

FRÉQUENCEMÈTRE RADIOÉLECTRIQUE

Par Z. CARRIÈRE.

Professeur à l'Institut Catholique de Toulouse.

Sommaire. — Appareil composé d'un haut-parleur, d'une flamme sensible striée par le haut-parleur et d'un stroboscope réglé sur les stries de la flamme. On peut obtenir, pour la fréquence 10 000, des stries espacées d'un millimètre.

L'appareil que je propose est un véritable fréquencesmètre donnant d'emblée, seul et par une mesure unique, la fréquence d'un courant radioélectrique supposée déjà abaissée au-dessous de 10 000.

Cet abaïssement préalable est exigé par tous les mesureurs de fréquence actuels; sur ces mesureurs qui comportent au moins un étalon à fréquence fixe et des intermédiaires complexes, le nouveau a l'avantage de supprimer tous les intermédiaires; de plus, il est apte à recevoir immédiatement et sans additions ni transformations le contrôle chronométrique qu'il faut toujours prévoir pour un étalon de fréquence.

Ce fréquencesmètre se compose d'un haut-parleur, d'une flamme de gaz d'éclairage sensible au son émis par le haut-parleur et d'un stroboscope réglé sur les franges qu'engendre le haut-parleur à la surface de la flamme.

Dans ces franges réside la nouveauté du système que je propose. Dans un article très récent de la *Revue d'Acoustique* j'étudie en détail leurs caractéristiques et les conditions de leur obtention. Renvoyant à ce travail le lecteur désireux de mieux les connaître, je me contente de rappeler ici les flammes sensibles vulgarisées par Tyndall et utilisées par quelques chercheurs comme détectrices d'ondes sonores très courtes.

On sait que longues et quasi cylindriques en air tranquille, elles répondent à un sifflet ou au bruit d'un trousseau de clefs, en s'affaissant et s'étalant en nappes plus ou moins dentelées.

Ces variations du contour visible à l'œil nu ont trop longtemps retenu l'attention des physiciens. Il y a mieux à observer. Une onde sonore périodique doit avoir des effets périodiquement variables. Les variations de forme visibles à l'œil nu ne sont que la résultante moyenne des variations instantanées de l'ensemble de la flamme. Pour les observer, il suffit d'employer l'analyseur par excellence des phénomènes périodiques: le stroboscope.

Avec cet appareil, dans une flamme qui, au repos, serait quasi cylindrique et aurait 22 cm de longueur,

qui, sous l'action des ondes de fréquence $N = 6137$, se rapetisse et prend le contour représenté figure 1, à gauche, entre les cotes 2 et 5 cm, on aperçoit en outre, sur les bords et la verticale médiane, des files de taches régulièrement espacées, indices d'une structure périodique liée à la période du son excitateur.

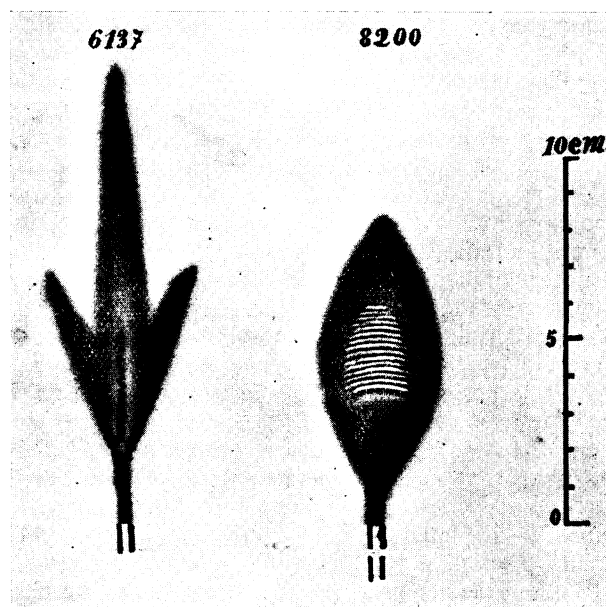


Fig. 1.

La figure de droite est obtenue par choc de deux flammes issues des ajutages schématiquement représentés au-dessous de la cote zéro. Un son de fréquence $N = 8200$ y développe les franges équidistantes concaves vers le bas qui barrent la plus grande partie de sa surface.

Soit n le nombre de fentes qui, par seconde, passent devant l'œil de l'observateur.

Les taches et les franges représentées sont fixes tant que le stroboscope est réglé à l'isochronisme $n = N$.

Pour tout dérèglement $N - n$, les taches et les franges

se translatent verticalement avec une vitesse apparente

$$\begin{aligned} u &= (N - n)\lambda \\ v &= N\lambda \end{aligned}$$

v est la vitesse (verticale) d'écoulement des gaz en train de brûler. Pour $u > 0$ les franges paraissent monter, $N > n$; elles paraissent descendre, $u < 0$, lorsque $N < n$.

λ n'est pas une longueur d'onde, mais en joue le rôle puisque, dans le mouvement réel du gaz de vitesse ascensionnelle v , une frange se substitue à celle qui la précède en une période $1 : N$.

v étant de l'ordre de 10 mètres à la seconde, λ est de l'ordre du millimètre pour $N = 10\,000$. C'est une longueur assez grande pour permettre l'observation des franges sans microscope.

On ne pourra plus dire désormais ⁽¹⁾ qu'il est « malaisé de se procurer un instrument dont les vibrations de fréquence élevée aient une amplitude assez grande pour être aisément observables ». Notons, d'autre part, pour répondre aux desiderata exprimés, que les franges s'obtiennent indépendamment des conditions de résonance. Sous réserve d'un choix judicieux de la pression d'alimentation, la flamme sensible à 8 200 est sensible à toutes les fréquences inférieures. Nous avons bien, jusqu'ici, un fréquencemètre.

Pour expliquer le dessin de la figure 1 (à droite) et donner une idée sommaire du merveilleux phénomène à utiliser, disons que la perturbation périodique engendrée par le son dans la flamme est une ondulation de sa nappe unique initialement à peu près plane. On obtiendrait une ondulation de ce genre en balançant périodiquement l'ajutage d'une lance d'arrosage. Comparaison dénuée de valeur explicative. Très obscure est l'origine et surtout l'amplification progressive de cette perturbation dont le radioélectricien n'a qu'à utiliser la périodicité spatiale définie par les franges.

Ces franges sont les lieux des sommets des ondulations dirigées vers l'une des normales à la flamme. Ces lieux sont vus généralement concaves vers le bas parce que la vitesse ascensionnelle du gaz a un maximum dans le plan de symétrie vertical.

Du caractère ondulatoire de la perturbation résulte que la source sonore doit être sur la normale à la flamme; pour l'action la plus énergique, elle doit évidemment en être le plus rapprochée possible.

Plus grande est la fréquence à mesurer, plus élevée doit être la pression d'alimentation de la flamme qu'il est toujours avantageux de carburer au moyen de benzine par exemple; il semble donc possible de se passer du gaz d'éclairage lui-même et d'utiliser une vapeur ou un gaz combustibles quelconques.

*
**

L'excitation de la flamme se fait au moyen d'un haut-parleur qui doit répondre aux fréquences de 1 000 à 10 000, avec une amplitude sinon uniforme,

⁽¹⁾ P. NICOLAS, *Revue d'Acoustique*, 1933, p. 102.

ou du moins suffisante pour faire apparaître des franges. Cette dernière condition est toujours réalisée puisqu'on peut toujours approcher la source à quelques centimètres de la flamme. Le haut-parleur Rice-Kellog semble avoir une étendue de sensibilité satisfaisante.

*
**

La flamme à franges sert à régler le stroboscope. Celui-ci est un disque à fentes radiales équidistantes, monté sur l'axe d'un moteur électrique qui peut l'entraîner de 0 à 50 tours par seconde. Un moteur « universel » d'un sixième à un quart de cheval convient parfaitement pour des disques de 20 cm de diamètre sur lesquels on peut loger 50 à 200 fentes. Le disque à 200 fentes, au régime de 50 tours par seconde, donne les 10 000 éclairs par seconde qu'exige la fréquence maximum mesurable. Sur ce disque, la largeur des fentes peut atteindre le quart et même le tiers de leur équidistance. La fréquencemètre n'est pas destiné à photométrer les franges; il lui suffit d'en déceler la structure spatiale périodique, c'est-à-dire l'existence de maxima lumineux équidistants. L'effet de réseau que produit l'ensemble des franges, dont le nombre total est de l'ordre de dix, assure cette visibilité, même avec un médiocre contraste entre les maxima et les minima.

Soit n le nombre de fentes qui, par seconde, passent devant l'œil de l'observateur. Si $n = N$ (isochronisme), les franges paraissent immobiles. Pour $n \neq N$, elles se translatent verticalement avec la vitesse *apparente* comptée positivement vers le haut.

$$u = (N - n)\lambda$$

Sur le signe de u , l'opérateur règle son intervention. Pour $u < 0$, les franges descendent, $N < n$, il faut freiner (appliquer un tampon de drap sur le disque). Pour $u > 0$, les franges montent, $N > n$ il faut diminuer la pression sur le frein.

Il est parfaitement chimérique d'espérer maintenir ainsi pendant quelques minutes le régime strictement isochrone $N = n$. L'irréalisable n'est pas nécessaire. Le disque stroboscopique sert seulement à régler la rotation totale de l'axe dont l'autre bout porte à demeure un compte-tours chargé de totaliser, après un temps déterminé, le nombre total des fentes qui ont passé devant l'observateur. Par construction, ce nombre ne peut être erroné; mais il peut être erroné de l'identifier avec le nombre de périodes du phénomène sonore si la différence $N - n$ n'a pas été toujours nulle. Pour justifier cette identification, il suffit, dans ce cas, de compenser les dérèglages pour $N = n$. C'est facile de la manière suivante.

$N - n > 0$ représente le nombre de périodes comptées en moins pendant une seconde et

$$\int_{t_0}^{t_1} (N - n) dt$$

ce nombre total pour l'intervalle $t_1 - t_0$. Admettons que t_1 et t_0 désignent les instants les plus voisins auxquels $N - n = 0$ (les franges sont arrêtées). Prenons Oz vertical vers le haut

$$u = \frac{dz}{dt} = (N - n)\lambda$$

$$\int_{t_0}^{t_1} (N - n) dt = \int_{t_0}^{t_1} \frac{dz}{\lambda} = \frac{z_1 - z_0}{\lambda}.$$

Le premier membre représente le nombre total de périodes comptées en moins pendant que les franges initialement immobiles ont paru monter puis ont été arrêtées au moyen du frein. Le dernier membre donne la mesure de ce nombre total, quotient du déplacement du système $z_1 - z_0$ par l'espacement λ . Pratiquement, les erreurs sur le nombre de périodes s'expriment par les déplacements verticaux apparents mesurés en nombre de franges. L'égalité vaut en grandeur et en signe. La compensation s'en déduit aisément.

A l'immobilité des franges succède, par exemple, une translation du système vers le haut estimé égal à deux franges. En diminuant la pression sur le frein, on cherche à ramener vers le bas le système de la même quantité. Dans cette manœuvre, le but sera généralement dépassé. Si, après descente de deux franges, le mouvement apparent du même signe se continue pendant trois autres franges, on notera comme bilan définitif ces seules trois franges à compenser par la manœuvre suivante.

Plus simplement encore, et pour ménager l'attention de l'observateur, fixons une pointe repère métallique qui se projette vers le milieu du système de franges. Au début d'une mesure, les franges étant immobiles, fixons celle sur laquelle se projette la pointe et accompagnons-la du regard pendant ses déplacements apparents inévitables. Sur elle réglons le freinage de manière à la conserver toujours en vue dans le champ, sans nous astreindre à la ramener chaque fois au repère, ni à compter le nombre de franges dont elle en est écartée. Réserveons notre attention pour prévenir l'instant où doit prendre fin la mesure et, à ce moment précis, ramener exactement la frange visée sur son repère.

La somme des intégrales pour l'intervalle total est nulle. La mesure est sans erreur; il y a identité du nombre de fentes inscrites par le compte-tours et du nombre de vibrations effectuées par le son dans le même temps.

Simplification considérable d'une mesure qui passe pour inabordable, rendue possible par le nombre relativement grand de franges qu'on peut voir simultanément dans une flamme sensible.

*
**

Reste à mesurer le temps écoulé pendant ces réglages.

La dernière roue du compte-tours, que je suppose et appelle roue des centaines, porte un interrupteur

tournant formé d'un cylindre conducteur à coupure isolante I (fig. 2). Par le cylindre et le balai B est fermé le circuit contenant la pile P et la résistance pont R. En dérivation sur R, le casque téléphonique T signale à l'observateur le passage du balai B sur la coupure I et lui permet ainsi de compter les centaines de tours. Le même balai actionne le compte-secondes, à un instant que l'observateur prépare au moyen du commutateur C à 4 plots.

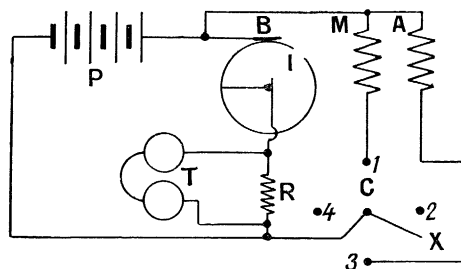


Fig. 2.

Il existe un compte-secondes (Jacquet) dont la commande peut être faite au moyen de deux électros M (marche) et A (arrêt). La remise de l'aiguille au zéro est faite à la main. L'œil derrière le disque stroboscopique et le casque téléphonique en tête, le tampon-frein dans une main et le commutateur (poire à bouton-poussoir) dans l'autre, l'observateur est armé pour une mesure.

Ayant mis l'aiguille au zéro et le rotor X du commutateur sur le plot 4, il agit sur le frein pour rendre les franges à peu près immobiles et attend le prochain signal téléphonique après lequel il pousse le bras X sur le plot 1, s'attachant à garder les franges aussi immobiles que possible. Au signal suivant qu'il notera zéro, le compte-secondes étant mis en marche sans son intervention par l'électro M, il concentre son attention sur la frange projetée en ce moment sur le repère et qu'il s'efforcera de garder constamment en vue par la manœuvre ci-dessus détaillée. Il n'a d'autre souci que de compter les centaines de tours annoncées par le téléphone. De plus, au moment le plus opportun, il poussera le bras X sur le plot 2 à partir duquel doit être commandé l'arrêt.

Soit 10 centaines de tours à chronométrer. Quand il aura noté la neuvième, il poussera X sur le plot 3 et portera dès lors tous ses efforts sur le retour et le maintien de la frange visée en face du repère initial. Au passage suivant de I sous le balai, le compte-secondes est arrêté par A; la mesure est terminée sans erreur si la frange visée était à ce moment sous son repère. S'il n'en est pas ainsi, rien n'empêche d'en déduire la correction dont nous connaissons le taux: une vibration à ajouter pour un écart d'une frange au-dessus du repère.

Le compte-secondes électrique Jacquet a l'immense avantage de libérer l'attention de l'observateur dont le

rôle reste encore passablement chargé. De plus, il élimine l'erreur dite personnelle imputable à l'observateur qui, même attentif et averti, met en marche ou arrête à la main, à l'audition d'un toc téléphonique, un compte-secondes ordinaire.

Les durées étant mesurées à 0,1 seconde près, il faut expérimenter pendant 100 secondes ou 2 minutes environ pour atteindre la précision du millième. Pour arriver aux dix-millième, un chronographe deviendrait nécessaire dont la précision indiscutable quand il s'agit de mesures relatives peut devenir illusoire dans le cas des mesures absolues.

L'acquéreur d'un étalon de fréquence désire pouvoir en contrôler le fonctionnement par rapport à un bon chronomètre. De là les « timing unit » associés aux « Standard frequency assembly » équipement complexe dont les panneaux de commande couvrent une surface imposante.

Avec le compte-secondes Jacquet, il suffit d'en comparer la marche avec un bon chronomètre de poche, aisément contrôlable lui-même par les signaux horaires de T. S. F.

*

**

Le fréquencemètre décrit est un appareil de laboratoire. On peut le transformer en appareil d'atelier de la manière suivante.

Sur l'axe du moteur stroboscopique calons un rotor de magnéto génératrice de courant continu ou alternatif redressé. Graduons en fréquences le voltmètre appliqué. Pour les mesures, il suffira, ayant placé le voltmètre près de la flamme sensible, d'immobiliser les franges un instant et de lire, au même instant, l'indication de l'aiguille voltométrique.

Ainsi transformé, l'appareil peut servir à contrôler les variations d'une fréquence dont on ne pourrait assurer la constance pendant les quelques minutes demandées par la mesure précise détaillée ci-dessus.

Ainsi transformé, il peut remplacer les « monitoring » avertisseurs d'écart de part et d'autre d'une fréquence imposée donnée. Pour ce but spécial et parce qu'il vise une valeur numérique spéciale de la fréquence, on sensibilisera le voltmètre par l'artifice suivant. On le dotera de deux circuits enroulés en différentiel dont l'un sera soumis au voltage de la magnéto et l'autre à un voltage connu exactement mesuré. Ses déviations seront positives ou négatives suivant que la fréquence du courant sera supérieure ou inférieure à la fréquence imposée.

Dans tous les cas, on conserve le compte-tours et le compte-secondes qui serviront soit à l'étalonnage du voltmètre, soit à tous contrôles ultérieurs désirables.

Manuscrit reçu le 30 septembre 1934.

