.).

Fréquence de l'anche pincée $n_a = 196$, $\lambda_a : 2 = 86,6$ cm.

Rigole : diamètre 10 mm., longueur 11 cm.

Tuyau : diamètre 16 mm.

Pression 106 mm.

$$n_{ap} = 253,6 \quad \lambda_{ap} : 2 = 67,3 \text{ cm.}$$

l cm.	n_A	n_B		
11,0 rigole seule.	253,6			
26,6	223,4			
28,7	210,5			
32,3	191,5			
34,3	185,5			
36,7	180,4			
37,3	Accord. 180,4	— 237,1	$\frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4n}$	$\beta - \varepsilon = l - \frac{\lambda}{4}$
40,1		226,5	35,8 cm.	1,5 cm.
43,1		216,5	37,5	2,6
45,9		209,8	39,2	3,9
48,0		199,6	40,5	5,4
50,5		192,0	42,6	5,4
53,5		179,7	44,2	6,3
56,3		171,5	47,2	6,3
de 56,3 à 71,2 tacet			49,5	6,8

La correction β augmente avec la longueur. Le nœud tend à se mettre au bout du tuyau de grand diamètre.

Pour les longueurs supérieures à $l = 71,2$ cm., voir la figure 10.

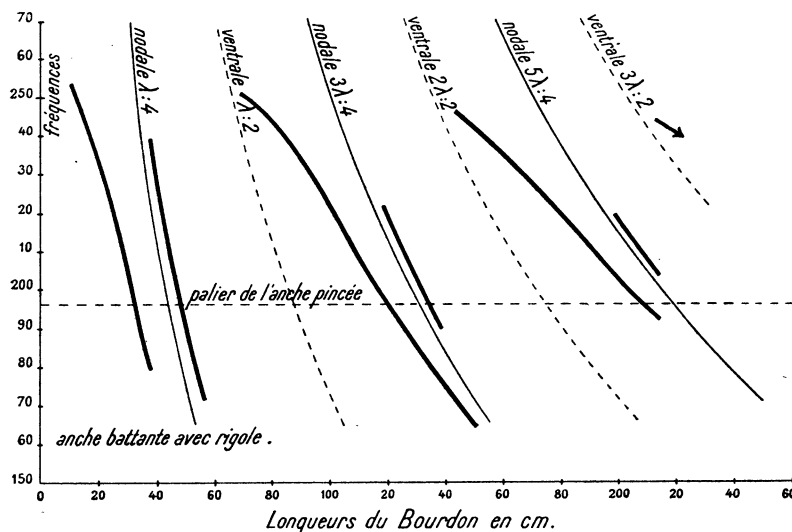


FIG. 10.

Signalons les accords :

l	n
117,1 cm.	197,2 — 221,5
119,4	193,2 — 218,2
122,4	190,4 — 213,2
125,2	189,1 — 207,8
131,7	184,0 — 197,8
137,5	176,0 — 190,1

§ 13. — Anche semi-battante (fig. 11).

1° Nous avons étudié le cas de l'anche parfaitement libre : les surfaces de la lumière et de l'anche sont égales.

La lumière des anches d'orgue est plus courte que la languette. En voici la raison. On sait que pour les accorder on se sert d'une rasette qui délimite une longueur plus ou moins grande de la partie vibrante. Pour produire son effet il est nécessaire que la rasette applique une section de la languette contre la partie pleine du cadre. L'anche au voisinage de la section encastree est donc battante. Conséquence : la fréquence de l'anche sans résonateur dépend de la pression ; de plus, cette fréquence est supérieure à celle de l'anche pincée.

Je crois utile de montrer la réaction du tuyau sur une anche semi-battante et

même de compliquer les phénomènes en utilisant une rigole. Le lecteur qui referait les expériences avec une telle anche serait surpris par la complexité des phénomènes.

Tout peut s'expliquer par ce que nous savons des anches battantes et des rigoles.

Comme pour les anches battantes nous avons des courbes A (correction à la rigole nulle) et des courbes B (correction à la rigole soustractive). A et B ont l'allure

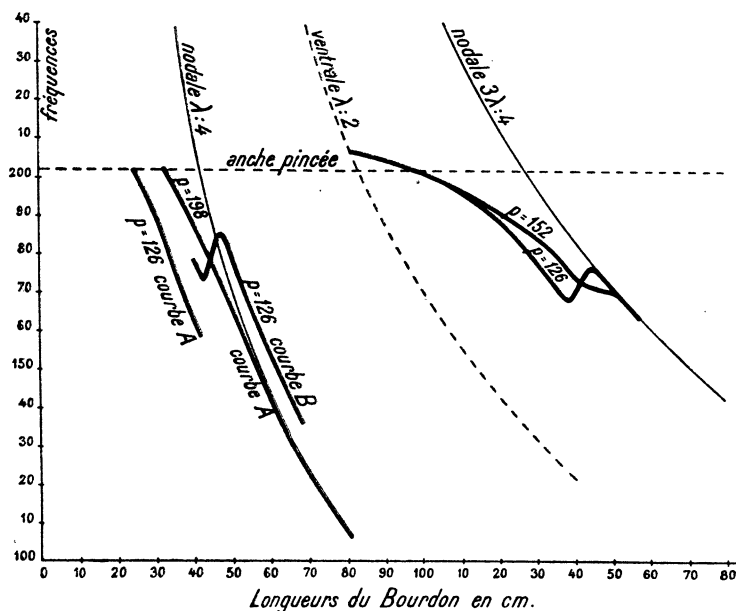


FIG. 11.

des courbes de l'anche parfaitement libre. A et B peuvent coexister et donner des accords. Les courbes B disparaissent lorsque la pression est forte et le tuyau long.

Anche (longueur 45 mm., largeur 4 mm., épaisseur : au talon 0,5 mm., à l'extrémité libre 0,2 mm.).

Longueur de la lumière : 35 mm.

Différence des longueurs lumière-languette : 10 mm.

Fréquence de l'anche pincée $n_a = 201,2$, $\lambda_a : 2 = 84,4$ cm.

Rigole : diamètre 11 mm., longueur 6,8 cm.

Tuyau : diamètre 16 mm.

Rapport des aires (rigole : tuyau) $\mu = 0,5$.

La figure donne les courbes $p = 126$, 152 et 198 mm.

Phénomènes entre 0 et $\lambda_a : 2$. — Pour les pressions $100 < p < 170$ mm. les courbes se composent des deux branches A et B. On saute brusquement de la branche A à la branche B. Chose curieuse, par rapport à A, B est décalé vers la droite de 6 cm.

environ. C'est la longueur de la rigole. La partie nodale de B est décalée vers la droite de la nodale théorique. Pour $p < 100$, $p > 170$ mm., seule existe la branche A. Elle est toujours à gauche de la nodale théorique et d'autant plus rapprochée d'elle que la pression est plus grande. En particulier, pour $p = 198$ mm., le décalage vers la gauche est nul.

Phénomènes entre $\lambda_a : 2$ et $2\lambda_a : 2$. — Les courbes se réduisent à la branche A. Le décalage vers la gauche est quasi nul. Le retour au palier se fait sur un son $n > n_a$.

CHAPITRE II

Débits. Amplitudes.

§ 14. — Mesure des débits.

Voici le principe de l'appareil. Dans un grand flacon à tubulure inférieure, envoyons de l'eau par le bas. L'air du flacon est chassé par le goulot : sa vitesse d'écoulement, la pression dans le flacon sont fonction de la vitesse d'ascension du plan d'eau. Supposons cette vitesse d'ascension uniforme entre deux sections droites

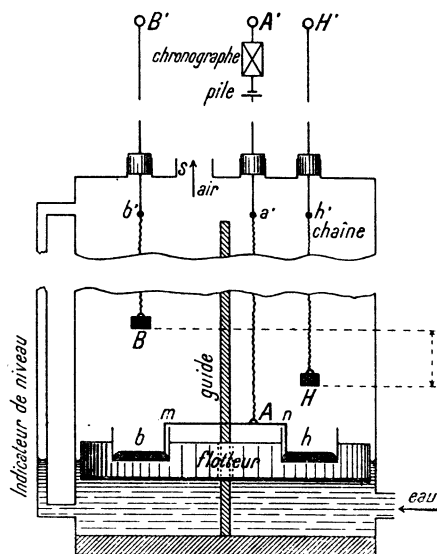


FIG. 12.

du flacon ; l'écoulement du volume d'air V compris entre ces deux sections se fera à pression constante. Déterminons le temps t que met le plan d'eau pour passer de l'une à l'autre section ; le débit est l'inverse de ce temps, à un facteur constant près.

L'appareil est réalisé ainsi (*fig. 12*). Une cuve cylindrique en tôle de fer galvanisée, haute de 80 cm., de diamètre 32,6 cm., reçoit par un tuyau de 40 mm. de diamètre l'eau d'une bouche d'arrosage. La pression dans la conduite est d'une dizaine de mètres d'eau. Un robinet, placé sur la conduite au voisinage de la cuve, permet de régler l'arrivée de l'eau.

Il ne faudrait pas croire qu'à une ouverture donnée du robinet correspondît pour l'air une vitesse d'écoulement uniforme ; ou, ce qui revient au même, une vitesse

d'ascension du plan d'eau uniforme. La vitesse d'ascension diminue beaucoup avec cette ascension. Peu importe d'ailleurs. Pour maintenir constante la pression de l'air dans la cuve il suffit d'ouvrir progressivement le robinet. Pour faciliter la manœuvre, pour éviter toute brusquerie dans l'admission de l'eau, le robinet est actionné par un long levier (60 cm.).

Il ne faut choisir les deux sections droites limitant le volume V ni trop écartées l'une de l'autre, ni trop éloignées du fond de la cuve. Dans le premier cas, la manœuvre du robinet prend trop d'importance, dans le second, la pression maxima réalisable est trop faible. D'autre part il ne faut pas les trop rapprocher du fond; lorsqu'on ouvre le robinet l'eau se précipite violemment dans la cuve: d'où un bouillonnement tumultueux; dans ces conditions on ne saurait parler de plan d'eau.

Pour calmer cette agitation, on fait flotter sur l'eau un disque épais de bois, de diamètre légèrement inférieur à celui de la cuve. Ce flotteur est guidé dans son ascension par une tige.

Ce flotteur sert en même temps aux mesures. Il porte deux larges godets b et h contenant du mercure. b et h sont reliés à la borne A' par un circuit électrique comprenant le fil mn , la chaîne métallique Aa' , une source de courant et l'électro d'un chronographe à plume.

Les sections limitant le volume V sont déterminées par les poids de laiton B et H suspendus chacun au bout d'une chaîne métallique Hh' , Bb' . Ces poids sont respectivement à 22 et 29 cm. du fond de la cuve; d'où pour V , 7 litres environ. B et H sont reliés aux bornes B' , H' .

Connectons les bornes $A'H'$. Le flotteur en montant ferme le contact Hh ; d'où une inscription sur la bande du chronographe. Rompons aussitôt le contact AH' ; connectons $A'B'$; le contact Bb donne une nouvelle inscription.

Sur la bande du chronographe on inscrit en même temps la seconde: d'où la mesure du temps qui s'écoule entre les contacts hH et bB .

En S , on place une boîte à vent parfaitement étanche.

Un indicateur de niveau, un manomètre relié à la boîte à vent complètent l'installation.

§ 15. — Courbe des débits (fig. 13, 14).

1° J'étudie les phénomènes sur l'anche parfaitement libre du § 9. A dessein j'utilise une rigole pour montrer comment se fait le retour au palier avant $\lambda_a : 2$.

Je rappelle les caractéristiques de l'anche et du tuyau.

$n_a = 178,4$. Longueur demi-onde 97,2 cm.; longueur quart d'onde 49,5 cm. Levée de l'anche 0,51 mm. Diamètre du tuyau 16 mm.

Donnons au tuyau diverses longueurs. Pour chaque longueur faisons varier la pression; mesurons les débits correspondants. Nous obtenons le faisceau des courbes de la figure 13.

Nous savons que, pour parler, le tuyau demande une pression minima p_m d'autant plus forte qu'il est plus long. Déterminons les débits pour les pressions inférieures à p_m . Dans le plan débits-pressions nous décrivons d'une courbe, que nous appelle-

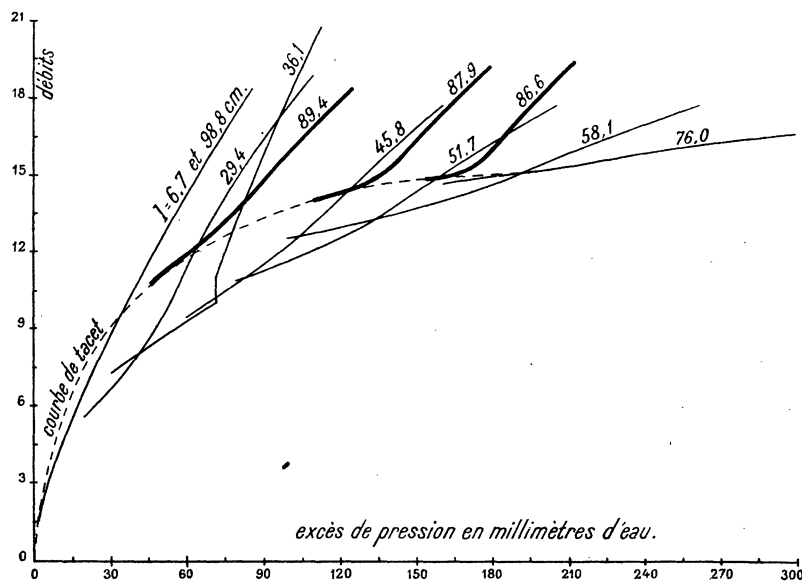


FIG. 13.

rons *courbe de tacet*, un arc d'autant plus long que le tuyau est lui-même plus long. Cette courbe est indépendante de la longueur du tuyau.

2° Étudions comment s'engendrent les courbes de phonation à partir de la courbe de tacet.

Fait général : toutes les courbes tournent leur concavité vers l'axe des pressions.

Classons les longueurs de tuyau en trois catégories : longueurs donnant des sons au-dessous du palier n_a , longueurs ne donnant que des sons nodaux, longueurs donnant des sons au-dessus du palier.

Les courbes de la première catégorie naissent brusquement au-dessous de la courbe de tacet.

Voici à quels phénomènes correspond cet énoncé. Ouvrons lentement le robinet R. La pression est faible; le tuyau ne parle pas; nous nous déplaçons sur le tacet. La pression atteint une valeur convenable; brusquement le son apparaît avec une intensité notable. En même temps la pression dans la boîte à vent monte, le débit prenant tout à coup une valeur plus petite. Le son une fois obtenu, fermons progressive-

ment le robinet. La pression diminue sans que l'anche ne cesse de parler. De la courbe de phonation on décrit ainsi vers la gauche un arc plus ou moins long. Avant d'atteindre la courbe de tacet, l'anche se tait. Le raccordement expérimental des courbes de phonation et de tacet n'existe donc pas.

Plus long est le tuyau et plus les courbes naissent près du tacet. D'où les conséquences : a) Les courbes se coupent entre elles. b) Donnons à la pression une valeur constante, faisons croître la longueur du tuyau. Le débit diminue d'abord, passe

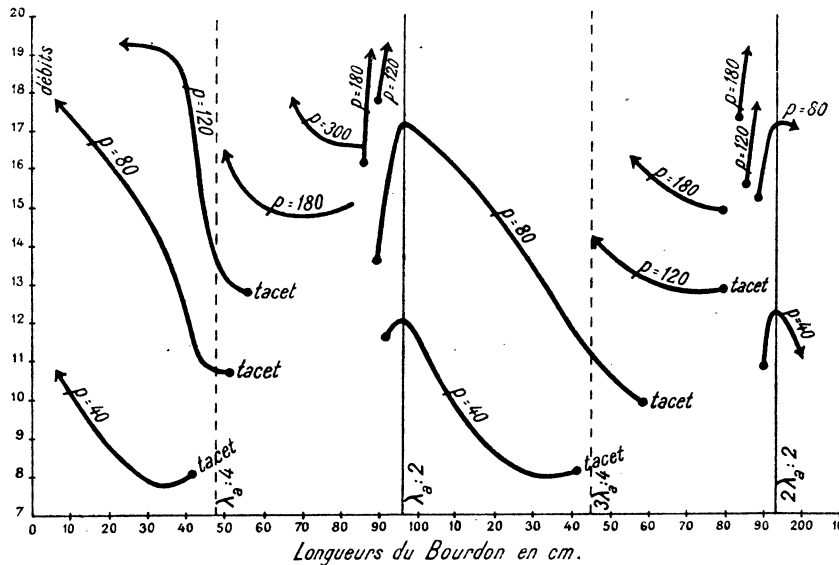


FIG. 14.

par un minimum, puis croît légèrement. Cette anomalie ne se présente pas pour les amplitudes.

Les courbes des deux autres catégories naissent de la courbe de tacet. Sans à-coup dans la pression, on passe du tacet au son. L'intensité d'abord quasi nulle croît progressivement et sans heurt.

Les courbes nodales semblent continuer la courbe de tacet. Quelle que soit la pression, le timbre demeure semblable à lui-même.

Au contraire les courbes des sons au-dessus du palier, d'abord confondues avec le tacet, se redressent assez brusquement; en même temps le timbre de voilé devient criard. l croissant, ces courbes naissent pour des pressions de plus en plus faibles; elles se placent à gauche les unes des autres. Pour $l = \lambda_a : 2$, on obtient à peu de chose près la courbe $l = 0$, et les phénomènes recommencent.

Rappelons que pour ces deux catégories de courbes la fréquence ne dépend pas de la pression.

Voici la conclusion pratique : lorsque le tuyau ne peut donner que le fondamental du bourdon (cas de la clarinette) l'instrument est pleinement expressif. On peut *attaquer* le son aussi pianissimo qu'on désire. Lorsque le tuyau, trop court, ne donne ce fondamental qu'avec de fortes pressions, l'instrument présente deux graves défauts : le son monte quand on force le vent, l'attaque piano du son est impossible. On peut corriger l'intensité, mais après coup.

3° Nous donnons à la courbe $l = 36,1$ cm. une forme bizarre. Nous la supposons formée de deux branches sans relation entre elles. Le trait vertical qui les relie indique seulement qu'elles sont relatives à une même longueur de tuyau. Ces deux branches existent pour les longueurs de l comprises entre 29,4 et 45,8 cm. Elles correspondent au phénomène signalé à propos des fréquences. La branche inférieure se rapporte aux courbes de fréquence I ; la branche supérieure aux courbes II. On sait que p croissant la fréquence saute brusquement des courbes I aux courbes II. On voit la répercussion du phénomène sur le débit. (Voir plus loin pour les amplitudes.) Pour $l > 45,8$ la continuité existe entre les courbes I et II ; corrélativement les deux branches du débit ne forment plus qu'une seule et même courbe.

4° Les graphiques de la figure donnent les débits en fonction de la longueur du tuyau pour les pressions 40, 80, 120, 180, 300 mm. Les mesures — impossibles — manquent pour $p > 80$ mm. et $l = \lambda_a : 2, 2\lambda_a : 2$. Mais l'allure des courbes de part et d'autre de ces longueurs montre quels seraient les débits.

Comparons les courbes $p = 300$ mm. et $p = 80$ mm. Pour $l = \lambda_a : 2$ les débits sont à peu près les mêmes alors que les pressions sont comme 4 et 1. Mais pour $p = 300$ l'on est sur la nodale ; pour $p = 80$, sur le palier.

Pour cette longueur $\lambda_a : 2$ comparons les débits nodale et palier, l'amplitude de l'anche étant la même dans les deux cas. Remarquons, en passant, que l'égalité des amplitudes de l'anche n'entraîne pas l'égalité des intensités sonores. L'intensité du son dépend en effet de l'amplitude de l'anche et de l'amplitude de l'onde stationnaire du tuyau. Les pressions à comparer sont $p = 0,5$ mm. et $p = 300$ mm. Les débits correspondants sont comme les nombres 1666 et 375. Les temps que met à se vider le volume V (7 litres) sont 6 et 26,6 secondes.

§ 16. — Courbe des amplitudes. Levée de la position moyenne (fig. 15 et 16).

Sur la face + E, vers l'extrémité libre et parallèlement à la grande dimension de l'anche, est collé un léger écran de mica (1×1 cm²) percé en son centre d'un très petit trou (0,1 mm. environ). Deux contreforts en mica collés normalement à

l'écran l'arc-boutent et l'empêchent de vibrer normalement au plan de vibration de l'anche. Du papier noir est collé sur le mica pour le rendre opaque.

L'anche est enfermée dans une boîte à vent [$20 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$] dont les faces parallèles à l'écran sont fermées par des glaces.

Un arc électrique éclaire vivement une petite zone autour du trou de l'écran; pour protéger le papier et la colle, on interpose une cuve d'eau sur le passage des

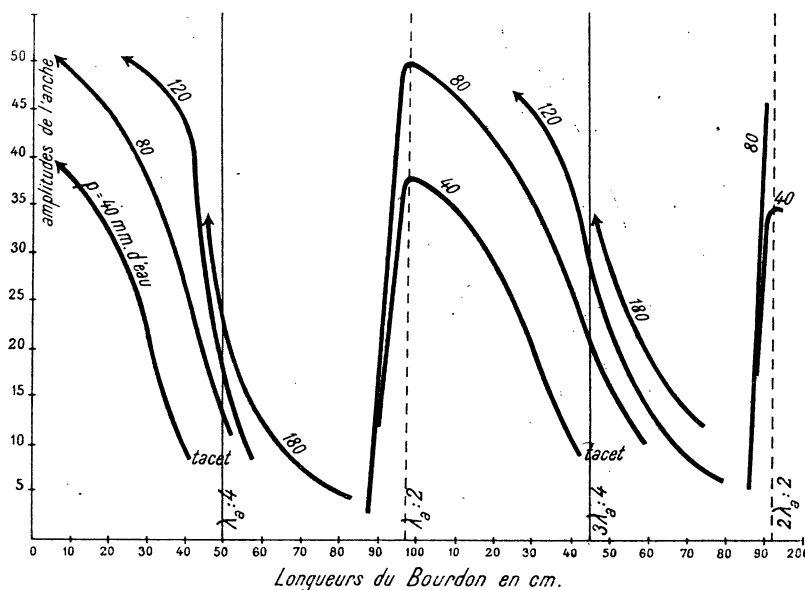


FIG. 15.

rayons lumineux. Le plan de vibration de l'anche est rendu aussi vertical que possible; le réglage s'effectue au moyen d'un petit niveau sphérique collé sur le cadre de l'anche au voisinage du talon de la languette.

La levée de l'anche à l'extrémité libre se détermine au sphéromètre. Pour déterminer la position d'obturation (anche coplanaire avec le cadre), on glisse entre le cadre et l'anche une lamelle de mica d'épaisseur connue; on appuie l'anche sur le mica.

Une lentille convenablement diaphragmée forme l'image du trou sur un écran immobile ou sur une plaque photographique animée d'un mouvement uniforme normalement aux rayons lumineux.

L'écran est un papier translucide — papier calque — tendu sur un carreau de verre. Le verre est tourné du côté d'où vient la lumière. Quand l'anche vibre, le point image trace sur le papier une ligne lumineuse; à l'encre un observateur relève l'amplitude du trait. L'anche au repos, on inscrit la position d'équilibre. Les

élongations maxima et minima se mesurent à partir de cette position. L'inscription de la levée de l'anche donne le grossissement.

Pour l'enregistrement sur cliché, j'utilise le métronome photographique du laboratoire. Sur chaque cliché j'enregistre la vibration, la position d'équilibre sans vent et au besoin la position d'obturation. En opérant avec un arc alternatif (50 périodes), on détermine aisément les fréquences sans le secours du sonomètre.

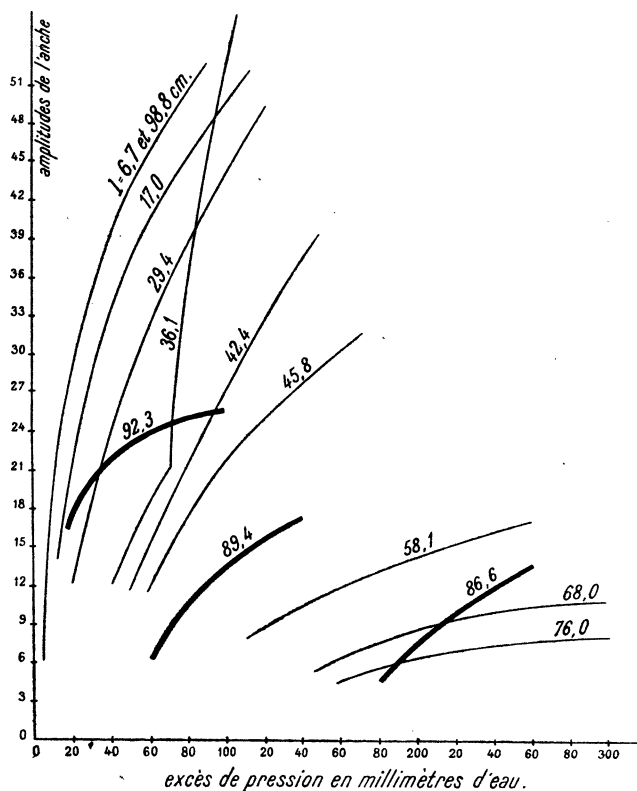


FIG. 16.

2° La photographie montre que la vibration de l'anche est sinusoïdale quelle que soit la réaction du tuyau (exception faite des accords).

Pour les longueurs du tuyau comprises entre 0 et $\lambda_a : 4$, $\lambda_a : 2$ et $3\lambda_a : 4$, ... les élongations de part et d'autre de la position d'équilibre sans vent sont égales, quelle que soit l'amplitude. Sur les nodales, $\lambda_a : 4 < l < \lambda_a : 2$, $3\lambda_a : 4 < l < 2\lambda_a : 2$, la levée moyenne de l'anche est inférieure à la levée de l'anche sans vent. La position moyenne est d'autant plus rapprochée du cadre que la pression est plus forte.

Supposons faible la réaction du tuyau. Voici comment se fait le retour au palier avant $\lambda_a : 2$.

A partir d'une longueur $l' > \lambda_a : 4$ on peut, en forçant la pression, rendre l'anche coplanaire avec le cadre. Brusquement le système cesse d'émettre le son nodal pour donner un son n' plus aigu que le son n_a de l'anche pincée. Allongeons le tuyau. Le son baisse. La pression minima nécessaire pour l'obtenir diminue. La position moyenne se relève au-dessus du cadre, tout en restant au-dessous de la position d'équilibre sans vent. Comme pour les sons nodaux, cette position moyenne dépend de la pression; elle se rapproche du cadre quand la pression augmente. Pour $l = \lambda_a : 2$ la position moyenne coïncide avec la position d'équilibre sans vent; elle est indépendante de la pression; la fréquence est n_a .

Faut-il rattacher la courbe au-dessus du palier, à gauche de $\lambda_a : 2$, à une excitation + I de l'anche? Il ne semble pas, puisque la position moyenne est toujours au-dessus du cadre, et que la fréquence est indépendante de la pression.

Si la réaction du tuyau est assez faible, la position moyenne coïncide avec la position d'équilibre sans vent bien avant $\lambda_a : 2$. Ainsi pour le tuyau de 40 mm. de diamètre la coïncidence a lieu à partir de $l = 76$ cm.; corrélativement à partir de cette longueur la fréquence est celle de l'anche pincée.

3° Expériences.

Je projette l'anche avec une lentille de 20 cm. de distance focale ($p = 23$ cm., $p' = 175$ cm.). Le grossissement est de 7,6. La levée de l'anche avec ce grossissement est 3,9 mm. Je donne dans les tableaux suivants les longueurs (élongations, amplitudes, ...) mesurées sur l'écran de projection.

Pour $0 < l < 40$ cm., la levée de la position moyenne est égale à la levée de l'anche sans vent. A partir de $l = 40$ cm., donc un peu avant la longueur quart d'onde, la position moyenne se rapproche du cadre.

Les élongations sont comptées à partir de la position d'équilibre sans vent. Le tuyau a 16 mm. de diamètre.

Longueur du tuyau 29,4 cm.

Pression.	Élongation côté + E.	Élongation côté — E.	Amplitude totale.	Levée de la position moyenne.
20 mm.	6,0 mm.	6,0 mm.	12 mm.	3,9 mm.
30	9,3	9,2	18,5	
40	12,2	11,8	24,0	
50	14,0	13,7	27,7	
60	16,1	16,0	32,1	
70	18,3	17,5	35,8	
80	19,2	19,0	38,2	
90	20,4	20,2	40,6	
100	22,1	21,6	43,7	
110	22,5	22,7	45,2	
120	24,6	24,6	49,3	

Longueur 58,1 cm.

Pression.	Élongation côté + E.	Élongation côté — E.	Amplitude.	Levée de la position moyenne.
110 mm.	3,1 mm.	5,2 mm.	8,3 mm.	2,9 mm.
120	3,1	5,4	8,5	2,8
130	3,8	5,7	9,5	2,9
150	4,2	7,0	11,2	2,5
180	4,9	8,3	13,2	2,2
200	5,1	9,4	14,5	1,7
220	4,9	10,3	15,2	1,2
240	5,4	10,7	16,1	1,2
260	5,4	11,7	17,1	0,8

On remarquera la faible variation de l'élongation côté + E.

A partir de $l = 76$ cm. nous pouvons obtenir soit la nodale, soit le palier.

Longueur 76,0 cm.

Son nodal (indépendant de la pression) $n = 113,5$.

Pression.	Élongation côté + E.	Élongation côté + I.	Amplitude.	Levée de la position moyenne.
de 0 à 150 mm. tacet.				
160 mm.	0 mm.	5,0 mm.	5,0 mm.	1,4 mm.
180	0	5,5	5,5	1,2
200	0,6	6,2	7,2	1,1
240	0,9	6,5	7,4	1,1
260	0,9	6,7	7,6	1,0
280	0,9	7,0	7,9	0,9
300	0	6,8	6,8	0,5

L'intensité du son décroît pour $p > 280$ mm. Lorsque $p = 320$ mm., le tuyau se tait; la levée de l'anche est alors 0,2 mm.

Lorsque $p \geq 360$ mm. le son reparait avec la fréquence $n = 201,7$.

La levée de l'anche est nulle. En forçant davantage le vent, la position moyenne pénètre dans le cadre. Ainsi pour $p = 400$ mm., la levée est — 0,6 mm. Il ne s'ensuit pas que le cadre bâille de l'autre côté du cadre (bâillement caractéristique de l'anche + I). En effet le cadre, avec le grossissement choisi, a 7,6 mm. d'épaisseur (épaisseur réelle 1 mm.).

Les figures 15 et 16 donnent les courbes amplitudes-pressions à longueur du tuyau constante et les courbes amplitudes-longueurs à pression constante.

CHAPITRE III

Bourdon cylindrique de longueur invariable, anche de fréquence variable.

§ 17. — Schème de Weber.

Ce chapitre est la contre-partie des chapitres précédents.

Raisonnons sur l'anche libre. Supposons réalisable le schème de Weber.

Soit n_a la fréquence de l'anche pincée, λ_a la longueur d'onde du son n_a , l la longueur du tuyau.

1° Nous avons vu que pour l variable, n_a constant, on a :

le son invariable n_a quand l vérifie les inégalités

$$k \frac{\lambda_a}{2} < l < (2k + 1) \frac{\lambda_a}{4} \quad (1), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

le son variable du bourdon de longueur l , $n = (2k + 1) V : 4l$, ou le tacet, pour

$$(2k + 1) \frac{\lambda_a}{4} < l < (k + 1) \frac{\lambda_a}{2} \quad (2).$$

2° Inversement, soit l constant ($l = L$), n_a variable. On a :

le son variable de l'anche pour

$$k \frac{V}{2L} < n_a < (2k + 1) \frac{V}{4L} \quad (1'), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

le partiel $2k + 1$ du bourdon de longueur L , $N = (2k + 1) V : 4L$, ou le tacet, pour :

$$(2k + 1) \frac{V}{4L} < n_a < (k + 1) \frac{V}{2L} \quad (2').$$

D'où il résulte que si nous élevons continûment la fréquence n_a de l'anche — au moyen d'une rasette qui diminue la longueur vibrante de la languette — le son rendu par le système anche-bourdon ne montera pas d'une façon continue. Il se stabilisera

sur un palier k de fréquence $N = (2k + 1)V : 4L$, puis sautera brusquement sur un son plus aigu, montera, se stabilisera sur le palier $k + 1$, et ainsi de suite.

L'intervalle des sauts se déduit des inégalités (2') :

$$\frac{n_a}{N} = \frac{2k + 2}{2k + 1} \quad (3'), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Ils se produisent quand $n_a = (k + 1)V : 2L$; alors l'anche est à l'unisson du partiel $k + 1$ du tuyau L ouvert aux deux bouts.

Pour $n_a = V : 2L$, $2V : 2L$, $3V : 2L$ les sauts sont respectivement d'une octave $2 : 1$, d'une quarte $4 : 3$, d'une tierce mineure, $6 : 5$.

Quand la réaction du tuyau est faible, les sauts se produisent pour $n_a < (k + 1)V : 2L$; l'intervalle $n_a : N$ est plus petit que (3').

Quand la réaction est forte, les sauts ont lieu pour $n_a > (k + 1)V : 2L$; l'intervalle $n_a : N$ est plus grand que (3').

3° En pratique, le schème de Weber se réalise plus ou moins bien. Les paliers $N = (2k + 1)V : 4L$ n'existent pas. Les fréquences N sont des limites vers lesquelles tend le système quand la fréquence de l'anche va de $(2k + 1)V : 4L$ à $(k + 1)V : 2L$. D'autre part, quand n_a vérifie les inégalités (1'), $n_a < (2k + 1)V : 4L$, le système donne non n_a , mais un son d'autant plus grave que n_a est plus proche de $(2k + 1)V : 4L$.

§ 18. — Anche libre (fig. 17).

Au tampon d'un bourdon (diamètre 18 mm., longueur 119,5 cm.) j'adapte successivement les anches d'un jeu d'harmonium, de l' $ut_2^\#$ ($n_a = 137,0$) au mi_4 ($n_a = 660$). Ces anches n'ont pas la même longueur. Je fais en sorte que la colonne d'air ait 119,5 cm. de long quelle que soit l'anche utilisée.

La pression est 200 mm.

La figure 17 représente les phénomènes. En abscisses, je porte les fréquences n_a de l'anche pincée; en ordonnées, les fréquences n du système anche-bourdon.

Soit N_1, N_3, N_5 les partiels du bourdon, N_2, N_4, N_6 les partiels du tuyau de même longueur ouvert aux deux bouts. Je porte ces fréquences sur les axes. De plus je trace les horizontales N_1, N_3, N_5 . Soit $n = n_a$, la bissectrice des axes.

Si les lois (1'), (2') étaient vérifiées, les phénomènes, à partir de $n_a = 0$ seraient ainsi représentés :

$0 < n_a < N_1$, parcours $\overline{AB}$ sur la bissectrice. Fréquence variable n_a .

$N_1 < n_a < N_3$, parcours $\overline{BC}$ sur le palier N_1 . Fréquence invariable N_1 .

En C, saut d'octave sur A'.

$N_2 < n_a < N_3$, parcours A'B' sur la bissectrice. Fréquence variable n_a .

$N_3 < n_a < N_4$, parcours B'C' sur le palier N_3 . Fréquence invariable N_3 .

En C', saut de quarte sur A''; et ainsi de suite.

La figure montre ce que sont en réalité les phénomènes, mais aussi la valeur du schème de Weber lorsque, comme c'est ici le cas, le tuyau réagit beaucoup.

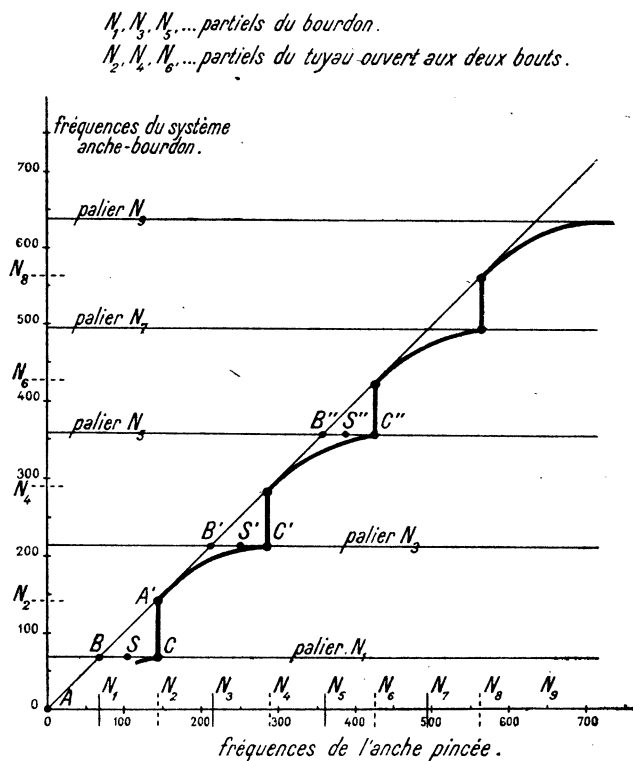


FIG. 17.

§ 19. — Anche battante. Paliers principaux et secondaires.

1° Avec l'anche libre il n'est guère possible de faire varier continûment la fréquence n_a de l'anche pincée. Le changement de fréquence exige qu'on arrête l'expérience. Aussi laisse-t-on échapper des phénomènes très importants. Avec l'anche battante, la difficulté disparaît. La rasette est de construction simple. On peut faire varier dans un grand intervalle la fréquence n_a sans changer la languette.

2° D'après (1'), (2') les seuls paliers possibles sont donnés par la formule

$$N = (2k + 1) \frac{V}{4L}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Les sauts vers l'aigu se produisent à partir des points $S, S', S'' \dots$ situés sur les paliers $\overline{BC}, \overline{B'C'}, \overline{B''C''}, \dots$; ces points sont d'autant plus rapprochés de $C, C', C'' \dots$ que la réaction du tuyau est plus forte.

Les expériences qui suivent montrent la possibilité de *paliers secondaires* : ils sont donnés par la formule $N' = \frac{2k + 1}{m} \cdot \frac{V}{4L}$ où m est un nombre entier quelconque supérieur à 1. En pratique m prend les valeurs 2, 3, 4.

Appelons 1, 3, 5 les trois premiers partiels du bourdon de longueur L . Donnons à m les valeurs 2, 3, 4. Les paliers principaux et secondaires jusqu'au palier $N = 3$ seront, par ordre de fréquences croissantes :

$$\frac{1}{4} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{3}{4} \quad 1 \quad \frac{5}{4} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{5}{2} \quad 3.$$

Aux paliers secondaires correspondent des sauts. Déterminons leur valeur.

Supposons que ces paliers obéissent aux mêmes lois que les paliers principaux. Admettons le schème de Weber.

Bornons-nous au palier 1 : 2. Pour ce palier tout se passe comme si le bourdon était de longueur $L : 2$. La courbe des fréquences est, à partir de $n_a = 0$, Abc . Pour le palier principal 1, la longueur à considérer est $L : 1$; la courbe des fréquences est ABC .

La courbe des fréquences résultante sera $AbcBC$. Le saut en c sera d'une octave (de $n = 1 : 2$ à $n = 1$). En C nous aurons un autre saut d'octave (de $n = 1$ à $n = 2$).

En réalité les courbes des fréquences ont les formes $Ab'c', AB'C'$. Le saut en c sera donc inférieur à une octave. La courbe des fréquences sera $Ab'cB'C$.

Admettons d'autre part que la réaction du tuyau soit faible pour le palier 1 : 2. Le point c est rejeté vers la gauche : l'intervalle du saut est encore réduit.

La figure 18 suppose l'existence des paliers 1 : 3, 1 : 2, 1 et les sauts se faisant pour les fréquences de l'anche $n_a = 2 \times 1 : 3, 2 \times 1 : 2, 2 \times 1 : 1$. Le parcours résultant est $A\beta'\gamma cB'C$.

3° Expliquons ces phénomènes. Rappelons ce qui a été dit au § 7, 5°.

L'anche est une sirène. Quelle que soit sa fréquence n_a , quelle que soit la longueur du tuyau, il existe dans le tuyau une onde stationnaire de longueur $\lambda_a = V : n_a$. Bien que la vibration de l'anche soit parfaitement sinusoïdale (ce que montre la

photographie), cette onde est complexe (existence d'harmoniques $kV ; n_a$) — ce que montre l'examen du tuyau à la sonde. Cet examen montre que le bout du tuyau opposé à l'anche est un ventre pour tous les harmoniques. La position des nœuds et des ventres dans le tuyau s'ensuit. L'état vibratoire au niveau de l'anche est donc indéterminé; il dépend de la fréquence de l'anche, ou, ce qui revient au même, de la longueur du tuyau.

Le palier 1 est dû à la réaction sur l'anche du partiel 1 du bourdon. Faisons

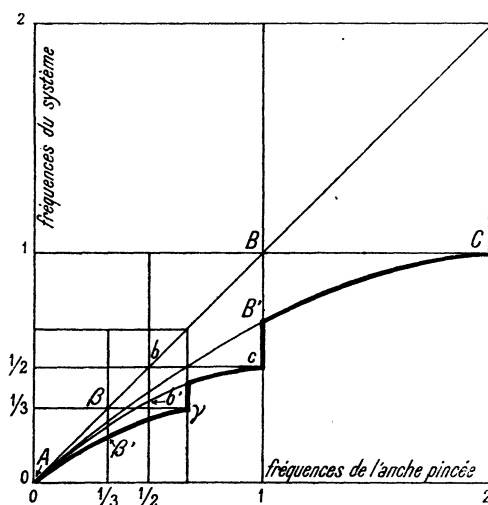


FIG. 18.

croître la fréquence de l'anche à partir de 0. La réaction du partiel 1 commencera lorsque le *fondamental* de l'onde stationnaire créée dans le tuyau aura un nœud au niveau de l'anche, c'est-à-dire lorsque le nœud de fictif deviendra réel; alors l'anche est à l'unisson du partiel 1. n_a croissant, le nœud de l'onde λ_a s'éloigne du tampon. Mais le tuyau réagit, c'est-à-dire ramène ce nœud au tampon. Conséquence : le son imposé à l'anche est le partiel 1 du bourdon. Cette réaction du bourdon cessera lorsque λ_a impliquera l'existence d'un ventre au tampon. La fréquence n_a de l'anche pincée est alors à l'octave aiguë du partiel 1 du bourdon.

Mêmes raisonnements pour les paliers principaux 3, 5, 7, ...

Passons aux paliers secondaires. Supposons l'anche à l'octave grave du partiel 1 du bourdon (palier 1 : 2). L'harmonique 2 de l'onde λ_a est à l'unisson du fondamental du bourdon; en d'autres termes le bourdon est quart d'onde pour l'harmonique 2 de l'anche; le nœud de cette onde est au tampon. Faisons croître la fréquence de l'anche. Si la réaction du bourdon est nulle, le nœud de l'onde 2 s'éloigne vers le bout ouvert. Mais si le bourdon réagit, le nœud est attiré par le tampon. L'onde 2

demeure à l'unisson du fondamental du bourdon. L'onde 1, nécessairement liée à l'onde 2, demeure à l'octave grave de ce fondamental; c'est elle qui impose à l'anche la fréquence 1 : 2. La réaction cesse lorsque l'harmonique 2 de l'onde λ_a possède un ventre au tampon.

Le palier 1 : 3 est dû à la réaction de l'harmonique 3 de l'onde 1 : 3. Cet harmonique est à l'unisson du fondamental du bourdon et donc possède un nœud au tampon.

Le palier 3 : 2 est dû à la réaction de l'harmonique 2 de l'onde 3 : 2. Cet harmonique est à l'unisson du partiel 3 du bourdon; il possède un nœud au tampon.

Nous étudierons plus loin les phénomènes à la flamme manométrique. Nous verrons que sur les paliers 1 : 3, 1 : 2, l'onde d'intensité maxima est celle du partiel 1 du bourdon.

§ 20. — Anche battante. Expériences.

1° La figure 19 indique le montage.

La rigole est soudée à un lourd noyau de plomb de 4 cm. d'épaisseur. La rasette est constituée par une épaisse tige de fer au bout de laquelle est soudée une pièce métallique en forme de coin. La tige passe dans un trou ménagé dans le noyau de plomb; elle porte à la hauteur du coin un anneau qui peut glisser le long d'une tige solidement fixée à la caisse à vent. Ainsi guidée la rasette, quelle que soit sa position, exerce une pression énergique sur l'anche et la rigole. La section d'encastrement est bien déterminée. De plus, la rasette ne peut pas vibrer. Ses déplacements sont commandés par un chariot mû par une vis micrométrique : on lit les déplacements sur une règle graduée.

2° La rigole, de 10 mm. de diamètre, est longue de 11,5 cm.

L'anche est une languette de laiton de $2\frac{1}{4}$ dixièmes de millimètre. Sa largeur est 8 mm. La levée et la « tournure » ont été choisies de manière que l'anche parle pour des longueurs de la partie vibrante comprise entre 25 et 80 mm.

Soit la pression — constante — $p = 58$ mm.

Déterminons d'abord les fréquences de l'anche sans résonateur. Représentons graphiquement les résultats en portant en ordonnées les fréquences, en abscisses les positions de la rasette lues sur la règle graduée.

On obtient une courbe S de forme hyperbolique admettant les axes comme asymptotes.

Soit L le tuyau adapté à la rigole. Traçons les horizontales $N = V : 4L$, $3V : 4L$ (partiels du bourdon de longueur L). Faisons croître la fréquence de l'anche à partir du son le plus grave qu'elle peut donner.

Le schème de Weber consiste en un déplacement sur la courbe S, n_a variant de 0 à $V : 4L$, en un déplacement sur le palier $V : 4L$ vers la gauche du tableau, n_a variant de $V : 4L$ à $V : 2L$. Lorsque $n_a = V : 2L$ on saute verticalement sur un point de S. Répétons que la longueur du palier dépend de l'intensité de la réaction du tuyau. Lorsque la réaction est faible, on saute avant $V : 2L$.

Courbes et sauts analogues pour les autres paliers et sauts principaux ou secondaires.

Voici la réalité. Les paliers sont remplacés par des courbes plus graves se rac-

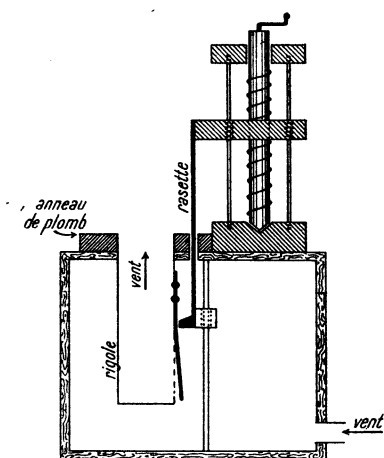


FIG. 19.

cordant à droite, sans point de discontinuité, à la courbe S; à gauche et à la limite, aux paliers.

Supposons faible la réaction du tuyau : la longueur des paliers, l'intervalle des sauts ne sont pas définis; ce que montre l'expérience suivante. Raccourcissons l'anche sans qu'elle ne cesse de parler : les paliers, les sauts ont la valeur maxima; corrélativement les parcours sur la courbe S sont le plus courts.

Faisons l'expérience inverse : allongeons l'anche. Les parcours sur la courbe R sont le plus longs; les paliers sont plus courts, les sauts plus petits.

3° Étude des phénomènes entre 0 et $V : 4L$.

a) A la rigole de 11,5 cm. adaptons un tuyau de 40 mm. de diamètre, de 30,2 cm. de longueur.

La longueur totale de la colonne d'air est $30,2 + 11,5 = 41,7$ cm. Mais nous savons que, au point de vue des phénomènes, la longueur ainsi calculée ne correspond à rien. La correction à l'anche, soustractive, est de l'ordre de grandeur de la rigole; ce que l'expérience suivante confirme.

Le son le plus grave que peut émettre l'anche est $n_a = 70$.

Fréquences de l'anche sans résonateur
(courbe S). Fréquences du système.

82,0	82,0	
98,0	92,0	
100,0	92,5 — 106,1	saut $N_1 : 3$, 18 savarts.
101,0	100,8	
112,2	111,6	
120,3	124,0	commencement du palier $N_1 : 2$.
137,1	128,5	
142,0	132,4	
148,1	134,8	
154,7	138,7	
160,0	139,8 — 157,6	saut $N_1 : 2$, 32 savarts.
171,4	170,8	
190,9	187,6	
208,8	207,4	
235,6	229,4	commencement du palier N_1 .
249,0	238,4	
260,0	247,2	
280,2	257,6	
295,1	260,1	
335,0	265 — 335,6.	Saut N_1 , 102 savarts.

Les fréquences caractérisant les paliers, fréquences sur lesquelles se font les sauts sur la courbe S, sont 92,5, 139,8, 265,0. Multiplions ces nombres respectivement par 3, 2, 1; on trouve 277,5, 279,6, 265. Il est évident que nous avons affaire aux paliers $N_1 : 3$, $N_1 : 2$, $N_1 : 1$. La discordance entre les nombres N_1 calculés peut tenir à deux raisons. Vu la faible réaction du tuyau — rigole, tuyau de grand diamètre — nous quittons les paliers avant que soient obtenus les fréquences limites $N_1 : 3$, $N_1 : 2$, $N_1 : 1$. Autre explication : la fréquence N_1 à partir de laquelle nous devons calculer les paliers est-elle la même pour tous les paliers? Autrement dit la correction soustractive due à la rigole est-elle déterminée une fois pour toutes, indépendamment du palier considéré? Quoi qu'il en soit, cette correction est grande. Les longueurs quart d'onde pour les fréquences extrêmes 280 et 265 sont 30,2 et 32,1 cm. Or la longueur du tuyau de 40 mm. est 30,2 cm. Tout se passe comme si le tampon était au bout du tuyau de grand diamètre.

Les harmoniques 2 et 3 de l'onde λ_n ont donc une action manifeste; ils imposent une stabilisation au son du système anche-bourdon, malgré la variation de la fréquence de l'anche.

b) Inversement plaçons-nous sur la courbe S, à la naissance d'un palier.

Soit n la fréquence de l'anche. C'est aussi bien la fréquence du système anche-bourdon. Allongeons le tuyau et ne touchons pas à l'anche. L'harmonique générateur du palier fera baisser le son du système. Lorsque son action sera nulle, nous reviendrons brusquement à la fréquence n de départ.

Voici une expérience. Je me place sur la courbe du palier $N : 2$, en un point légèrement à gauche de la courbe S .

Soit $n_a = 137,0$ la fréquence de l'anche sans résonateur, $n = 128,5$ la fréquence du système. Ces fréquences figurent au tableau précédent.

Allongeons le tuyau.

Longueur du tuyau.	Fréquence.
30,2	128,5
32,2	125,2
33,2	123,4
11,5 (rigole) + 34,2	121,9
35,2	120,9
36,2	119,8
37,2 Retour à la courbe S .	133,4

c) Revenons à l'expérience du paragraphe a).

Plaçons une sonde contre le fond du tuyau de 40 mm. Regardons au miroir tournant. Maintenons uniforme sa rotation. Faisons rendre au système les sons 139,8, 265,0 caractéristiques des paliers $N_1 : 2$, $N_1 : 1$. Dans le champ du miroir, nous voyons, à peu de chose près, le même nombre de dents, quatre pour préciser. Elles sont de même forme, de même hauteur, également espacées.

Soit $n = 139,8$; provoquons le saut sur $n = 157,0$ (en posant la paume de la main sur le bout ouvert du tuyau). Brusquement une dent sur deux s'affaisse; en même temps les quatre dents se rapprochent l'une de l'autre. n_a croissant, les dents intercalaires se rapetissent davantage, et finalement disparaissent. Mais deux autres grandes dents sont entrées dans le champ du miroir. Lorsque $n = 265,0$ nous sommes revenus au point de départ.

Ainsi, même après le saut du palier $N_1 : 2$ à la courbe S , l'harmonique 2 se trouve dans l'onde stationnaire logée dans le bourdon; mais son intensité s'est considérablement affaiblie.

4° Phénomènes entre $N_1 = V : 4L$ et $N_3 = 5V : 4L$ (fig. 20).

Adaptons à la même rigole un tuyau plus long. Soit 83,4 cm. sa longueur, et 40 mm. son diamètre.

La figure 20 donne les courbes des fréquences.

Les fréquences des paliers principaux sont $N_1 = 99,3$, $N_3 = 298,4$, $N_5 = 467,0$.

Pour les sons N_1 , N_3 , tout se passe comme si la rigole n'existait pas.

Les sauts du grave à l'aigu se font respectivement sur les fréquences 137,8, 376,6, 515,2.

Les intervalles sont 142, 101, 42 savarts

Les paliers secondaires entre N_1 et N_3 ont pour fréquences 152,6, 180,0, 262,6.

Les sauts du grave à l'aigu se font sur les fréquences 159,5, 186,1, 267,8.

Les intervalles sont 19, 14, 7 savarts.

Leur ordre probable est $N_3 : 2$, $N_7 : 4$, $N_3 : 2$.

Les flèches indiquent le sens de parcours.

Les sauts de l'aigu au grave sont plus petits que ceux indiqués ci-dessus.

On trouve, en descendant seulement, les sauts :

	Fréquences.	Intervalles.
α)	460 à 442	17 savarts.
β)	240 à 230	18 savarts.

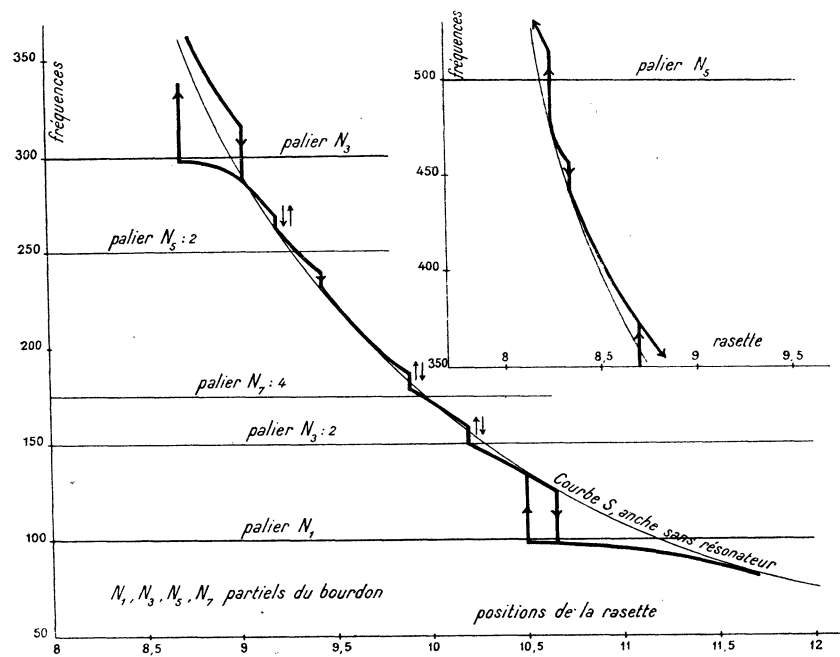


FIG. 20.

Quel ordre donner? Chose curieuse, les intervalles sont égaux, les sons quasi à l'octave l'un de l'autre.

Les sons de la courbe S sont criards : le bourdon ne réagit pas ; ceux du palier sont beaux et « font entendre le bourdon ».

5° Harmonisation des jeux d'anche.

Soit un bourdon de longueur L.

L'harmonisation consiste à donner à l'anche, au moyen d'une rasette, une longueur telle que le système anche-bourdon se trouve quelque part sur le palier N_1 , plus exactement sur la courbe située au-dessous de ce palier, à gauche de l'intersection du palier et de la courbe S.

Il faut se placer sur un point convenable de ce palier. Un point trop à gauche ne convient pas; une surpression accidentelle, même légère, ferait sauter le son sur la courbe S. Il ne faudrait pas croire d'ailleurs que plus on est à gauche et plus le son est beau; il devient rauque, roulant. Nous en savons la raison; les deux sons palier et courbe S coexistent.

Rappelons que si la « taille » du bourdon est « grosse » (tuyau de grande section) et l'anche montée sur une rigole — cas des tuyaux d'orgue — le palier est très court.

Les accordeurs déterminent ainsi la position de la rasette qui convient. Ils placent le système anche-bourdon sur le palier N_1 , ce qui, à l'oreille, est très facile. Ils approchent la paume de la main du bout ouvert du tuyau. D'où comme effets : obturation partielle du tuyau, ce qui correspond à un allongement du tuyau, légère surpression dans la boîte à vent. Si le saut se produit, ou, pour employer le langage technique, si le tuyau double, c'est que l'anche est trop courte (n_a trop aigu).

En pratique, la fréquence n est imposée. Pour harmoniser, on agit sur l'anche ou sur le bourdon, ou sur les deux à la fois comme il va être dit, de façon que n soit convenablement placé sur la courbe-palier N_1 du système anche-bourdon.

On part d'un bourdon $N_1 > n$, d'une anche $n_a < n$. On raccourcit l'anche. Si le tuyau double avant l'obtention du son n , c'est que le tuyau est trop long. On le raccourcit et on recommence.

Il est évident que l'harmonisation ne vaut que pour la pression à laquelle elle a été effectuée. On sait à quel point n_a (et donc la courbe S) dépend de la pression.

Ce que nous disons ici des tuyaux cylindriques vaut, *mutatis mutandis*, pour tous les tuyaux quelle que soit la forme (coniques, cylindro-coniques, ...). Nous retrouverons la question au chapitre des tuyaux coniques.

§ 21. — Doublements sur le cromorne.

On peut répéter les expériences du paragraphe précédent sur un tuyau d'orgue quelconque. Voici un exemple :

Le cromorne est un jeu d'orgue à tuyau cylindrique et anche battante. Le timbre rappelle celui de la clarinette. C'est un jeu de huit pieds. Je prends le tuyau le plus grave du jeu. Le son le meilleur correspondant à sa forme et à sa longueur (son d'harmonisation) est $n = 66$ (ut_1).

A la rigole portant l'anche est soudé un tuyau de 131,5 cm. de long, de 43 mm. de diamètre. La longueur théorique quart d'onde pour $n = 66$ est 128,8 cm. Nouvelle preuve que dans le phénomène la rigole n'intervient pas.

Écrivons les premiers partiels du bourdon, à partir du fondamental $N_1 = 66$ fourni par l'expérience :

$$N_1 = 66, \quad N_3 = 3 \times 66 = 198, \quad N_5 = 5 \times 66 = 330, \quad N_7 = 7 \times 66 = 462.$$

Utilisons la rasette ordinaire et opérons sans précautions par fréquences n_n croissantes, avec la pression de 80 mm., pression d'alimentation usuelle de l'instrument.

Nous déterminons les paliers principaux de fréquence

$$66,0 \quad 197,8 \quad 325 \quad 452.$$

A partir de ces fréquences, on saute sur :

$$77,1 \quad 224,9 \quad 363 \quad 492.$$

Les intervalles sont $67 \quad 56 \quad 48 \quad 37$ savarts.

Nous trouvons aussi les paliers secondaires $98,9$ ($N_3 : 2$), $167,0$ ($N_5 : 2$).

On saute sur les fréquences $112,4, \quad 172.$

Les intervalles sont $95 \quad 13$ savarts.

Peu importe l'intervalle des sauts ; l'important est leur existence et l'existence des paliers.

Je note seulement les paliers dus à l'harmonique 2. Mais l'oreille décèle, par le changement du timbre du son, l'existence de très petits paliers secondaires, dus à la réaction des harmoniques 3, 4 et 5.

CHAPITRE IV

Tuyaux coniques.

Reportons-nous à la figure 2 relative aux tuyaux cylindriques.

Les nodales d'ordre k sont décalées vers la gauche des ventrales $k + 1$. Le décalage, pour les points situés sur une même horizontale (points de même fréquence n), est égal à $\lambda : 4 = V : 4n$.

Pour les tuyaux coniques parfaits, les nodales sont confondues avec les ventrales. Le décalage vers la gauche est nul. Conséquence : le schème de Weber se réduit au palier n_a de l'anche sans résonateur. En réalité, le son du système baisse avant $V : 2l$, $2V : 2l$. Pour ces longueurs, on saute brusquement sur le palier n_a .

La facture instrumentale n'utilise que des tuyaux tronconiques. Je leur consacre ce chapitre.

Les nodales ne sont plus confondues avec les ventrales. Elles sont plus ou moins décalées vers la gauche. Le décalage est d'autant plus grand que l'angle au sommet du cône est plus petit. Un angle nul nous ramène au cas des tuyaux cylindriques.

§ 22. — Expériences.

J'utilise un tuyau de trompette d'orgue de demi-angle au sommet égal à 2° . Au petit bout (diamètre 10 mm.) j'adapte diverses anches libres portées par des rigoles de 4 à 6 cm. de longueur. Je néglige la longueur de ces rigoles.

Pour chaque longueur de tuyau, je détermine les fréquences du système, les partiels du tuyau ouvert aux deux bouts et du bourdon. D'où la courbe des fréquences, les nodales et les ventrales. Pour raccourcir le tuyau, je le coupe à la cisaille.

La figure 21 donne les courbes pour les anches libres de fréquences n_a égales à 453, 403, 208, 177. La pression est de 150 mm. Intentionnellement pour les courbes 208, 177 je fais commencer les paliers à l'intersection du palier n_a et de la ventrale 1, bien que, avec la pression utilisée, le tuyau ne donne que le son nodal. Mais il est possible, en l'accrochant, d'obtenir le palier dès la ventrale.

On constate que, quelle que soit l'anche utilisée, sur les nodales on a la même fréquence.

§ 23. — Anche variable. Tuyau de longueur invariable. Doublements.

Nous retrouvons les phénomènes du § 19.

1° Soit le tuyau tronconique :

Longueur, 195 cm.

Diamètre du gros bout, 108 mm.

— du petit — 19 —

Demi-angle au sommet, 2°.

Au petit bout j'adapte une rigole portant une anche battante de laiton (largeur 10 mm., épaisseur 0,37), j'utilise une rasette ordinaire. La pression est de 70 mm.

Les partiels du bourdon sont

$$N_1 = 79,9, \quad N_2 = 160, \quad N_3 = 240, \quad N_4 = 320.$$

Ces fréquences sont comme les nombres 1, 2, 3, ...

Les partiels du tuyau ouvert aux deux bouts sont

$$N'_1 = 87, \quad N'_2 = 174, \quad N'_3 = 261, \quad N'_4 = 348.$$

2° Le son le plus grave que puisse donner la languette est $n_a = 59,6$.

Raccourcissons l'anche.

Le son monte continûment de $n = 59,6$ à $n = 80$; en même temps le timbre se modifie, le son fait entendre de plus en plus le bourdon. Pour $n = 80$, la sonde, placée au petit bout du tuyau, décèle de très fortes variations de pression.

Le son se stabilise sur $n = 80$, mais devient mauvais, rauque. Tout à coup le tuyau « double » sur $n = 88,5$. Le timbre est complètement changé : il est criard. La sonde indique une variation nulle de pression au petit bout.

$n = 80$ est le palier N_1 (bourdon); $n = 88,5$ est le son N'_1 du tuyau ouvert aux deux bouts.

n_a croissant, nous atteignons le palier $n = 120$; le son est redevenu agréable, nourri. La sonde indique un ventre à 141 cm. du bout ouvert. (Cf. $\lambda : 2$ théorique = 141,6 cm). Déplaçons-nous sur le palier : le tuyau parle mal, chevrotte. Brusquement nous sautons sur $n = 132,0$. La sonde indique un ventre à 125,5 cm. du bout ouvert. (Cf. $\lambda : 2$ th. = 128,7 cm.).

Le palier $n = 120$ c'est $N_3 : 2$; $n = 132$, c'est $N'_3 : 2$.

De $n = 132,0$, on passe au palier N_3 , $n = 157,0$. La sonde indique un ventre à 109 cm. du bout ouvert. (Cf. $\lambda : 2 \text{ th.} = 108,3 \text{ cm.}$). Au petit bout grande agitation.

Le doublement se fait sur $n = 181,0$. C'est le partiel N'_3 . A l'anche, l'agitation est nulle. La sonde indique un ventre à 92,5 cm. du bout ouvert. (Cf. $\lambda : 2 \text{ th.} = 92,5 \text{ cm.}$ D'où $2 \lambda : 2 = 185 \text{ cm.}$; c'est presque la longueur du tuyau.)

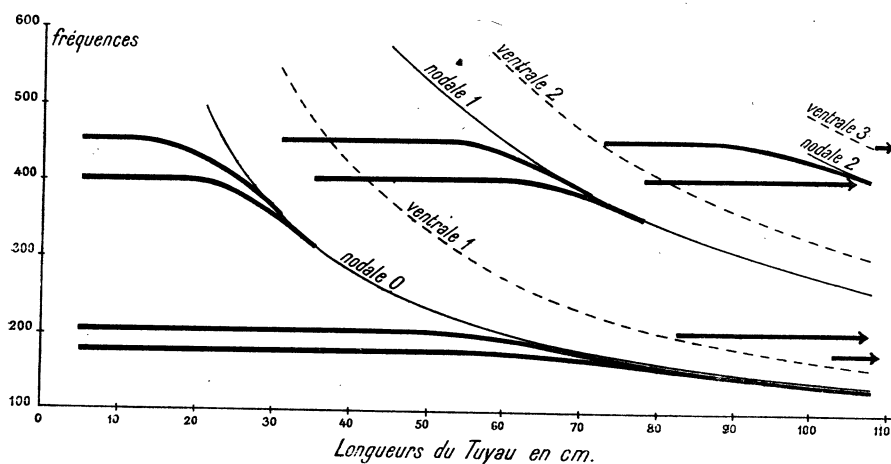


FIG. 21.

De $n = 181,0$, on passe à $n = 207$, palier $N_5 : 2$. De ce palier secondaire on saute sur $n = 219$; c'est $N_5 : 2$.

3° Cette expérience montre l'existence des paliers principaux N_1 , N_2 , N_3 (partiels du bourdon) et des paliers secondaires $N_3 : 2$, $N_5 : 2$ dus à la réaction du tuyau sur l'harmonique 2 des sons $N_3 : 2$, $N_5 : 2$.

Les partiels du bourdon étant, comme les nombres 1, 2, 3, les paliers secondaires $N_3 : 2$, $N_5 : 2$ sont confondus avec les paliers principaux N_1 , N_2 . Remarque : les deux sons constituant les doublements correspondent, l'un (le grave) à un nœud sur l'anche, l'autre (l'aigu) à un ventre.

§ 24. — Sons propres des instruments à embouchure de cor; sons forcés; sons privilégiés.

1° Les instruments à embouchure de cor (bugle, trombone, tuba...) sont composés, à partir de l'embouchure sur laquelle se posent les lèvres de l'exécutant, d'un tuyau cylindrique, d'un tuyau conique et d'un évasement (pavillon). Les parties cylindriques et coniques peuvent être dans le rapport 3 à 1.

Malgré la forme compliquée de ces instruments, les partiels (sons propres) du tuyau fermé à l'embouchure sont, à partir du partiel 2, comme les nombres 2, 3, 4... (partiels d'un tuyau ouvert aux deux bouts). Laissons de côté le partiel 1; il est hors série et le plus souvent à la douzième grave du partiel 2.

Soit donnée une longueur de l'instrument; nous lui associons une anche de fréquence n_a variable : les lèvres. Peu importe la nature de cette anche. Il nous suffit de savoir que la fréquence n_a peut être modifiée dans un grand intervalle au gré de l'exécutant. Elle se conduit d'autre part comme une anche battante + E.

2° Appliquons les conclusions des expériences précédentes. Suivons les raisonnements sur la figure (20).

Les sons propres N seront d'émission facile. Mais pour émettre avec sûreté le partiel N, l'exécutant devra accorder (mettre à l'unisson) ses lèvres avec ce partiel. L'existence des paliers N, longs et parfaits lorsque la pression est grande et la perce étroite — conditions réalisées dans la pratique instrumentale — laisse une assez grande latitude à la justesse de cet accord, surtout vers l'aigu. La réaction du tuyau — palier — ramène automatiquement les lèvres à la fréquence de ce partiel.

Les sons N : m, en particulier les sons N : 2, doivent pour les mêmes raisons s'émettre avec facilité et sûreté, toutes proportions gardées. Nous appellerons sons privilégiés les sons N : 2; on en verra plus loin la raison.

Soient les partiels 2, 3, 4, 5 d'un trombone en ut, tous les pistons levés.

$$ut_2 (2) \quad sol_2 (3) \quad ut_3 (4) \quad mi_3 (5).$$

Les sons privilégiés doivent être $sol_1 (3 : 2)$ (quarte grave de ut_2), $mi_2 (5 : 2)$, tierce mineure grave de sol_2 ; ce que l'expérience confirme pour tous les instruments à perce étroite.

Sur le tuba, instrument à grosse perce où la longueur de la partie conique est de l'ordre de la partie cylindrique, le son privilégié au-dessous du partiel 2 est à la quinte de ce partiel.

Aurions-nous affaire à la douzième grave du partiel 4 — palier $N_4 : 3$ — ? La réaction de l'harmonique 3 serait-elle intense sur les instruments genre tuba ?

3° Embouchons un instrument quelconque et accordons nos lèvres pour l'émission du son propre 2. Cela fait, abaissons la fréquence des lèvres. Nous abaissons du coup le son du système tuyau-anche. Nous appellerons sons forcés, les sons ainsi produits. Ils correspondent à la courbe S.

L'émission des sons forcés est assez difficile pour le débutant. Dans le cas des sons propres, les lèvres sont entretenues par l'onde stationnaire du tuyau. Il n'en est plus ainsi pour les sons forcés; c'est au tour de l'anche d'entretenir l'onde du tuyau. Cependant avec de l'exercice, on arrive à les émettre avec facilité et quelque sûreté. Je dis quelque sûreté, car il n'existe plus de palier pour corriger la fausseté des

lèvres. La justesse des sons forcés dépend de l'empire de l'exécutant sur la tension de ses lèvres.

Le timbre des sons forcés rappelle assez bien celui des sons propres.

On peut ainsi descendre fort au-dessous du son propre 2. Mais on ne comblera pas l'intervalle entre les sons propres 2 et 1 (supposons pour le moment le son propre 1 à l'octave grave du son 2), à cause précisément du palier 1 qui nous ramènera brutalement au son 1.

4° Inversement, il sera très difficile — sinon impossible — d'émettre des sons forcés immédiatement au-dessus du partiel 1. De fait, en forçant beaucoup la pression, on peut hausser le son d'un demi-ton. Le son obtenu est mauvais, très dur. Nous ne sommes pas sur la courbe S; nous avons tout simplement haussé le palier. Nous savons, en effet, que sa hauteur varie avec la pression. Mais quoi que nous fassions nous ne comblerons pas l'intervalle entre ce nouveau palier 1, et le son le plus grave obtenu au-dessous du palier 2.

Dans cet abaissement du son à partir du partiel 2, abaissement qui demandera assez de travail aux lèvres de l'exécutant, nous rencontrerons le son 3 : 2 qui sortira sans effort, avec un timbre plus agréable. Aussi l'appelons-nous son privilégié.

Même mécanisme pour les sons forcés au-dessous des partiels 3, 4, 5 ... Plus le numéro du partiel est grand et plus il devient facile de combler chromatiquement — par demi-tons — l'intervalle entre deux partiels successifs. C'est ainsi que sur le cor à piston, on peut donner, sans toucher aux pistons, la gamme chromatique comprise entre les partiels 8 et 16.

5° Revenons au partiel 1. J'ai supposé, pour faciliter l'exposé, qu'il existait comme terme 1 de la série entière 1, 2, 3, ... Mes expériences sur les tuyaux cylindro-coniques (voir H. Bouasse, *Instruments à vent*) montrent que pour les instruments d'orchestre à perce étroite le partiel 1 est non à l'octave grave du partiel 2, mais à la douzième grave de ce partiel, tout comme si, pour les deux premiers partiels, le tuyau était un bourdon.

Or sur le cornet à piston, muni d'une embouchure de trombone, sur le trombone muni d'une embouchure de tuba, il est très facile d'émettre l'octave grave juste du partiel 2.

La contradiction est levée par ce que nous savons des sons privilégiés. Le terme 1 de la série 1, 2, 3, ... n'est pas un son propre de l'instrument : c'est le son privilégié $N_2 : 2$.

Il est évident qu'au-dessous du son propre 1 on obtient tout ce qu'on veut avec les lèvres, dans un intervalle qui n'a pas de limite. Cette remarque est fondamentale pour la théorie du *Serpent*.

§ 25. — Théorie du Serpent (fig. 22).

Nombreux sont les instrumentistes contemporains qui connaissent et utilisent les sons forcés (en particulier les cors et trombones à coulisse). Plus nombreux, ceux qui les ignorent. Les anciens qui jouaient du serpent, ne connaissaient pour ainsi dire qu'eux.

Je ne m'attarderai pas à la description de cet instrument curieux, dont la forme

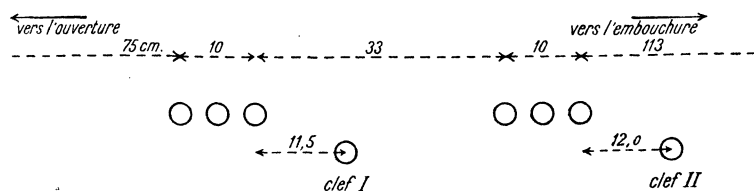


FIG. 22.

sinueuse rappelle l'animal dont il porte le nom. C'est un tube conique. Voici les caractéristiques du serpent du Conservatoire de Toulouse.

Longueur totale, 241 cm.

Fondamental théorique, $Ré_1 = 70$.

L'instrument possède deux groupes de trois trous, et deux clefs. Les trous ont 14 mm. de diamètre. La figure 22 représente la position relative des trous et des clefs.

Quels sons, quelle gamme peut donner un instrument pareil ?

L'exécutant, ignorant la technique, émet n'importe quoi, et n'est guère surpris de constater que le son, émis au hasard, n'est pas modifié par le jeu des doigts. Tout s'explique par les sons forcés.

Fait qui doit orienter les recherches : tous les trous bouchés, le fondamental doit être de l'ordre du $ré_1$. Débouchons successivement les trous en commençant par celui qui est le plus près de l'ouverture. Cherchons pour chaque cas la limite supérieure des sons possibles. Ces limites nous donneront les divers fondamentaux de l'instrument (sons propres, palier N_1). Les voici :

$fa_1^\sharp$ $la_1^\flat$ $la_1^\flat$ $la_1^\flat$ $si_1^\flat$ ut_2 ut_2 $ut_2^\sharp$ $ré_2$

Au-dessous de ces notes on obtient tout ce qu'on veut avec les lèvres.

En particulier, après une heure d'exercice, j'ai fait sortir *parfaitement correcte* l'échelle

ré, mi, fa, fa[#], sol, la, si², si, ut₂, ut₂[#], ré₂

qui comprend notre gamme diatonique *ré majeur* et toutes les gammes du plain-chant. Rappelons que le serpent accompagnait dans les églises les chants liturgiques; il remplaçait le petit orgue de chœur ou l'harmonium, l'un et l'autre d'introduction récente. L'instrument était confié au chantre qui, à défaut de voix, avait de l'oreille. La tradition, conservée dans les vieilles maîtrises, veut que l'accompagnement fut abominable. Nous le croirons sans peine.

Les sons 2 (octave) de l'échelle précédente sortent bien. Cette échelle 2 est à l'unisson du médium de la voix de baryton.

En définitive, on a percé le serpent de trous aussi larges et aussi écartés que le permettent les doigts, de manière que chaque groupe, chaque clef fasse monter la limite supérieure du son. Les lèvres font le reste.

On a perfectionné le serpent sous le Premier Empire. On lui a donné la forme du basson; on a multiplié le nombre des clefs. Plus tard il est devenu l'ophicléide. A chaque clef, correspond un fondamental N_i bien déterminé.

Les instruments à pistons ou à cylindres, de jeu plus facile, ont remplacé les instruments à clefs.

SECONDE PARTIE

ANCHE + I

26. — Schème de Weber.

Les énoncés qui suivent ne valent que pour l'anche libre associée à un *bourdon*.
Nous verrons plus loin comment on les modifie pour l'anche battante.

Supposons l'anche au tampon.

1° Tuyau de longueur l variable, anche n_a invariable (*fig. 26*).

Soit n_a la fréquence de l'anche pincée.

Aux relations

$$k \frac{\lambda_a}{2} < l < (2k + 1) \frac{\lambda_a}{4} \quad k = 0; 1, 2, \dots$$

correspond le partiel $2k + 1$ du bourdon $n = (2k + 1) V : 4L$;

à
$$(2k + 1) \frac{\lambda_a}{4} < l < (k + 1) \frac{\lambda_a}{2}$$

correspond le son n_a :

Dans le plan des fréquences-longueurs (*fig. 26*), on décrit les arcs de nodale AB, A'B', ... situés *au-dessus* du palier de l'anche pincée, et les paliers BC, B'C', ...

Supposons le schème de Weber imparfait (il l'est nécessairement pour la nodale 0; à une longueur nulle correspondrait une fréquence infinie) : des nodales, on décrit des arcs plus petits que AB, A'B' (les points A, A' sont plus rapprochés de B, B'); les paliers BC, B'C' s'arrêtent avant C, C'. Les sauts, du palier sur les nodales, sont plus petits que les valeurs théoriques 3 : 2, 5 : 4, 7 : 6, ... : ils se produisent après des tacets plus ou moins longs.

Fait essentiel : les fréquences du système anche-bourdon, pour une réaction du bourdon moyenne ou faible, sont supérieures ou égales à la fréquence de l'anche pincée.

Conséquence : pour que l'anche parle, il faut qu'un nœud de l'onde $\lambda_a = V : n_a$ soit réel, c'est-à-dire soit *dans* le tuyau au voisinage du tampon.

Si le nœud est fictif (hors du tuyau), $l < (2k + 1) \lambda_a : 4$, et la réaction convenable,

le tampon ramène le nœud à son niveau. D'où un partiel du bourdon : ce partiel impose sa fréquence à l'anche.

Si le nœud est réel, le tampon n'agit plus sur lui. L'onde λ_a n'est pas modifiée; elle entretient l'anche. La fréquence du système est n_a .

Pratiquement les courbes des fréquences sont à droite des nodales et au-dessus du palier. Elles tendent à se confondre avec les nodales lorsque la pression est forte, la réaction du bourdon intense.

Rappelons en outre que le schème de Weber ne s'applique pas au cas de l'anche + 1 sans tuyau ni rigole, $l = 0$; nous savons qu'alors elle parle (Cf. trémolo de l'orgue).

2° Tuyau de longueur L invariable, anche n_a de fréquence variable (fig. 23).

Pour

$$k \frac{V}{2L} < n_a < (2k + 1) \frac{V}{4L} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

le système donne le partiel $2k + 1$ du bourdon L , $N = (2k + 1)V : 4L$:

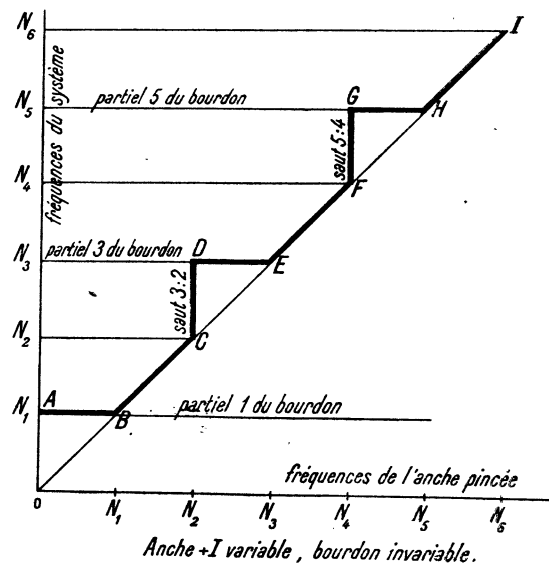


FIG. 23.

pour

$$(2k + 1) \frac{V}{4L} < n_a < (k + 1) \frac{V}{2L},$$

le son n_a variable de l'anche.

Sur les figures 23 et 29, le schème de Weber est le tracé ABCDEFGHI.

27. — Anche libre, anche coplanaire avec le cadre, bourdon de longueur variable. Cheng.

1° Principe : que le tuyau serve de tuyau proprement dit (*fig. 24*) ou de porte-vent (*fig. 25*), à égalité de longueur et de pression la fréquence est la même. Le son est plus beau, plus intense avec le tuyau qu'avec le porte-vent.

L'allure des phénomènes ne dépend pas du bâillement de l'anche. Avec un bâillement nul (anche coplanaire avec le cadre) l'anche est encore + I.

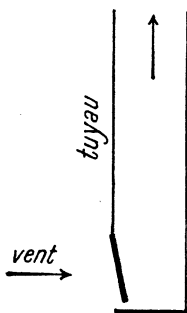


FIG. 24.

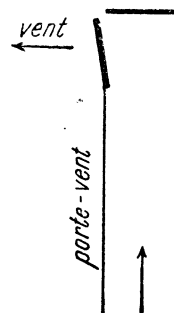


FIG. 25.

Faisons croître la longueur du tuyau à partir de 0. Opérons à pression constante. Le tuyau commence à parler d'autant plus avant $\lambda_a : 4$ que la pression est plus forte. Le son est d'abord très faible, très voilé; l'amplitude de l'anche, très petite. Lorsque le bâillement n'est pas nul, l'anche en vibrant ne pénètre pas dans le cadre. On constate que la fréquence varie peu tant qu'il en est ainsi. On décrit parfois un petit palier parallèle à l'axe des longueurs; il est situé à droite de la nodale (*fig. 36*).

Le tuyau s'allongeant, l'amplitude de l'anche croît; l'anche pénètre de plus en plus dans le cadre. Le son devient intense et prend, suivant le diamètre du tuyau et la nature de l'anche, le timbre d'un bourdon ou d'une clarinette. En même temps la fréquence baisse : on décrit une courbe parallèle à la nodale 0. Cette courbe peut se trouver très à droite de cette nodale (*fig. 36*). Au delà de $\lambda_a : 4$ le son devient criard; il est toujours intense. Brusquement au voisinage de $\lambda_a : 2$ le son s'affaiblit et s'éteint.

Les courbes des fréquences se confondent au voisinage de $\lambda_a : 2$. La fréquence est alors indépendante de la pression.

Suivant la pression on a après $\lambda_a : 2$, le tacet ou le saut sur la courbe relative à la nodale 1.

Fait général, les reprises sur les nodales se font sur la même fréquence.

La hauteur de la reprise est fonction croissante de la pression.

Il s'ensuit que les longueurs du tuyau, pour lesquelles se font les reprises, n'ont rien à voir avec les longueurs $k\lambda_a : 2$ relatives à la fréquence de l'anche pincée. Soit, pour la pression p , n_r le son le plus aigu que puisse donner le système anche-bourdon. Les reprises se feront sur les longueurs $l_r = (2k+1)V : 4n_r$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Il s'ensuit encore que les tacets seront de plus en plus courts, et finiront par disparaître. Alors deux régimes seront à la fois possibles : le palier n_a et une nodale k . Nous aurons l'un ou l'autre de ces régimes, ou l'un et l'autre (Accords, sons roulants).

2° Voici une expérience. L'anche est libre, sans rigole, au tampon d'un tuyau de 16 mm.

$$\begin{aligned} n_a &= 203,0; & \lambda_a : 4 &= 41,8 \text{ cm.}; & \lambda_a : 2 &= 83,7; & 3\lambda_a : 4 &= 125,4 \text{ cm.}; \\ 2\lambda_a : 2 &= 167,4; & 5\lambda_a : 4 &= 209,0; & 3\lambda_a : 2 &= 251,1. \end{aligned}$$

Pression 170 mm.

Longueurs.	Fréquences.
de 0 à 36,9 cm.	tacet.
36,9	256,1 son très faible, voilé.
40,0	255,2 son plus intense.
44,3	247,2 son très intense.
47,3	234,6 son plus intense encore.
50,5	221,8 le son devient criard.
56,1	210,6
63,7	205,5
70,0	203,6
77,2	203,6
81,4	203,6 son très faible, obtenu en faisant coulisser le tuyau.
de 81,4 à 105,6	tacet.
105,6	255,7
163,0	204,8
de 163,0 à 175,7	tacet.
175,7	255,2
245,6	204,8 et 248,5 saut, sans tacet, sur la nodale 3.

Avec une pression de 40 mm., le tuyau ne parle qu'à partir de $l = 48,9$ cm; la fréquence est $n = 224,4$.

3° Utilisons une rigole. Nous diminuons la réaction du tuyau. Le tacet se produit très avant $\lambda_a : 2$.

Voici une expérience intéressante parce que je détermine les pressions à partir

desquelles le tuyau parle. Je note en même temps les variations de la fréquence avec la pression.

$$\text{Anche } n_a = 222,9; \quad \lambda_a : 2 = 76,2 \text{ cm.}; \quad 2\lambda_a : 2 = 152,4 \text{ cm.}$$

Tuyau de 16 mm. Rigole de 10 mm., longueur 7 cm.

Longueurs.	Pressions.	Fréquences.	
41,5 cm.	160 mm.	249	son voilé, faible.
44,6	{ 76	239	sons moins voilés, plus intenses.
	{ 146	242	
47,2	{ 60	233	sons clairs, agréables.
	{ 146	236	
48,7	{ 56	232	sons intenses.
	{ 126	233	
53,1	{ 30	227	
	{ 86	227	
56,7	{ 20	224	
	{ 86	224	
61,4	{ 10	223	sons bruyants, débit maximum.
	{ 66	223	
64,8	{ 26	223	—
	{ 76	223	
67,6	40	223	
67,9	46	223	
68,4	100	223	

Au delà de 68,4 cm., tacet quelle que soit la pression.

111,7	160		
116,8	120		
118,8	{ 46	227	sons clairs, intenses.
	{ 126	227	
124,5	{ 36	223	sons bruyants, débit maximum.
	{ 86	223	
129,8	{ 26	223	—
	{ 86	223	
131,9	80	223	

Au delà de 133 cm. le tuyau se tait.

Conclusions : pour les valeurs de l comprises entre 50 et 68 cm., 120 et 130 cm., la fréquence est indépendante de la pression. L'intensité sonore, le débit sont maximums au voisinage des longueurs 61, 126 cm. Mais pour ces longueurs le timbre est le plus désagréable (son criard de l'anche + E sans résonateur).

Le tuyau se tait bien avant $\lambda_a : 2$.

4° Anche coplanaire avec le cadre. — Cadre et languette ont la même épaisseur

(0,4 mm.). Le cadre est en tôle d'acier trempé. L'anche est une languette d'acier (baleine de corset) parfaitement plane. Son talon est soudé à une plaque épaisse de laiton : quatre vis à écrou fixent la plaque au cadre.

Longueur de l'anche 50,5 mm., largeur 6,5 mm.; épaisseur 0,4 mm.

Fréquence pincée $n_a = 130,8$, $\lambda_a : 4 = 64,9$ cm., $\lambda_a : 2 = 129,8$ cm.

Le tuyau a 16 mm. de diamètre; l'anche est au tampon du tuyau; on n'utilise pas de rigole.

La figure 26 donne les courbes des fréquences $p = 74$ mm., $p = 163$ mm.

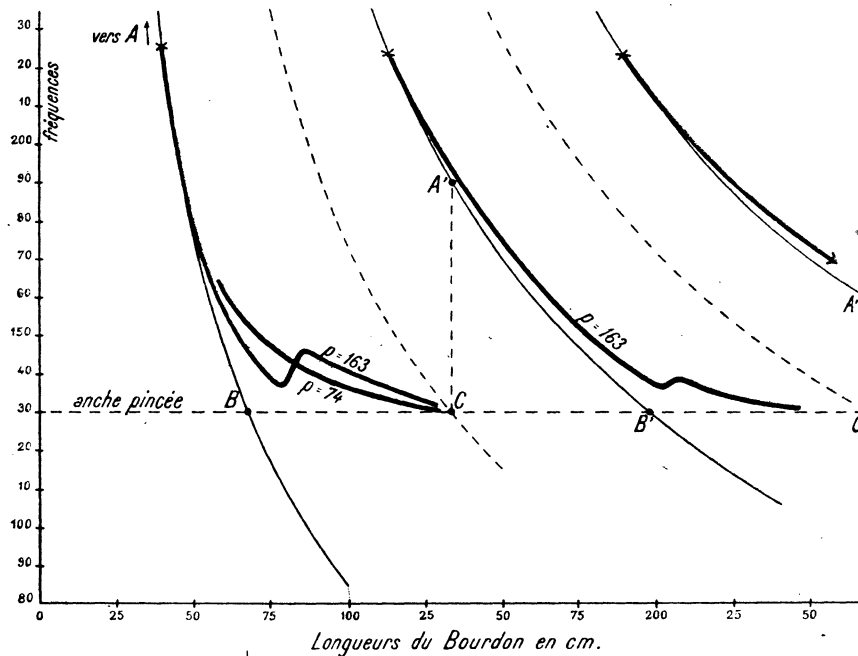


FIG. 26.

Nous retrouvons les phénomènes du § 8 (palier bosselé); sans nul doute il faut les attribuer à une cause de même nature : la réaction du tuyau sur l'harmonique 2 de l'onde λ_a .

On remarquera pour la courbe $p = 163$ mm. les reprises sur la même fréquence, et la coexistence du palier et de la nodale 1, du palier et de la nodale 2. En particulier, à partir de $l = 200$ cm., les sons roulent, mais avec prédominance du palier d'abord, de la nodale ensuite. Finalement le son nodal reste seul.

Pour $p = 30$ mm., le tuyau ne parle pour aucune longueur.

Pour $p = 40$ mm., le tuyau ne parle que de 116,3 à 120 cm. En faisant coulisser le tuyau, on peut conserver le son jusqu'à $l = 124,2$. Au delà, le tuyau se tait. La fréquence est exactement celle de l'anche pincée.

5° *Cheng*. — Les anches libres coplanaires avec le cadre se rencontrent dans un instrument très répandu en Extrême-Orient. Les Chinois l'appellent *Cheng*.

Sur un réservoir commun (*fig. 27*) sont posés plusieurs tuyaux cylindriques de longueurs différentes au bout desquels sont adaptées des anches de fréquence n_a convenable. Au voisinage de l'anche les tuyaux sont percés d'un trou. Trous ouverts, les tuyaux ne parlent pas. En bouchant ces trous avec les doigts, le musicien fait parler les tuyaux qu'il désire.

Les anches sont découpées au couteau dans une lame de clinquant écornée par laminage. Pour que l'haleine du musicien n'oxyde pas les languettes, on joue de l'instrument en aspirant l'air du réservoir.

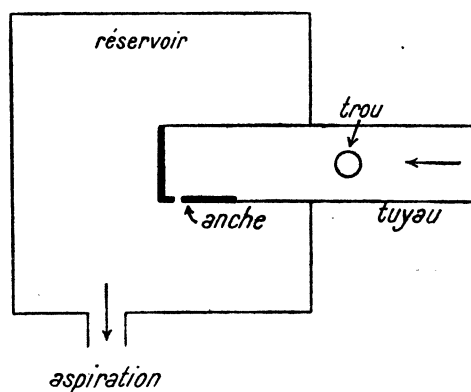


FIG. 27.

Problème : soit n_a la fréquence de l'anche pincée. Quelle longueur faut-il donner au tuyau pour qu'il soit : a) expressif (fréquence indépendante de l'intensité du son), b) peu fatigant à jouer, c) le moins criard possible ?

Les expériences précédentes donnent la réponse. Le tuyau est expressif pour tous les sons de palier. $l > \lambda_a : 4$. Si le tuyau est trop long, le jeu est facile, mais le son, criard.

Bien entendu, ces conclusions supposent que le cas du 3° est réalisé (réaction faible du tuyau).

28. — Anche battante.

A. — Tuyau variable, anche invariable (*fig. 28*).

Fréquence de l'anche pincée $n_a = 163,7$; $\lambda_a : 2 = 104,0$ cm.; $2\lambda_a : 2 = 208,0$.
Tuyau de 16 mm.

1° $p = 170$ mm. L'anche est montée sur une rigole (longueur 10 cm., diamètre 12 mm.).

La fréquence de l'anche + E sans résonateur est $n_{ap} = 224,8$.

Le tuyau parle à partir de $l = 56,6$ cm., un peu après $\lambda_a : 4$. Le son est faible, à timbre de bourdon. La fréquence est 201,7. l croissant, le son monte très légèrement. Pour $l = 58,1$ cm., $n = 202,3$. Fait capital, en vibrant la partie de la languette opposée au talon ne choque pas le cadre. L'anche est donc libre; plus exactement semi-libre. Nous décrivons un arc de la courbe S' relative à l'anche n_a libre.

Donnons une chiquenaude à l'anche. Brusquement elle devient battante. La fréquence saute de 202,3 à 220,3. Nous sommes sur la courbe S de l'anche battante.

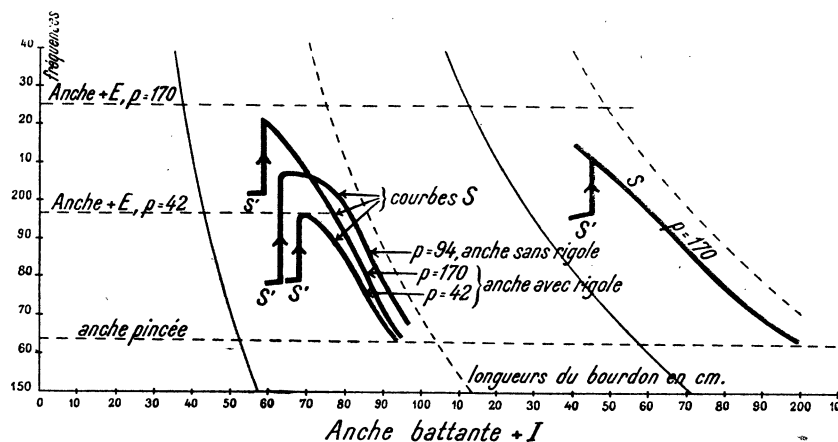


FIG. 28.

Le son est fort, criard; sa fréquence est à peine inférieure à n_{ap} . Allongeons le tuyau; l'intensité du son diminue; il se voile et s'éteint lorsque $l = 94,2$ cm.

Le tacet finit avec $l = 140$ cm., un peu après $3\lambda_a : 4$; et les mêmes phénomènes recommencent.

Remarque : au voisinage des longueurs 59, 141 cm., les deux régimes S et S' sont tous les deux possibles; en d'autres termes, on peut prolonger vers la gauche les courbes S de l'anche battante. Mais ces régimes ne peuvent évidemment co-exister; les accords sont impossibles.

2° $p = 42$ mm. $n_{ap} = 196,2$. Le saut $S'S$ se fait de 179,5 à 196,2.

3° $p = 94$ mm. La rigole est supprimée. Mêmes phénomènes.

Sauts SS' : de 177,2 à 203,0, $l = 63,5$; de 180 à 207,4, $l = 64,7$.

De $l = 64,7$ à $l = 73,3$, la fréquence S ne varie guère. Nous avons déjà signalé que la courbe de l'anche libre + I pouvait débiter par un palier (fig. 36).

4° Conclusions : Soit p la pression, n_{ap} la fréquence de l'anche + E pour la pression p . Les sons possibles vérifient les inégalités $n_{ap} \geq n \geq n_a$.

Les courbes des fréquences sont très déportées vers la droite : elles se rapprochent des ventrales. De plus, elles coupent à angle vif le palier de l'anche pincée. Les courbes de l'anche libre au contraire viennent mourir tangentiellement à ce palier.

B. — *Anche variable, tuyau invariable (fig. 29).*

1° Le tuyau sert de porte-vent; la rasette est montée comme au paragraphe 20. L'anche est sans rigole.

Tuyau : longueur 111,1 cm.; diamètre 16 mm.

Partiels théoriques du bourdon..... $N_1 = 76,5$; $N_2 = 229,5$.

— — du tuyau ouvert aux deux bouts. $N_1 = 153,0$; $N_2 = 306,0$.

Pression : 100 mm.

En abscisses, je porte les positions de la rasette; en ordonnées les fréquences.

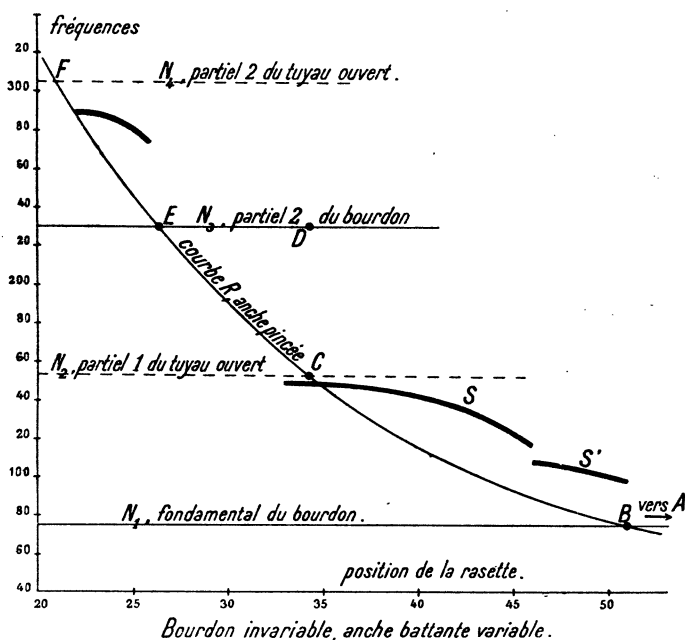


FIG. 29.

Je détermine d'abord la courbe R des fréquences de l'anche pincée. D'après les expériences A, il est légitime de rapporter les phénomènes à cette courbe.

2° Nous retrouvons les courbes S' et S. Les sons S' ($n = 99,6$ à $n = 107,3$) sont d'intensité médiocre; leur timbre est celui d'un bourdon. L'anche est semi-libre.

Brusquement on saute de $n = 107,3$ sur $n = 117,1$ (Courbe S). Le son est fort, criard. n croissant de 117,1 à 148,2, l'intensité sonore diminue. Puis vient le tacet.

Rappelons que le parcours de Weber est ABCDEF, § 26, 2°.

Expliquons le parcours réel. Comparons les figures 28 et 29. Le tuyau commence à parler lorsque la fréquence de l'anche pincée est à l'unisson du partiel

1 du bourdon (courbe S, $l = \lambda_a : 4$). Il cesse de parler lorsque la fréquence de l'anche pincée est à l'unisson du fondamental du tuyau ouvert ($l = \lambda_a : 2$).

Sur la figure 28, rien qui rappelle un parcours nodal, ou le palier de l'anche pincée. Corrélativement sur la figure 29, point de palier N_1 , ni de déplacement sur la courbe de l'anche pincée.

L'arc S' se rapporte à l'anche semi-libre. Continué vers la droite, il deviendrait tangent à l'horizontale N_1 (plus exactement à une horizontale de fréquence $N_1' > N_1$).

3° Le son reparait avec la fréquence $n = 273,8$. On remarquera que la réapparition du son se fait lorsque la fréquence de l'anche pincée est à l'unisson du partiel N_3 du bourdon. Le tacet survient lorsque la fréquence de l'anche pincée est voisine du partiel N_4 (partiel 2) du tuyau ouvert.

TROISIÈME PARTIE EXPÉRIENCES DIVERSES

29. — Bourdon avec deux anches libres + E.

Les anches sont au tampon du bourdon (*fig. 30*).

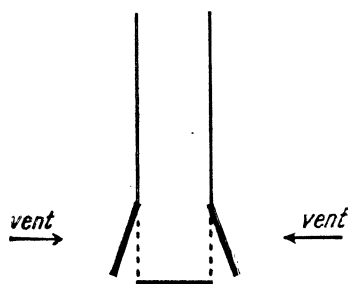


FIG. 30.

A. — Les anches ne sont pas à l'unisson.

Soient n_a , n_g les fréquences pincées : $n_a > n_g$.

Principe : lorsque le tuyau est palier pour les deux anches à la fois, on entend les deux sons de palier; lorsque le tuyau est nodale pour les deux anches, on n'entend qu'un son : le son nodal $n = V : 4l$; lorsque le tuyau est palier pour une anche, nodale pour l'autre, seule parle l'anche pour laquelle le tuyau est palier.

Tuyau 16 mm.

Pression 80 mm.

$n_g = 163,3$ $\lambda : 4 = 52,0 \text{ cm.};$ $\lambda : 2 = 104,0 \text{ cm.}$
 $n_a = 194,7$ $\lambda : 4 = 43,6;$ $\lambda : 2 = 87,2.$

Longueur du tuyau.

Anche A.

Anche G.

12,2 cm.	196,0	165,3	
26,2	187,1	157,9	
30,7	184,5	154,3	
36,1		153,2	} l'anche A ne vibre pas.
43,6		143,7	
51,5		130,8	
60,0	118,9	118,9	} Les deux anches vibrent avec la même amplitude.
63,7	112,0	112,0	
67,7	107,0	107,0	

A partir de $l = 60$ cm., longueur nodale pour les deux anches, outre les sons du tableau, on obtient des accords — fondamental et octave aiguë — qui semblent dus à la coexistence de la nodale commune et du palier de l'anche grave. L'amplitude des anches est égale et plus grande que l'amplitude relative aux sons nodaux. On provoque ces accords au moyen d'une surpression momentanée.

Voici les fondamentaux :

Longueurs.	Fréquences.	Longueurs.	Fréquences.
60,0 cm.	89,7	82,2	85,4
67,6	88,5	86,4	83,9
76,5	87,2	90,4	80,7

$l = 90,4$ cm. est, à peu de chose près, la longueur demi-onde pour le son de l'anche aiguë. Brusquement nous sautons sur son palier. L'anche grave se tait; elle ne se fera entendre que lorsque le tuyau sera palier pour sa fréquence pincée.

Longueurs.	Anche aiguë.	Anche grave.
90,4 cm.	196,0	} vibration nulle.
94,9	196,0	
110,8	192,5	
120,4	190,3	
		161,8

B. — Les anches sont à l'unisson.

J'utilise deux anches d'harmonium identiques.

Fréquence pincée commune $n_a = 189,7$; $\lambda_a : 4 = 44,8$ cm.; $\lambda_a : 2 = 89,6$ cm.

1° Allongeons le tuyau à partir d'une longueur nulle.

Nous commençons par le phénomène ordinaire de Weber.

Longueurs.	Fréquences.
21,0 cm.	189,7
30,8	172,6

Puis, brusquement paraît le son $2n_a = 186,1 \times 2$, octave aiguë des anches pincées.

Nous conservons ce son jusqu'après $\lambda_a : 2$. Lorsque $l = 99,6$ cm., brusquement nous tombons sur le son $n_a = 185,0$ et nous continuons par le phénomène de Weber. Lorsque $l = 115$ cm., le son $2n_a$ reparait.

Nous avons donc deux régimes : le phénomène de Weber, le son $2n_a$.

Pour une même longueur du tuyau on peut avoir l'un ou l'autre de ces régimes; il suffit d'utiliser un tuyau à coulisse. Mais les deux régimes ne peuvent coexister; des accords sont impossibles.

2° *Examen stroboscopique.* — Pour le phénomène de Weber, les anches sont en phase. Les anches disposées comme l'indique la figure 30, on voit à travers le disque stroboscopique, les anches ensemble s'écarter et se rapprocher du tuyau.

Pour le son $2n_a$, quelle que soit la longueur du tuyau, les anches sont décalées de π . L'une se rapproche du tuyau quand l'autre s'en éloigne et inversement.

De ce que le son entendu est $2n_a$, ne résulte pas que les anches vibrent avec cette fréquence. Les anches vibrent avec la fréquence n_a , ce que l'on vérifie avec le disque stroboscopique. Mais par suite du décalage de π , à chaque période $T_a = 1 : n_a$, correspond un double jet d'air dans le tuyau : d'où pour l'onde du tuyau la fréquence double $2n_a$.

3° *État stationnaire dans le tuyau.* — Soit le son $2n_a$. Quelle que soit sa longueur, il existe dans le tuyau une onde stationnaire de longueur $\lambda_a : 2$. Au bout ouvert se trouve toujours un ventre; corrélativement au tampon se trouve n'importe quoi.

Supposons le tuyau trois quart d'onde pour le son $2n_a$. Théoriquement il doit exister aux anches un nœud : l'intensité doit être sinon nulle, du moins minimum. Soit $l = 67,5$ cm. cette longueur calculée. Faisons varier l de part et d'autre de cette longueur; on constate ce minimum, mais il est loin d'être nul. Pour $l = 67,5$ cm., la sonde indique un ventre à 45 cm. du bout ouvert; à quoi correspond pour le quart d'onde 22,5 cm. et pour les trois quarts d'onde 67,5 cm. Donc à l'anche existe bien un nœud de l'onde $2n_a$.

Supposons le tuyau demi-onde pour le son n_a . Le tuyau parle avec la fréquence $2n_a$, mais une oreille avertie entend aussi le son n_a . En effet, la sonde placée au milieu du tuyau (nœud pour l'onde n_a), on voit dans le champ du miroir tournant, animé d'une rotation uniforme, par exemple 5 dents. La sonde placée au quart de la longueur du tuyau (nœud pour l'onde $2n_a$), on voit 10 dents égales et équidistantes. Leur hauteur est égale à celle des 5 dents de l'onde n_a (2 cm. pour préciser).

Chose curieuse, la sonde se déplaçant du nœud de n_a au nœud de $2n_a$, les 5 dents se dédoublent *par le côté*. Les dents nouvelles ont la hauteur des dents primitives. Lorsque la sonde est au nœud de $2n_a$, les 5 dents supplémentaires sont exactement au milieu des 5 dents primitives.

Pour $l = 99,6$ cm., le tuyau parle avec la fréquence n_a ; mais on entend le son $2n_a$, harmonique de n_a . La sonde, au nœud de n_a , donne 5 dents plus longues (4 cm.), plus acérées que dans l'expérience précédente. Déplaçons la sonde vers le nœud de $2n_a$. Peu à peu naissent et se développent, *au milieu* des 5 dents primitives, 5 dents supplémentaires. En même temps les dents n_a s'empâtent et s'abaissent. Mais leur hauteur reste toujours supérieure à celle des dents $2n_a$. En particulier, au nœud de $2n_a$, elles sont six fois plus longues.

30. — Anche + E, tuyau ouvert aux deux bouts.

Ce Mémoire est consacré aux systèmes anche-bourdon. Mais le phénomène de Weber caractérisé, ainsi qu'on l'a vu, par la réaction des *partiels* du tuyau, est général. Le voici avec un tuyau ouvert aux deux bouts.

1° Anche au milieu d'un tuyau de longueur l variable (fig. 31).

Tout se passe comme pour un bourdon de longueur $l:2$.

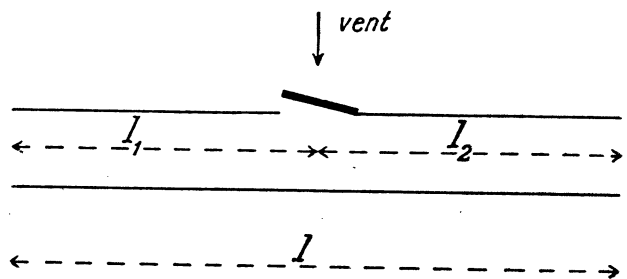


FIG. 31.

Anche libre $n_a = 203,0$; $\lambda_a : 4 = 41,8$ cm.; $\lambda_a : 2 = 83,7$ cm. (Cf. § 6).
Pression 120 mm.; tuyau 16 mm.

	Longueurs.		Fréquences.	$\frac{\lambda}{2}$	$\frac{\lambda}{2} - l$
	l	$l:2$			
palier	27,0 cm.	13,5 cm.	200,5		
	63,4	31,7	200,5		
	78,4	39,2	195,3		
nodale	88,0	44,0	180,0		
	97,0	48,5	166,2		
	113,2	56,6	145,0		
	137,4	68,7	120,2	117,2 cm.	4,0 cm.
	164,8	82,4	100,8	141,4	4,0
	166,8	83,4	99,9	168,6	3,8
	171,0	85,5	99,9 et 199,9	170,2	3,4

Conclusions : pour $0 < l < \lambda_a : 2$ la réaction du tuyau est nulle; pour $\lambda_a : 2 < l < 2\lambda_a : 2$ l'anche est au nœud du fondamental du tuyau ouvert aux deux bouts : la réaction est maxima. Pour $l = 2\lambda_a : 2$, l'anche est au ventre du partiel 2; la réaction redevient nulle.

2° Tuyau de longueur l constante; on déplace l'anche le long du tuyau.

Les phénomènes, symétriques par rapport au milieu du tuyau, dépendent de l .

La figure 32 se rapporte à $l = 110,5$ cm., longueur plus grande que $\lambda_a : 2$.

En ordonnées sont portées les fréquences du système; en abscisses la distance l_i du milieu de l'anche à un bout du tuyau.

Soient les paliers AA' relatifs à la fréquence n_a de l'anche pincée; CD, relatif au partiel 1 du tuyau.

Pour $0 < l < \lambda_a : 2$, le palier n_a existe seul; il a la longueur l .

Pour $l = \lambda_a : 2$, les 2 paliers AA', CD sont confondus; leur longueur commune est l .

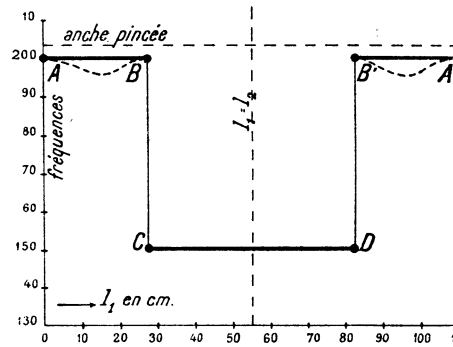


FIG. 32.

Pour $l > \lambda_a : 2$, les paliers sont séparés comme sur la figure 32. CD est d'autant plus court et grave que le tuyau est plus voisin de la longueur $\lambda_a : 2$; corrélativement les segments AB, A'B' du palier n_a , d'abord réduits à rien, s'allongent.

Pour $l = \lambda_a : 2$, le palier CD s'évanouit. Les segments AB, A'B' se touchent.

Quelle que soit la longueur du tuyau, le palier CD est une horizontale parfaite; ce qui revient à dire que la fréquence du système est indépendante de la position de l'anche : c'est le partiel 1 du tuyau.

Au contraire, les paliers AB, A'B' sont des courbes dont le trait interrompu de la figure 32 donne une idée.

Voici trois expériences : $p = 120$ mm.

a) $l = 70$ cm. $< \lambda_a : 2$; b) $l = 110,5$ cm. $> \lambda_a : 2$; c) $l = 150$ cm. $> \lambda_a : 2$.

l_i	n	l_i	n	l_i	n
13,5 cm.	196,2	20,0	199,9	13,5	200,0
20,0	189,2	25,0	199,9	20,0	197,0
27,0	187,6	27,0	Accord. 199,9 et 148,2	27,0	196,0
30,0	190,3	28,9	150,0	44,6	194,7
35,0	198,7	de 40,5 à 55,2	150,0	47,6	194,1
				55,1	198,1
				60,0	200,5
				68,6	Accord. 200,5 et 110,1
				de 71,7 à 75,0	110,1

Fait général, pour $l = AB$, A'B' le tuyau peut faire entendre simultanément les sons des 2 paliers. Ce qui veut dire que les 2 paliers ne se raccordent pas ; on passe sans transition d'un palier à l'autre.

Lorsque le tuyau réagit, palier CD, la sonde indique un nœud en son milieu, quelle que soit la position de l'anche. Déplaçons la sonde d'un bout à l'autre du tuyau ; rien dans la flamme ne décèle le passage de la sonde dans la région de l'anche ; les ondes, de part et d'autre de l'anche, sont en phase.

3° Rôle du vent dans le tuyau.

Donnons au tuyau une longueur $l > \lambda_a : 2$; il réagit. Soit N la fréquence du son obtenu. Elle ne dépend pas de la pression.

Le tuyau est le siège de deux phénomènes : onde stationnaire, écoulement de

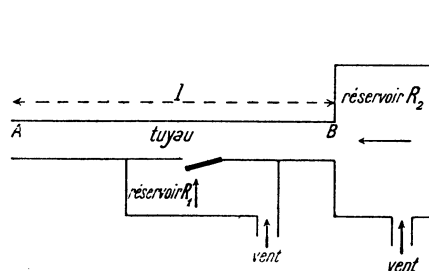


FIG. 33.

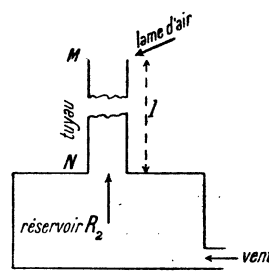


FIG. 34.

l'air. Par suite du faible débit à travers l'anche, quelle que soit la pression dans le réservoir R_1 (fig. 33), la vitesse du vent dans le tuyau reste faible, de l'ordre du mètre à la seconde. L'existence du son N prouve la compatibilité d'une onde stationnaire avec un écoulement lent.

Nous pouvons avec le dispositif de la figure 33, réaliser dans le tuyau des écoulements rapides sans toucher à l'anche. L'un des bouts du tuyau aboutit au réservoir R_2 d'assez grandes dimensions.

Faisons parler l'anche.

Première expérience : Que le réservoir R_2 soit ouvert ou fermé, la fréquence du système anche-tuyau est N . Donc le réservoir R_2 n'introduit aucune correction à la longueur l du tuyau. D'autre part quand nous fermons R_2 , nous supprimons l'écoulement dans une des moitiés du tuyau ; rien n'est cependant modifié dans l'onde stationnaire.

Deuxième expérience : Relions R_2 à une puissante soufflerie (pompe Roots). La vitesse du vent dans le tuyau (mesurée au Pitot) peut atteindre 50 mètres à la seconde (la pression dans R_2 est alors de 800 mm.). Envoyons de l'air dans le réservoir R_1 ; l'anche parle avec facilité avec la fréquence N .

Conclusion : l'onde stationnaire n'a rien à voir avec l'écoulement de l'air.

On rapprochera cette expérience de la suivante. On place un tuyau l sur le réservoir R_1 (fig. 34). Soit $n = V : 2l$ le son *chuchoté* du tuyau; on l'obtient en soufflant sur le bout M , comme l'indique la flèche.

Mettons R_2 en communication avec la pompe Roots. Quelle que soit la vitesse du vent dans le tuyau, on obtient, avec la même facilité et la même fréquence, le son chuchoté.

La pompe arrêtée, soit n' le son le meilleur (non chuchoté) obtenu en dirigeant sur le bout M une lame d'air. Mettons en action la pompe. En donnant à la lame d'air une direction et une vitesse convenables, on peut faire parler le tuyau; la fréquence du son le meilleur est encore n' .

31. — Anche + E. Porte-vent et tuyau.

Avec le dispositif de la figure 31 les tuyaux de part et d'autre de l'anche l_1, l_2 jouent le même rôle : avec celui de la figure 35, l'un des tuyaux l_1 sert de porte-vent, l'autre l_2 de tuyau proprement dit.

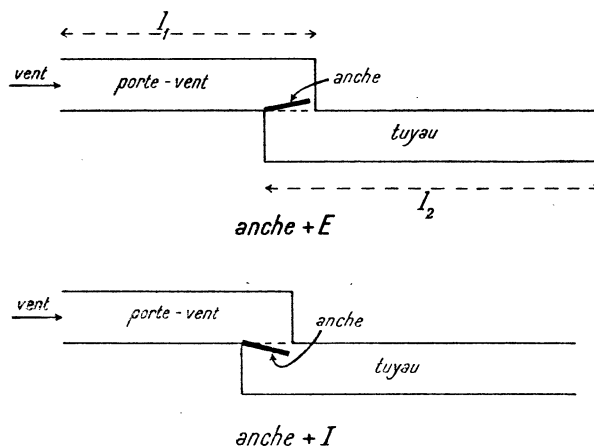


FIG. 35.

1° Porte-vent de longueur l_1 fixe, tuyau de longueur l_2 variable.

a) Sur la figure 36 sont représentées : la courbe A, $l = l_1 + l_2$ avec $l_1 = l_2$ (l'anche est au milieu du système porte-vent, tuyau); la courbe B, $l = l_1$ ou l_2 (tuyau ou porte-vent seuls, anche au tampon).

En abscisses, je porte les longueurs l_2 du tuyau; en ordonnées, les fréquences.

Les courbes B et A, quasi confondues avec le dispositif de la figure 31, ne le sont plus avec celui de la figure 35. B est fort au-dessous de A; d'où les phénomènes curieux qu'on va lire.

b) Je donne les courbes $l_1 = 21,6; 33,6; 45,6$ cm.

Principe : soit n_1 le son du système anche, porte-vent (tuyau de longueur nulle);

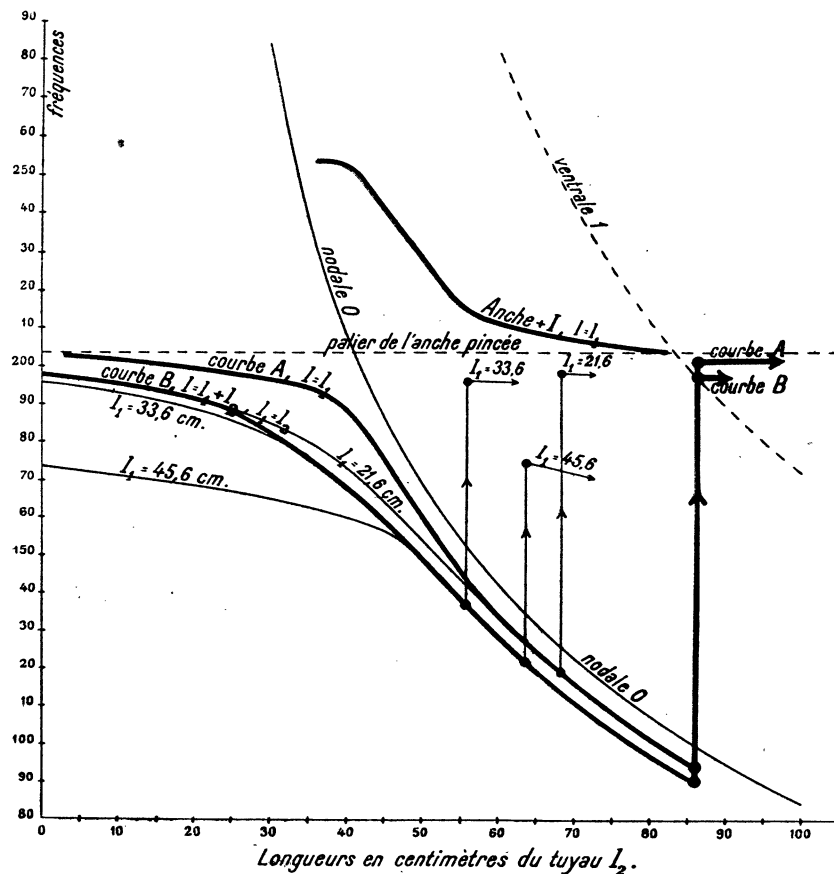


FIG. 36.

appelons-le son l_1 . Le système $l_1 + l_2$ parlera avec la fréquence n_1 quand sa longueur sera demi-onde pour ce son : $l_1 + l_2 = \lambda : 2n_1$.

Cette relation donne les longueurs l_2 du tuyau pour lesquelles se feront les sauts d'un son grave sur la fréquence n_1 .

Si le porte-vent est très court, le son n_1 est très voisin de la fréquence n_a de l'anche pincée. Tout se passe comme si la longueur l_2 du tuyau, demi-onde pour n_a , était plus courte que la longueur théorique $\lambda_a : 2$. On revient au palier avant $\lambda_a : 2$.

C'est ce qui peut arriver lorsqu'on se sert des poumons comme soufflerie et

qu'on met l'anche dans la bouche. La cavité buccale, la trachée constituent un porte-vent de longueur non négligeable.

On voit que le phénomène ordinaire de Weber sera d'autant moins modifié que l'anche pincée sera plus grave et qu'on enfoncera davantage l'anche dans la bouche. J'ai vérifié que pour les anches utilisées dans ce mémoire (fréquence pincée moyenne $n_a = 200$; longueur moyenne 4 cm.), l'influence de la bouche était nulle.

Pour l_1 petit, les courbes des fréquences, d'abord confondues avec la courbe B, rejoignent la courbe A et se confondent avec elle.

Pour des longueurs l_1 voisines de $\lambda_a : 4$, les courbes d'abord au-dessous de B, rejoignent la courbe B et se confondent avec elle.

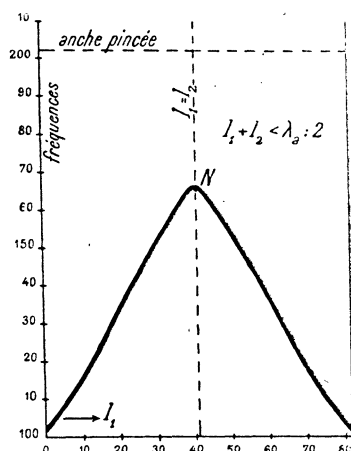


FIG. 37.

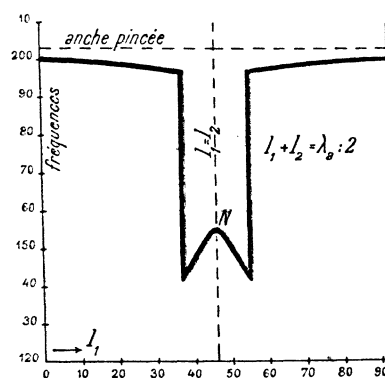


FIG. 38.

c) Supposons les courbes A et B confondues; plaçons-nous d'autre part dans les conditions du schème de Weber.

Soit $l_1 = \lambda_a : 4$; le porte-vent émet le son n_a .

Pour $l_2 = \lambda_a : 4$ nous avons encore le son n_a , conformément à la relation $l_1 + l_2 = V : 2n_a$. Le saut est donc nul; quelle que soit la longueur de l_2 , le son du système $l_1 + l_2$ est invariable et égal à n_a .

Mais les phénomènes n'ont pas cette simplicité. Le schème de Weber ne se réalise pas. Corrélativement les courbes A et B sont distinctes.

On voit sur la figure 36 ce que donnent les porte-vents $l_1 = 33,6$ et $45,6$ cm., longueurs plus petite et plus grande que $\lambda_a : 4$. (Le quart de longueur d'onde théorique est $\lambda_a : 4 = 42$ cm.).

2° $l_1 + l_2 = \text{constante}$; l_1, l_2 variables (fig. 37, 38 et 39).

La longueur du système porte-vent, tuyau est constante. On allonge le porte-vent l_1 ; on raccourcit d'autant le tuyau l_2 .

Les phénomènes sont symétriques par rapport au milieu du système. En abscisses, je porte les longueurs du porte-vent l_1 ; en ordonnées, les fréquences.

Pour $l_1 + l_2 \leq \lambda_a : 4$, la courbe des fréquences se réduit, à peu de chose près, au palier n_a de l'anche pincée: plus exactement, nous avons de part et d'autre de la droite $l_1 = l_2$, deux paliers de même hauteur n_a , qui se raccordent sur cette droite.

Pour $\lambda_a : 4 \leq l_1 + l_2 \leq \lambda_a : 2$, les deux paliers s'infléchissent vers le bas de part et d'autre du point de rencontre $l_1 = l_2$, formant ainsi une sorte d'ogive N dont la

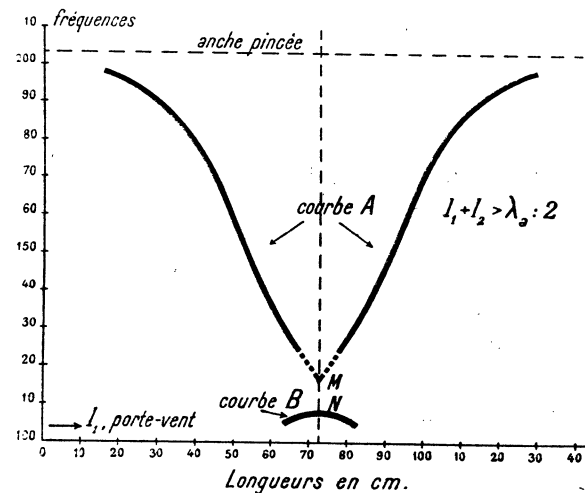


FIG. 39.

pointe est dirigée vers le haut. A mesure qu'on se rapproche de $\lambda_a : 2$, l'ogive descend; en même temps ses bras s'inclinent davantage.

Pour $l_1 + l_2 > \lambda_a : 2$, de l'ogive N, on ne conserve que la partie voisine de la pointe. Les parties disparues sont remplacées par les bras d'une nouvelle ogive dont la pointe M est dirigée vers le bas. Les bras naissent du palier n_a . La pointe M et les parties voisines manquent.

Les branches de l'ogive N sont des arcs de la courbe A relative au porte-vent ou au tuyau seuls, *sauf au voisinage de la pointe*. La pointe appartient à la courbe B ($l_1 = l_2$).

De même les branches de l'ogive M sont des arcs de la courbe A.

D'où les résultats suivants.

Pour l'ogive N (pointe dirigée vers le haut) tout se passe comme si des deux tuyaux l_1, l_2 , seul existait le plus long. La branche de gauche est relative au tuyau l_1 ; l'action du porte-vent est nulle. L'expérience montre en effet qu'on peut le supprimer. La branche de droite est relative au porte-vent; on peut supprimer le tuyau.

Ces conclusions ne valent pas pour la pointe N et les parties voisines. Tuyau et

porte-vent réagissent alors avec la même intensité. C'est la raison pour laquelle la courbe B est au-dessous de la courbe A.

Pour l'ogive M (pointe dirigée vers le bas) des deux tuyaux, l_1, l_2 , seul réagit *le plus court*. La branche de gauche est relative au porte-vent seul; celle de droite, au tuyau seul.

Pour $l > \lambda_a : 2$, les deux régimes M et N sont à la fois possibles. Ils peuvent coexister. D'où un accord.

L'intensité de l'onde stationnaire est faible dans celui des tuyaux l_1 ou l_2 qui ne réagit pas : les ondes dans le tuyau et le porte-vent sont en phase.

Lorsque le tuyau et le porte-vent réagissent ensemble, leurs ondes sont décalées de π .

32. — Anche + I. Porte-vent et tuyau.

1° Anche métallique, $l_1 + l_2 = c^e$; l_1, l_2 , variables (fig. 35).

Anche pincée $n_a = 203$.

Pour $l_1 + l_2 \leq \lambda_a : 4$, on a tacet quelle que soit la position de l'anche.

Pour $\lambda_a : 4 < l_1 + l_2 < \lambda_a : 2$, on a l'ogive N; pour $l_1 + l_2 > \lambda_a : 2$, l'ogive M.

Les deux régimes M et N ne peuvent coexister.

J'ai tracé sur la figure 36 la courbe A; la courbe B serait légèrement au-dessus.

On comparera les courbes (fig. 40, 41, 42) aux courbes de l'anche membraneuse + I, dont l'étude va suivre.

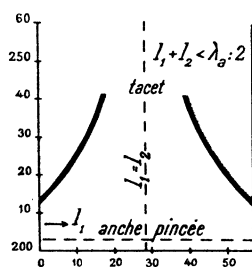


FIG. 40.

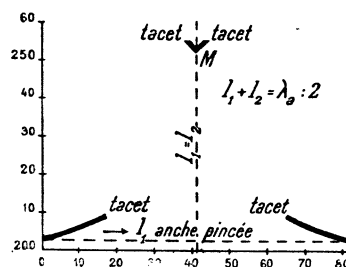


FIG. 41.

2° Anche membraneuse. — Toutes les expériences de ce Mémoire peuvent être répétées avec une anche membraneuse. Donnons un exemple : répétons l'expérience du 1° avec une anche + I en caoutchouc.

Entre deux plaques de laiton A, A' est encastrée sur trois côtés une feuille de caoutchouc (chambre de bicyclette) légèrement tendu RSTX (fig. 43). Le bord ST est libre. La membrane est coplanaire avec la platine; l'anche est donc + I; ce que l'expérience confirme.

Le porte-vent l_1 et le tuyau l_2 sont placés comme l'indique la figure 43. L'anche se trouve donc dans une section droite du tuyau de longueur $l_1 + l_2$.

Fréquence de l'anche pincée $n_a = 248,5$; $\lambda_a : 4 = 34,2$ cm.; $\lambda_a : 2 = 68,4$ cm.; RS = 9 mm.; ST = 20 mm. Distance du bord libre ST à la platine : 1 mm.

Diamètre du tuyau 24 mm. Pression 150 mm.

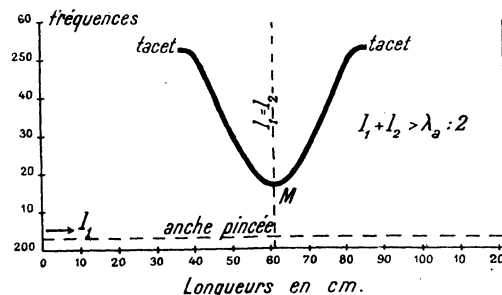


FIG. 42.

a) Courbe A du porte-vent ou du tuyau seuls. — Courbe B, $l_1 = l_2$ (fig. 44).

Traçons d'abord la courbe A du tuyau ou du porte-vent seuls. L'anche commence à parler pour $l_1 = 15,0$ cm. avec la fréquence $n = 496$. Le son est à peine audible. l_1 passant de 15 à 17 cm., l'intensité du son croît rapidement; elle est

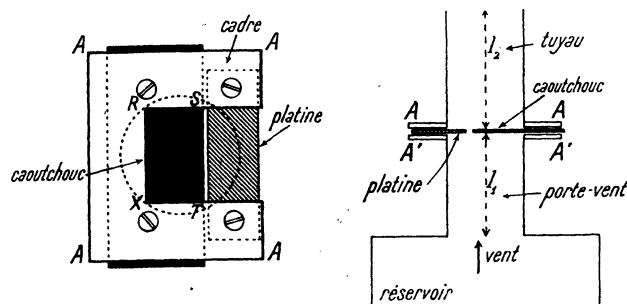


FIG. 43.

maxima entre 17 et 19 cm. Cette intensité décroît ensuite et devient nulle peu après $l_1 = 46$ cm. La fréquence est alors $n = 296$. Cette fréquence est bien plus aiguë que celle de l'anche pincée; mais il faut tenir compte de l'action du vent sur la membrane. Le bombement de l'anche entraîne une élévation de la fréquence de l'anche pincée; c'est à cette fréquence de l'anche déformée qu'il faut rapporter les phénomènes.

La longueur 18 cm., maximum pour l'intensité, joue un rôle capital dans les expériences qui suivent. Retenons d'autre part que, pour la pression utilisée, l'anche ne parle que pour les longueurs comprises entre 15 et 46 cm.

La courbe B (anche au milieu du système porte-vent, tuyau) est au-dessus de A.

b) Porte-vent l_1 de longueur fixe; tuyau l_2 de longueur variable.

Soit n_1 la fréquence du système anche, porte-vent de longueur l_1 .

Le système anche, porte-vent l_1 , tuyau l_2 émet ce même son n_1 , quand $l_2 = V : 2n_1$.

Voici les phénomènes pour $0 \leq l_2 \leq V : 2n_1$.

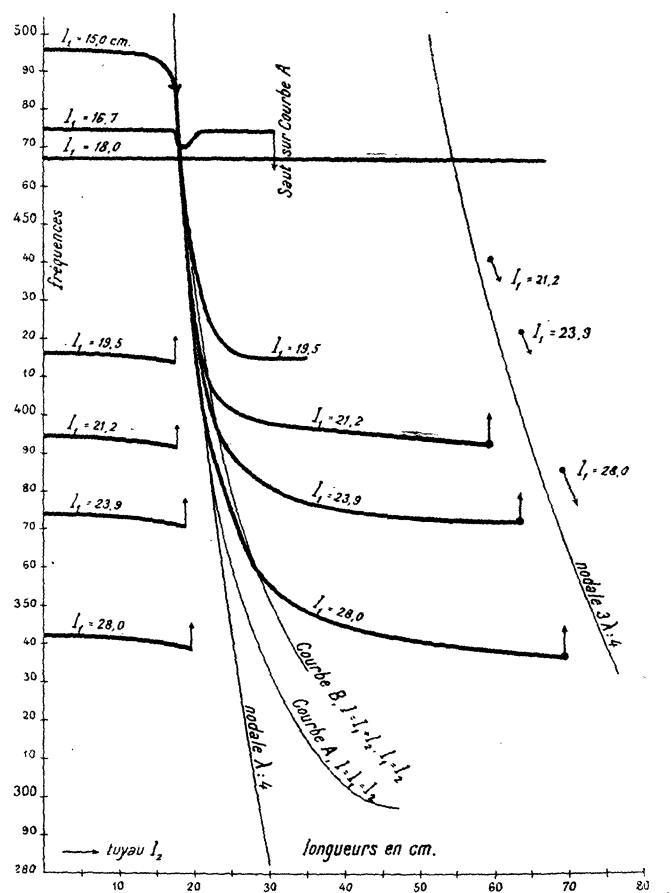


FIG. 44.

Les courbes $l_1 > 18$ cm. se composent d'un palier légèrement descendant, d'un saut sur un point de la courbe A, d'un arc de cette courbe (arc d'autant plus long que l_1 est plus grand), d'un second palier légèrement descendant. Le commencement du premier palier, la fin du second sont sur une même horizontale : ils correspondent à la fréquence n_1 du porte-vent de longueur l_1 . La distance de ces deux points est égale à la demi-onde du son n_1 .

Quelle que soit la longueur du porte-vent l_1 , les sauts sur la courbe A se produisent lorsque le tuyau l_2 est long de 18 cm.

Voici en effet les longueurs l_2 pour lesquelles se produisent les sauts — sans qu'on les provoque — et les fréquences correspondantes.

Porte-vent.		Tuyau.	Fréquences du système porte-vent + tuyau.
l_1	n_1	l_2	
28,0 cm.	342,6	19,6 cm.	377,4 ou 437,8
23,9	374,2	18,9	371,0 — 452,4
21,2	395,0	18,0	392,4 — 467,0
19,5	416	18,0	414,8 — 467,0

Remarquons toutefois que pour les porte-vent 28,0 ; 23,9 cm., on peut provoquer le saut sur la fréquence $n = 467$, lorsque le tuyau a 18 cm. : il suffit d'approcher la paume de la main sur le bout ouvert du tuyau.

Pour $l_1 = 18$ cm., quelle que soit la longueur du tuyau, le son émis est $n = 467$. Résultat nécessaire par ce que nous savons des phénomènes $l_1 > 18$ cm. Tout se passe comme si le porte-vent était seul.

Supposons $l_1 < 18$ cm. Je transcris deux expériences :

	l_2	n
$l_1 = 16,7$ cm.	0 cm.	474,8 son faible.
	17,2	474,8
	18	467,0 son intense.
	18,5	470,0
	de 21 à 30,3	474,8 son faible.
	30,3	474,8 — 329, saut sur la courbe A.
	Pour $l > 30,3$	courbe A.

En utilisant un tuyau à coulisse on peut remonter la courbe A jusqu'à $l_2 = 22,5$. La fréquence est alors $n = 409,6$.

	l_2	n
$l_1 = 15,0$ cm.	de 0 à 13,5 cm.	496 son faible.
	15,0	494 son plus fort.
	16,4	490
	17,5	482 son intense.
	19,3	464
	21,7	411
	23,0	387
	26,0	358
	37,6	300 — 498. Saut sur le palier $l_1 = 15$ cm.

Ainsi, pour $l_1 = 15$ cm. tout se passe comme si le tuyau était seul : nous décrivons la courbe A. Nous la quittons lorsque l_2 est demi-onde du son $n_1 = V : 2l_1$ correspondant au porte-vent l_1 . (Cf. pour $n = 496$, $\lambda : 2$ théorique = 34,3 cm.).

Passons aux phénomènes $l_2 > V : 2n_1$.

Soit $l_1 > 18$ cm. Nous avons un palier n_1 légèrement descendant, puis un saut

sur la courbe A relative à la nodale 1. Étudions les conditions de ce nouveau saut.

Porte-vent.	Tuyau.	Fréquences du système.
$l_1 = 28,0$ cm.	$l_2 = 68,9$ cm.	337 et 386.
$n_1 = 342,6$		
$\lambda_1 : 2 = 49,6$ cm.		
$l_1 = 23,9$ cm.	$l_2 = 63,0$ cm.	372 et 420.
$n_1 = 374,2$		
$\lambda_1 : 2 = 45,4$ cm.		
$l_1 = 21,2$ cm.	$l_2 = 59,7$ cm.	393 et 440.
$n_1 = 395,0$		
$\lambda_1 : 2 = 43,0$ cm.		

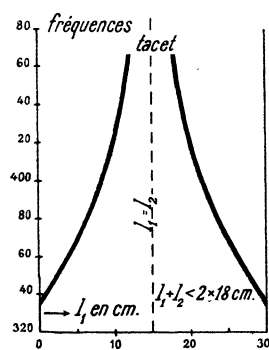


FIG. 45.

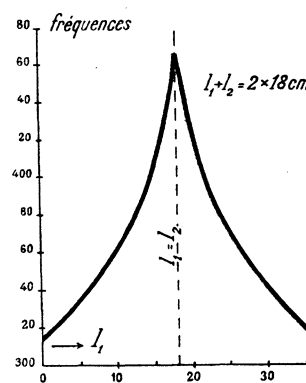


FIG. 46.

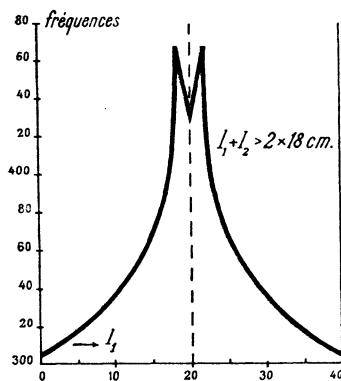


FIG. 47.

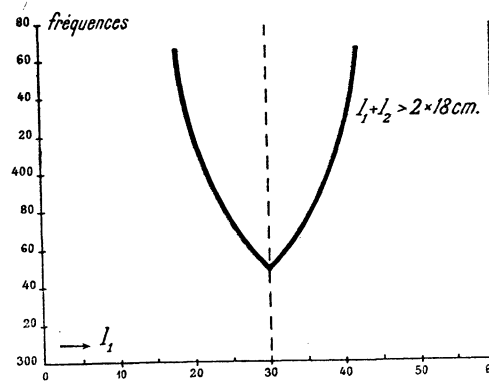


FIG. 48.

Les longueurs l_2 de ce tableau vérifient la relation :

$$l_2 = 18 + \lambda_1 : 2 \text{ cm.}$$

c) $l_1 + l_2 = c^{te}$; l_1, l_2 variables.

Tout se passe comme si la demi-longueur d'onde de l'anche pincée était $\lambda_a : 2 = 2 \times 18$ cm. (fig. 45 à 48).

33. — Anche + E, tuyau bouché aux deux bouts.

1^{re} Dans sa Dissertation latine Weber indique une troisième « classe » de phénomènes. Les deux autres classes se rapportent aux anches + E et + I. Je donne la figure de Weber (*fig. 49*) et transcris son commentaire : « Admodum memorabilis est hæc methodus propter hunc effectum, nempe, ut tubus utroque fine clausus sonos edat. »

Malheureusement Weber se garde de nous dire comment il s'y prend pour faire parler le tuyau ; bien pis, il ne rapporte aucune expérience.

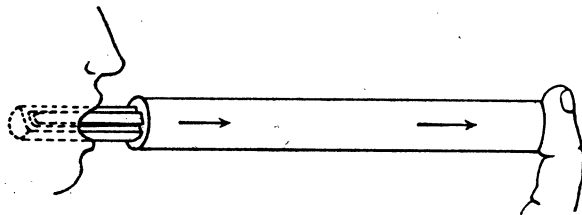


FIG. 49

2^o Posons que Weber ait signalé un cas théorique, intéressant en soi. Il est facile, après ce que nous savons des anches + E, + I, d'en donner les lois.

Supposons l'anche libre et + E.

Nous savons que lorsque le tuyau est un bourdon, les courbes du plan fréquences-longueurs auxquelles il faut rapporter les phénomènes sont : le palier de l'anche pincée, $n = n_a$; les nodales $n = (2k + 1) V : 4l$; les ventrales $n = kV : 2l$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Rappelons que les nodales se rapportent au tuyau bouché (bourdon) ; les ventrales au tuyau ouvert.

Déplaçons-nous sur le palier n_a . Entre la ventrale et la nodale k , la fréquence du système est n_a ; entre la nodale k et la nodale $k + 1$, la courbe des fréquences est un arc de la nodale k .

Obturons partiellement le *bout ouvert du bourdon*. Les partiels du bourdon sont abaissés ; ils le sont d'autant plus que l'obturation est plus grande. De même les sons du tuyau, tampon enlevé, seront abaissés.

Conséquences : les nodales et les ventrales sont déplacées vers la gauche. Pour l'obturation parfaite, la ventrale $k = 1$ prend la place de la nodale $k = 0$. En effet la ventrale 1 se rapporte — comme tout à l'heure la nodale 0 — au fondamental d'un tuyau bouché à l'un des bouts.

De même la nodale $k = 1$ prend la place de la ventrale $k = 1$: cette nodale

se rapporte maintenant à un tuyau fermé aux deux bouts; à la correction aux bouts près, le fondamental de ce tuyau doublement bouché est à l'unisson du fondamental du tuyau de même longueur ouvert aux deux bouts.

Par raison de continuité, la première nodale, $k = 0$, se confond avec l'axe des fréquences.

Voici dès lors ce que devient le schéma de Weber.

L'anche + E ne peut parler qu'avec une fréquence inférieure à la fréquence

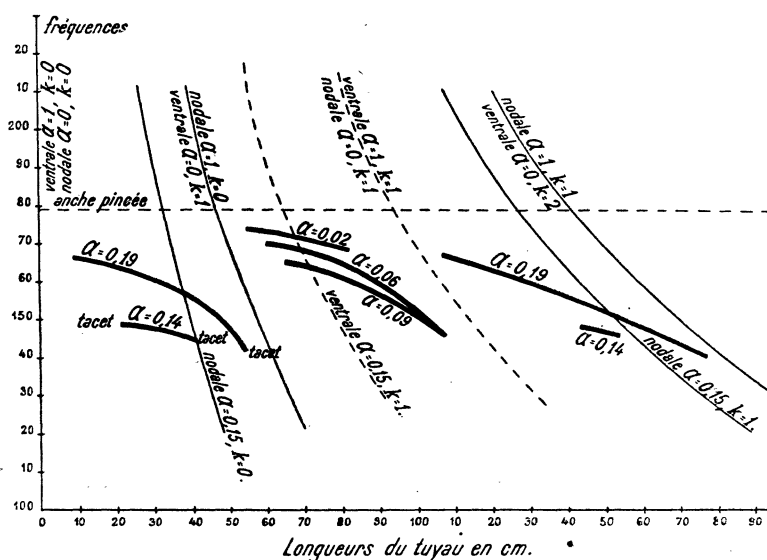


FIG. 50.

pincée. Donc entre la nodale $k = 0$ (axe des fréquences) et la ventrale $k = 1$, l'anche se taira.

Entre la nodale $k = 1$ et la ventrale $k = 1$, on aura le palier de l'anche pincée.

Entre la nodale $k = 1$ et la ventrale $k = 2$, on aura l'arc de nodale $k = 1$; etc.

3^e *Expériences.* Ce que nous avons écrit suggère les expériences à faire. On ne peut réclamer l'obturation complète; il faut bien que le vent sorte; mais on peut se rapprocher de ce cas bien plus qu'on ne saurait croire.

Les courbes de la figure 50 se rapportent aux données suivantes :

Anche libre + E sans rigole; $n_a = 179,1$; $\lambda_a : 4 = 47,4$ cm.; $\lambda_a : 2 = 94,8$ cm. Tuyau de 16 cm. Pression 130 mm.

L'obturation se fait avec des plaques de 2 mm. d'épaisseur percées de trous de différents diamètres. Soit d le diamètre, α le rapport de l'aire du trou à la section droite du tuyau.

$d = 7$ mm., $\alpha = 0,19$; $d = 6$ mm., $\alpha = 0,14$; $d = 5$ mm., $\alpha = 0,09$;
 $d = 4$ mm., $\alpha = 0,06$; $d = 2,5$ mm., $\alpha = 0,02$.

Pour $\alpha > 0,10$, les phénomènes sont ceux du bourdon $\alpha = 1$; mais au voisinage de cette valeur, les courbes se réduisent à des arcs de plus en plus courts. L'intensité du son devient quasi nulle. La partie palier de la courbe s'abaisse très au-dessous du palier n_a . L'anche ne commence à parler que loin, à droite des ventrales $\alpha = 1$.

On passe brusquement aux courbes du tuyau fermé aux deux bouts, quand $\alpha < 0,10$. Les sons reprennent une intensité convenable. Plus α est petit, et plus les courbes commencent près des ventrales $\alpha = 0$; en même temps les paliers se rapprochent du palier n_a .

Le système ne parle plus quand le trou n'a que 2 mm.

4° La transition entre les phénomènes $\alpha = 1$ et $\alpha = 0$ paraît assez brusque.

Je cherche à l'expliquer en traçant les nodales $k = 0$, $k = 1$, et la ventrale $k = 1$ pour $\alpha = 0,15$. Voici les éléments de calcul de ces diverses courbes.

Mes expériences sur les tuyaux plus ou moins bouchés donnent pour le fondamental les abaissements suivants (il s'agit des sons ordinaires de « flûte ») :

Tuyau ouvert partiellement obturé à un bout.

$\alpha = 0,20$; abaissement du fondamental.....	127 savarts.
0,15 — —	160 —
0,10 — —	212 —

Bourdon partiellement obturé au bout opposé au tampon.

$\alpha = 0,20$; abaissement du fondamental.....	118 savarts.
0,15 — —	157 —
0,10 — —	200 —

On voit (*fig. 50*) que les branches de la courbe des fréquences $\alpha = 0,14$ sont limitées à droite par la nodale correspondante; ce qui est correct. L'étonnant est que le palier de ces courbes n'existe pas.

Les courbes $\alpha < 0,10$ commencent normalement aux ventrales correspondantes.

5° *Autre expérience.* — On réalise plus aisément le 3° mode de Weber avec le dispositif de la figure 51. AB est un tube de petit diamètre assez long. Ce tube ouvert, le tuyau XZ n'en reste pas moins un double bourdon. Voici comment on le vérifie.

Ouvrons n'importe où sur le tuyau un petit trou (6 mm.). Donnons avec le gras

du doigt un coup sec sur ce trou; ne relevons pas le doigt après avoir frappé. Écoutons en B. Faisons l'expérience avec ou sans le tampon Z. On constate que le son du double bourdon est quasi à l'octave aiguë du simple bourdon.

Mêmes phénomènes sans tube AB avec un trou A beaucoup plus petit.

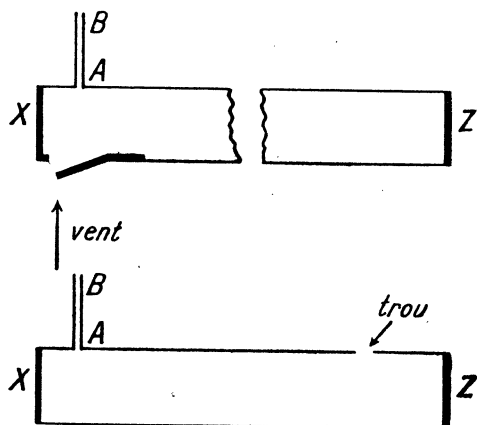


FIG. 51.

L'adjonction d'un tube permet d'utiliser un trou A d'assez grand diamètre : l'air sort librement; l'anche parle avec facilité; l'intensité du son est normale.

Voici une expérience.

Anche libre $n_a = 179,1$; $\lambda_a : 4 = 47,4$ cm.; $\lambda_a : 2 = 94,8$ cm.

Tube AB : longueur 9 cm., diamètre 6 mm. Tuyau XZ de 16 mm. Pression, 130 mm.

Longueurs.	Fréquences.	Longueurs.	Fréquences.
de 0 à 49,6 cm.	tacet.	109,2	167,8
49,6	175,3	116,0	152,9
57,0	174,4	121,0	145,0
72,5	172,0	135,5	138,7
88,4	169,6	146,6	131,1
97,9	168,7	148,5	127,8

Cf. $3\lambda_a : 4 = 142,2$.

Retour au palier 174,9, saut 134 savarts.

Le saut normal serait de 125 savarts (3 : 4); mais le saut s'est produit au delà de $3\lambda_a : 4$; corrélativement il est plus grand.

RÉSUMÉ

1° L'anche — quelle que soit sa nature, verge ou membrane, libre ou battante — excitée par le vent, est +E ou +I, § 1.

L'anche +E, sans rigole, ne parle pas; associée à une rigole, elle parle.

L'anche +I, sans rigole, parle; associée à une rigole, elle se tait.

2° Associons l'anche à un tuyau.

Soit n_a la fréquence de l'anche pincée, n_{ap} la fréquence de l'anche pour un tuyau de longueur nulle et la pression p .

Pour l'anche libre, quel que soit p , $n_{ap} = n_a$: la fréquence demeure celle de l'anche pincée.

Le tuyau *réagit* quand il impose à l'anche la fréquence d'un de ses partiels. La fréquence du système anche-tuyau est n_{ap} quand la réaction du tuyau est nulle.

La réaction du tuyau dépend du rapport de l'aire de l'anche à la section droite du tuyau, de la pression, de la position de l'anche le long du tuyau. Quand l'anche est montée sur une rigole de plus petite section que le tuyau, la réaction est fortement diminuée; d'autre part le partiel qui réagit est, non un partiel de l'ensemble tuyau + rigole, mais celui du tuyau seul.

3° Soit l'anche +E.

Quand la réaction est intense (forte pression, rapport aire de l'anche : section droite = 1, anche au tampon), quelle que soit la longueur du tuyau, le système émet un de ses partiels, sauf pour $l < \lambda_{ap} : 4$ (réaction nulle).

Pour une réaction moins intense, on a alternativement le son n_{ap} et un partiel du tuyau.

Un cas intéressant (cas moyen) est celui connu sous le nom de schème de Weber. Au § 4, 2°, je donne les lois relatives à un bourdon cylindrique et à une anche libre. L'anche est au tampon. Pour l'anche battante, on écrira n_{ap} à la place de n_a .

On généralise pour un bourdon de forme quelconque (conique, tronconique, tuyau plus ou moins obturé au bout ouvert).

Soit $N_1, N_2 \dots N_k$ les partiels 1, 2 ... k du tuyau bouché à l'anche; $N'_1, N'_2 \dots N'_k$ les partiels 1, 2 ... k du tuyau ouvert à l'anche.

Pour $N_k \leq n_{ap} \leq N'_k$ on a N_k .

Pour $N'_k \leq n_{ap} \leq N_{k+1}$ on a n_{ap} , $k = 1, 2 \dots$

Pour $0 \leq n_{ap} < N_1$, on a n_{ap} .

Suivant l'intensité de la réaction on saute, de N_k sur n_{ap} , avant N'_k (réaction plus faible) ou après (réaction plus forte).

Supposons le tuyau ouvert aux deux bouts et l'anche au milieu du tuyau : on écrira des relations analogues aux précédentes. Déplacer l'anche par rapport au milieu du tuyau, revient à diminuer la réaction.

On remarquera que la fréquence du système anche + E, tuyau est égale à n_{ap} ou plus *grave*. On se gardera de généraliser cette conclusion, valable seulement pour les anches-verges. Pour les anches-membranes voir Bouasse : *Instruments à vent*.

4° Laissons invariable la longueur du tuyau ; faisons varier la fréquence de l'anche. Le § 17 donne les lois moyennes.

5° Anche + I. Voir § 26. La fréquence du système anche + I, tuyau est égale à n_a ou plus *aiguë*. La limite supérieure est n_{ap} .

TABLE DU MÉMOIRE

INTRODUCTION

	Pages.
§ 1. Définitions. Anche + E, anche + I	237
§ 2. Plan	239
§ 3. Souffleries, tuyaux, mesure des fréquences	240

PREMIÈRE PARTIE

Anche + E.

CHAPITRE PREMIER

Anche de fréquence invariable, bourdon cylindrique de longueur variable.

§ 4. Expériences et schème de Weber	242
§ 5. Degrés de réaction du bourdon. Forme des courbes des fréquences. Accords ..	245
§ 6. Anche à distance du tampon du bourdon. Réaction moyenne	248
§ 7. Anche entretenue par un électro. Réaction faible	251
§ 8. Anche parfaitement libre	253
§ 9. Anche libre avec rigole	262
§ 10. Anche battante	266
§ 11. Théorie de la clarinette	269
§ 12. Anche battante avec rigole	271
§ 13. Anche semi-battante	273

CHAPITRE SECOND

Débts. Amplitudes de l'anche.

§ 14. Mesure des débits des amplitudes	276
§ 15. Courbe des débits	277
§ 16. Courbe des amplitudes. Levée de la position moyenne	280

CHAPITRE TROISIÈME

Bourdon cylindrique de longueur invariable. anche de fréquence variable.

§ 17. Schème de Weber	285
§ 18. Anche libre	286
§ 19. Anche battante. Paliers principaux et secondaires	287
§ 20. Anche battante. Expériences	290
§ 21. Doublements sur le cromorne	295

CHAPITRE QUATRIÈME

Tuyaux coniques.

§ 22. Expériences	297
§ 23. Anche variable, tuyau de longueur invariable. Doublements	298
§ 24. Sons propres, sons forcés, sons privilégiés des instruments à embouchure de cor	299
§ 25. Théorie du Serpent	302

SECONDE PARTIE

Anche + I.

§ 26. Schème de Weber	304
§ 27. Anche libre, anche coplanaire avec le cadre, bourdon de longueur variable. Cheng	306
§ 28. Anche battante	310

TROISIÈME PARTIE

Expériences diverses.

§ 29. Bourdon à deux anches libres + E	314
§ 30. Anche + E, tuyau ouvert aux deux bouts	317
§ 31. Anche + E, porte-vent et tuyau	320
§ 32. Anche + I, porte-vent et tuyau	324
§ 33. Anche + E, tuyau bouché aux deux bouts	329