

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1. Le Conservatoire numérique communément appelé le Cnum constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par [Eclydre](#).
2. Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam. Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :
 - la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue (Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - <https://cnum.cnam.fr>)
 - la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.
3. Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :
 - les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.
4. Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)
5. L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.
6. Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE DE LA GRANDE MONOGRAPHIE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Auteur collectif
Auteur(s)	Conservatoire national des arts
Titre	Conférences d'actualités scientifiques et industrielles
Collection	Conférences d'actualités scientifiques et industrielles
Adresse	Paris : Hermann & Cie, 1930-1943
Collation	27 vol.
Nombre de volumes	27
Sujet(s)	Sciences et industrie
Notice complète	
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8CY54_8B83
LISTE DES VOLUMES	
	Conférences d'actualités scientifiques et industrielles. Année 1929
	Température des flammes : Rayonnement des gaz incandescents et des flammes [28 et 29 avril 1930]
	Anisotropie des molécules : effet Raman [2 et 3 mai 1930]
	Les ondes électriques de très courtes longueurs et leurs applications [6 mai 1930]
	Couleurs (étude physique) et colorimétrie [7 mai 1930]
	L'électro-acoustique : rapports de l'acoustique moderne et de l'électricité [9 mai 1930]
	Les statistiques quantiques et leur application aux électrons libres dans les métaux [12 et 13 mai 1930]
	La constitution des comètes [14 mai 1930]
	La structure et les mouvements de l'univers stellaire [16 mai 1930]
	La haute précision des mesures de longueur au laboratoire et dans l'industrie [22 avril 1931]
	L'effet photo-électrique des rayons X dans les gaz [23 avril 1931]
	Fluorescence : durée élémentaire d'émission lumineuse [28 avril 1931]
	Les récents progrès de la désintégration artificielle des éléments par bombardement de rayons alpha [29 avril 1931]
	Les applications des rayons X à l'étude des composés organiques [4 mai 1931]
	L'état liquide et les états mésomorphes [5 mai 1931]
	Les systèmes autoentretenus et les oscillations de relaxation [6 et 7 mai 1931]
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	Le quartz piézo-électrique : ses applications à la T.S.F. [8 mai 1931]
	L'hydrogène est un mélange : ortho et parahydrogène [12 mai 1931]
	Les piles sensibles à l'action de la lumière : leur mécanisme et leurs applications [28 mai 1931]
	Application des théories modernes à l'étude de la structure des molécules : les théories quantiques [14 mars 1935]
	Polarisation diélectrique [1935]
	Applications à la chimie des théories modernes sur la structure des molécules : les données spectrales [18 mars 1935]
	La chimie colloïdale et ses applications : les constituants colloïdaux des terres arables : le complexe argilo-humique et les phénomènes d'échanges d'ions [1er et 2 octobre 1941]

	Physique colloïdale et biologie [3 octobre 1941]
	Chimie colloïdale et biologie [7 octobre 1941]
	La chimie colloïdale et ses applications. Les processus colloïdaux de la défense de l'organisme contre les maladies infectieuses : Les virus et les plus simples des édifices colloïdaux bâtis par la vie [8 et 9 octobre 1941]
	Combustibles et lubrifiants de remplacement [28 octobre 1941]

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Auteur(s) volume	Conservatoire national des arts
Titre	Conférences d'actualités scientifiques et industrielles
Volume	Le quartz piézo-électrique : ses applications à la T.S.F. : conférence faite au Conservatoire national des arts et métiers le 8 mai 1931
Adresse	Paris : Librairie scientifique Hermann et Cie, 1931
Collection	Conférences d'actualités scientifiques et industrielles, 28
Collation	1 vol. (31 p.) : ill. ; 26 cm
Nombre de vues	36
Cote	CNAM-BIB 8 B 23 (28)
Sujet(s)	Piézoélectricité Pyroélectricité Quartz Télégraphie sans fil
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	29/10/2026
Date de génération du PDF	29/10/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/025982400
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8B83.28

8°B.83 | 28

CONFÉRENCES D'ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES
XXVIII

LE
QUARTZ PIÉZO-ÉLECTRIQUE



SES APPLICATIONS A LA T. S. F.

CONFÉRENCE

FAITE AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

LE 8 MAI 1931

PAR

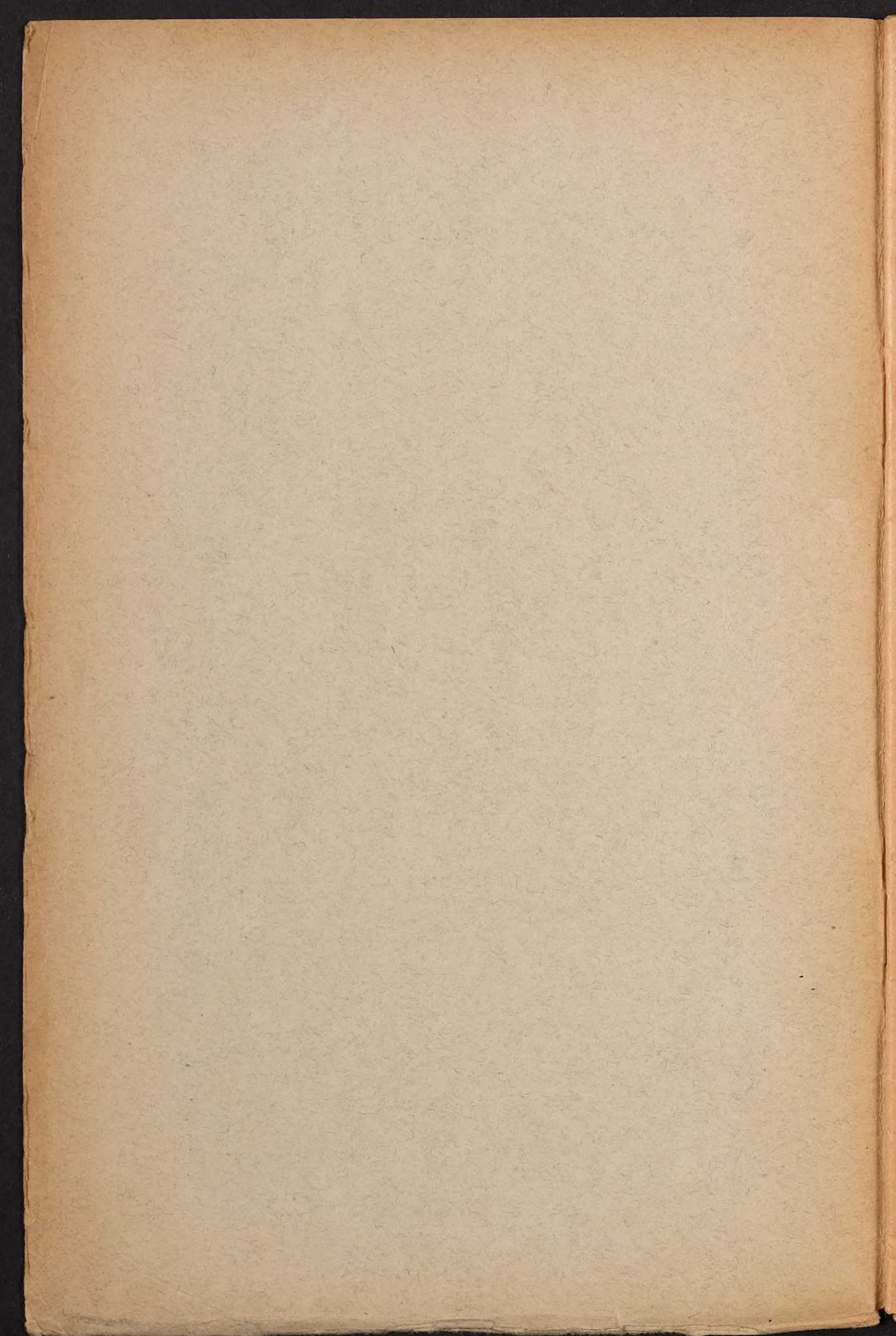
F. BEDEAU

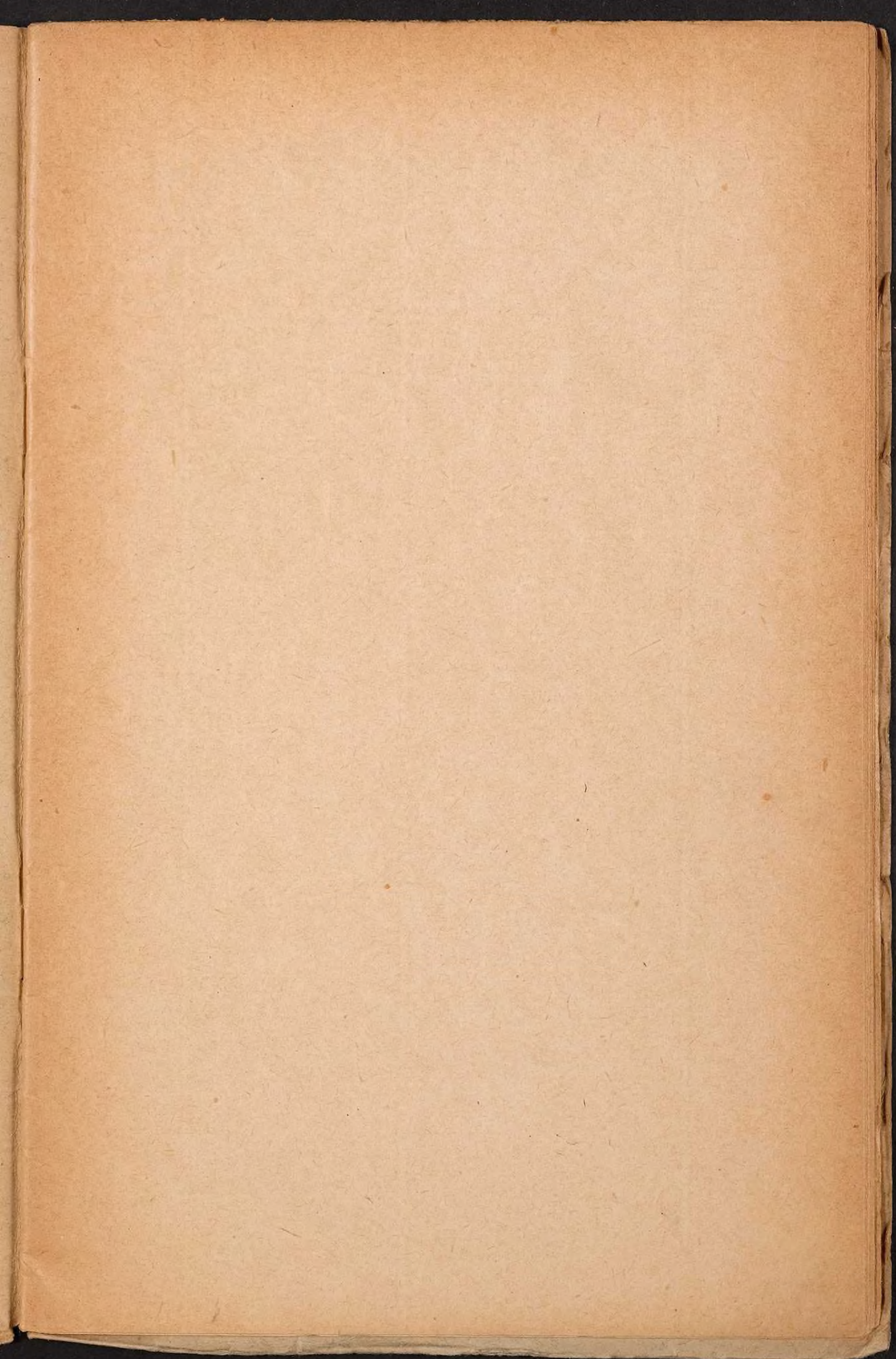
DOCTEUR ÈS SCIENCES, AGRÉGÉ DE PHYSIQUE

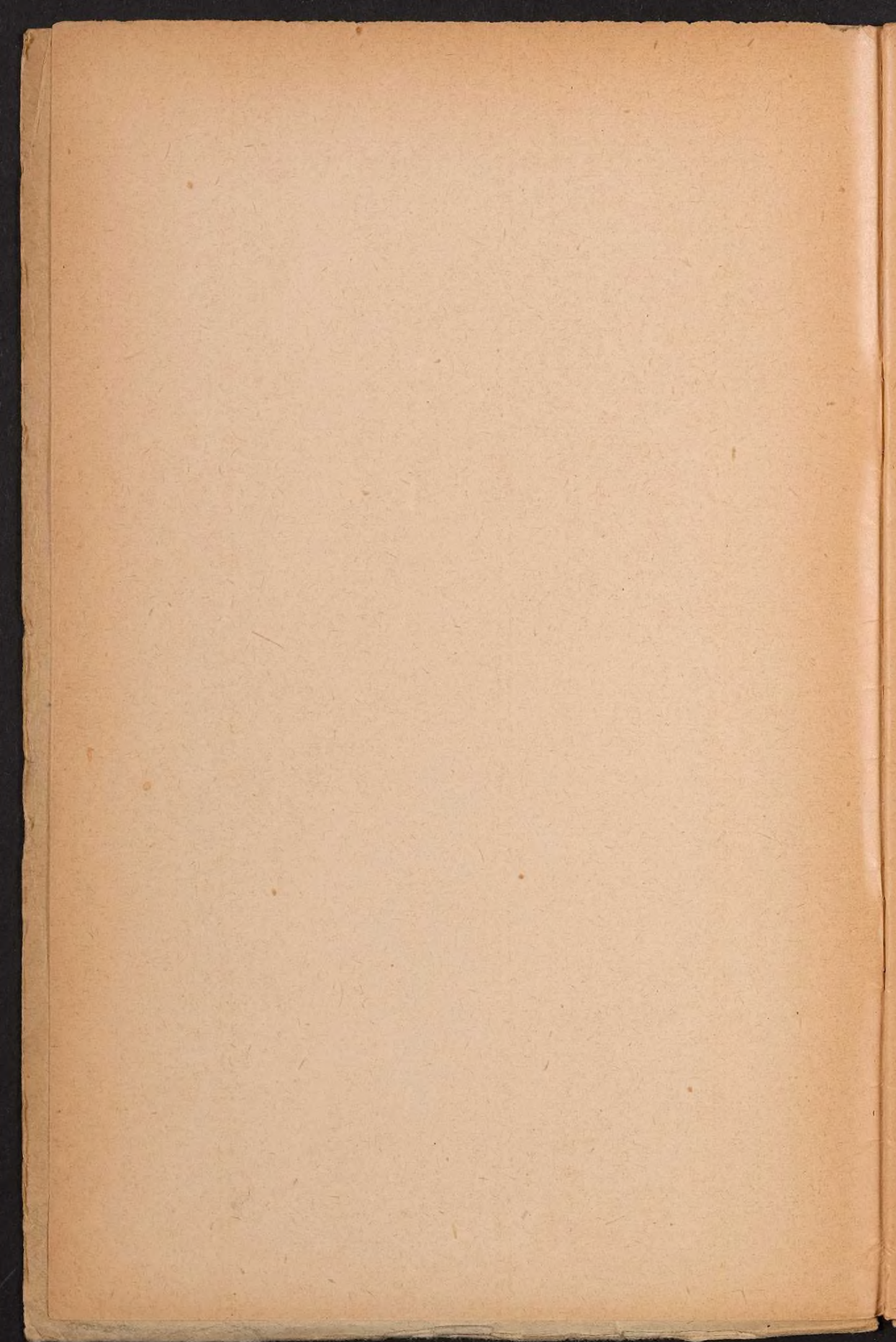
◆

PARIS
LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET C^{ie}
6, RUE DE LA SORBONNE, 6

—
1931







8° B. 83 (28)

CONFÉRENCES D'ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES
XXVIII

LE
QUARTZ PIÉZO-ÉLECTRIQUE
SES APPLICATIONS A LA T. S. F.



CONFÉRENCE

FAITE AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

LE 8 MAI 1931

PAR

F. BEDEAU

DOCTEUR ÈS SCIENCES, AGRÉGÉ DE PHYSIQUE



PARIS
LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET C^{ie}
6, RUE DE LA SORBONNE, 6

—
1931

DU MÊME AUTEUR

Cours élémentaire de télégraphie et téléphonie sans fil. Un volume in-8°, 421 pages. 60 francs.

Le quartz piézo-électrique et ses applications dans la technique des ondes hertziennes. Un fascicule in-8°, 60 pages. 15 francs.

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

COPYRIGHT 1931 BY LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET C^{ie},
PARIS.

1

LE QUARTZ PIÉZO-ÉLECTRIQUE SES APPLICATIONS A LA T. S. F.

par F. BEDEAU

Docteur ès sciences. Agrégé de Physique.

MESDAMES, MESDEMOISELLES, MESSIEURS,

Je vais tenter dans cette courte conférence de vous exposer ce qu'est le phénomène de la piézo-électricité et de vous indiquer les applications importantes qui en ont été faites en T. S. F.

Et tout d'abord qu'est-ce que ce phénomène de piézo-électricité?

Certains cristaux comprimés suivant certaines directions présentent des charges électriques positives sur une face tandis qu'une autre face se recouvre d'électricité négative. Les deux charges sont bien entendu égales en valeur absolue d'après le principe connu sous le nom de « principe de la conservation de l'électricité ».

Le phénomène a été signalé par Haüy en 1817. Il passa inaperçu et c'est seulement le 2 août 1880 que les frères Pierre et Jacques Curie, dans une communication à l'Académie des Sciences, en énoncèrent les lois.

A peine ces lois étaient-elles énoncées que Lippmann (1881) énonçait les lois de ce que l'on désigne sous le nom de phénomène piézo-électrique inverse.

« Un cristal piézo-électrique convenablement taillé et convenablement placé dans un champ électrique subit des déformations. »

Pendant de longues années les phénomènes ne reçurent d'autres applications que celles indiquées par les frères Curie eux-mêmes, et dont la principale est la mesure de faibles quantités d'électricité.

C'est à M. Paul Langevin que l'on doit en définitive toutes les applications modernes.

Description du cristal de quartz.

Beaucoup de cristaux sont piézo-électriques et quelques-uns même à un degré beaucoup plus élevé que le quartz; mais le quartz présente des qualités de solidité qui le font préférer pour les applications à tous les autres.

Nous ne nous occuperons donc que de la piézo-électricité du quartz.

Le quartz se présente dans la nature sous la forme d'un prisme hexagonal surmonté de pyramides (fig. 1).

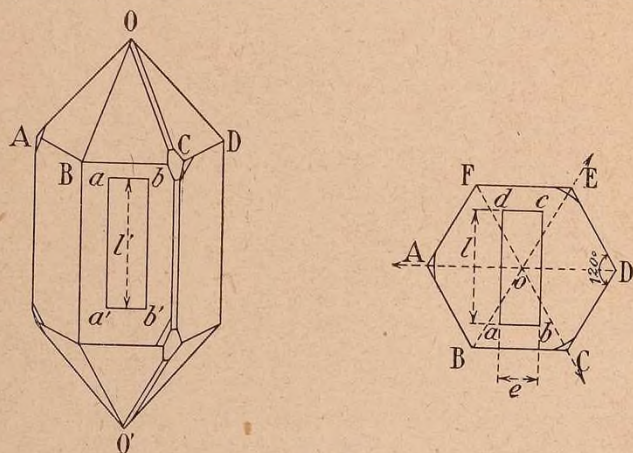


FIG. 1.

L'axe OO' est l'axe du cristal; il porte aussi le nom « d'axe optique ».

La coupe du cristal par un plan perpendiculaire à OO' est un hexagone régulier au sens cristallographique, c'est-à-dire que l'angle de deux faces est égal à 120° , les côtés de l'hexagone pouvant n'être pas égaux.

Toutefois la symétrie du cristal n'est pas d'ordre 6, c'est-à-dire que pour le superposer à lui-même il n'est pas possible de le faire tourner de $\frac{360^\circ}{6}$. Vous pouvez remarquer, en effet, que des sommets tels que A, C présentent des « troncatures ». La symétrie est donc seulement d'ordre 3. Le cristal est superposable à lui-même lorsqu'on le fait tourner d'un angle égal à

$$\frac{360^\circ}{3}$$

Les axes DA, BE, FC sont les axes binaires; ils portent aussi le nom « d'axes électriques ».

Lois des frères Curie.

Taillons dans le cristal un parallélépipède ab , $a'b'$ ayant une épaisseur e suivant l'axe électrique, une hauteur l suivant l'axe optique et une largeur l suivant la direction perpendiculaire aux deux premières et à laquelle nous donnerons le

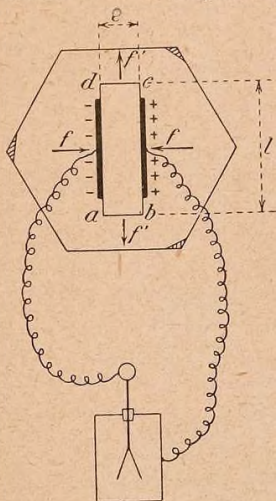


FIG. 2.

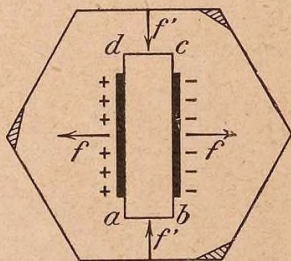


FIG. 3.

nom de troisième direction. Recouvrons les faces ad , bc de feuilles d'étain et réunissons les deux feuilles à un électroscope (fig. 2) ou mieux à un électromètre.

Nous pouvons réaliser alors les expériences suivantes :

1° Comprimons la lame suivant la direction de l'axe électrique : la plage ad se charge négativement, la plage bc positivement.

2° Maintenant la compression, réunissons les deux faces par un fil conducteur : les deux plaques se déchargent (les quantités d'électricité étaient égales conformément au principe de la conservation de l'électricité).

3° Supprimons le fil conducteur, puis la compression : les deux faces présentent encore des charges égales mais c'est la face ad qui se recouvre d'électricité positive alors que la face cb se recouvre d'électricité négative (fig. 3).

Ainsi une traction produit l'effet inverse d'une compression.

Première loi de Curie. — Si on désigne par p la pression exercée sur les faces, c'est-à-dire le quotient de la force F par la surface S :

$$p = \frac{F}{S} \quad \text{et} \quad S = ll';$$

si on désigne par σ la densité électrique, c'est-à-dire le quotient de la charge Q par la surface S :

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

on a :

$$\sigma = kp;$$

k est le module de piézo-électricité ou constante de Curie.

Si p est comptée en baryes, σ en unités électrostatiques C. G. S., on a :

$$k = 6,43 \cdot 10^{-8}.$$

La loi précédente peut s'écrire sous une autre forme. En effet :

$$\sigma = kp;$$

$$\sigma S = kpS;$$

$$Q = kF.$$

Ainsi la charge totale est proportionnelle à la force.

Appliquons une force de 5 kilogrammes; on trouve une quantité d'électricité à peu près égale à celle que débiterait un courant de 100 microampères pendant un millionième de seconde!

On ne sera pas étonné de la surprise qu'éprouvèrent bien des physiciens lorsqu'on leur apprit pendant la guerre que M. Langevin avait l'intention de déceler des sous-marins à grande distance en utilisant les phénomènes piézo-électriques!

4° Exerçons maintenant une traction sur les faces cd et ab . Il est assez naturel de penser que cette traction suivant les flèches f'' produira un effet analogue à celui d'une compression suivant les flèches ff . Effectivement une traction suivant f' produit un dégagement d'électricité négative sur ad et d'électricité positive sur cb (fig. 2).

De même (fig. 3) une compression suivant f' produit un effet analogue à celui d'une traction suivant f .

Deuxième loi de Curie. — La densité électrique σ , quotient de la charge Q par la surface $S = ll'$, est reliée à la pression p ,

quotient de la face F par la surface $S' = l'e$, par la formule :

$$\sigma = kp;$$

k a toujours la valeur $6,43 \cdot 10^{-8}$.

Mais :

$$\sigma = \frac{Q}{l'e} \quad \text{et} \quad p = \frac{F}{l'e}$$

d'où :

$$\frac{Q}{l'e} = k \frac{F}{l'e}$$

ou :

$$Q = k \frac{l}{e} F.$$

Cette fois la charge est multipliée par $\frac{l}{e}$; si donc l est grand et e petit la charge pourra être relativement importante.

Les frères Curie utilisèrent un cristal de dimensions :

$$e = 0,03 \text{ cm.} \quad l = 2 \text{ cm.}$$

Pour un poids de 5 kilogrammes, on trouve :

$$Q = 4,21 \cdot 10^{-3} \text{ microcoulomb.}$$

Cette charge est quarante fois plus grande que celle qui a été calculée précédemment :

$$\frac{l}{e} = \frac{2}{0,03} = 40;$$

elle est donc égale à celle que débiterait un courant de 100 microampères pendant 40 millièmes de seconde.

Vous avez sous les yeux un quartz piézo-électrique de Curie (fig. 4); vous voyez nettement les feuilles de l'électroscope diverger lorsque nous plaçons un poids de 2 kgr. dans le plateau.

Au lieu de l'électroscope on utilise naturellement pour les mesures un électromètre.

Malgré la petitesse des charges, la sensibilité des appareils est telle qu'on observe une variation de charge électrique pour une surcharge de $1/2$ gramme.

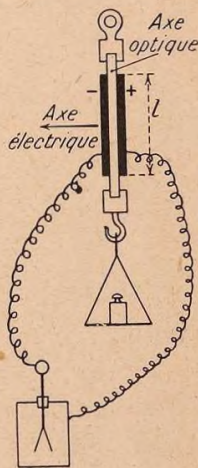


FIG. 4.

Jacques Curie remarque dans sa thèse que l'on a ainsi réalisé un instrument permettant de produire des quantités d'électricité proportionnelles aux poids et variables de 1 à 10.000.

3° Comprimons le cristal suivant l'axe optique, on ne constate aucun phénomène. Ceci constitue la *troisième loi de Curie*.

Phénomènes piézo-électriques inverses (Lippmann).

Appliquons (fig. 5) une différence de potentiel v entre les deux feuilles d'étain.

On peut présumer et en tout cas l'expérience vérifie que le quartz *tend à résorber* les charges fournies par la pile. Autrement dit, il tend à faire apparaître des charges positives sur ad et des charges négatives sur bc . Le quartz se déforme donc comme il le ferait sous l'action d'une traction suivant f ou d'une compression suivant f' .

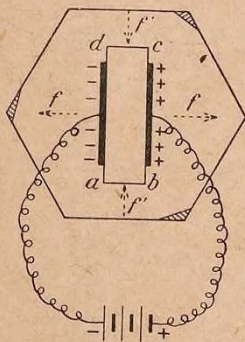


FIG. 5.

LOIS DE LIPPMANN.

1° Suivant l'axe électrique il y a une variation d'épaisseur :

$$\Delta e = kv.$$

2° Suivant la troisième direction il y a une variation Δl , de sens contraire à Δe et :

$$\Delta l = k \frac{l}{e} v.$$

3° Suivant l'axe optique il n'y a pas de variations de largeur. Le coefficient k est égal à celui de Curie.

Les lois de Lippmann ont été démontrées par ce savant en appliquant les lois de la thermodynamique et le principe de la conservation de l'électricité sous la forme particulière qu'il lui avait donnée.

Première remarque. — La lame de quartz placée entre deux feuilles d'étain constitue un condensateur. Si on désigne par k_1 la capacité de ce condensateur, la pile débite une quantité d'électricité :

$$q = k_1 v.$$

Mais puisque du fait des phénomènes piézo-électriques le quartz fait apparaître des charges de signes contraires à celles fournies par la pile, celle-ci doit débiter une charge supplémentaire q_1 et on a :

$$q = k_1 v + q_1.$$

Cette remarque, de toute première importance nous amènera à vous dire plus tard un mot de la « cellule équivalente ».

Deuxième remarque. — Depuis que la piézo-électricité a reçu de nombreuses applications on a étudié un nombre considérable de quartz. On sait aujourd'hui que la constante de Curie dépend des différents échantillons. Elle est comprise entre 5 et 7.

Tentative d'explication des phénomènes. Hypothèse de Voigt.

Devons-nous envisager un cristal piézo-électrique comme une sorte de réservoir d'où nous pouvons à volonté faire sortir des charges électriques par des compressions ou dilatations de sens convenable? En d'autres termes et en admettant qu'avant la compression, le cristal (qui est à l'état neutre) possède des charges électriques égales et de signes contraires, allons-nous pouvoir, en exerçant des compressions de sens convenable, lui soustraire une partie de ces charges, c'est-à-dire diminuer les quantités d'électricité positive et négative qu'il possédait initialement? Certainement non.

L'hypothèse la plus vraisemblable est celle de Voigt qui admet que sous l'effet de la compression le cristal se polarise.

Vous savez qu'un aimant est composé d'une infinité de petits aimants ou doublets convenablement orientés (expérience de l'aimant brisé). Un doublet est en définitive un ensemble de deux masses égales et de signes contraires très voisines. Dans un morceau de fer doux, non aimanté, les doublets préexistent et si le corps ne présente pas le phénomène de l'aimantation c'est que les axes des doublets ont des directions absolument quelconques; mais si nous plaçons le fer doux dans un champ magnétique les doublets ont tendance à s'orienter suivant la direction du champ : le corps est aimanté; il présente des plages positive et négative.

De même, un cristal piézo-électrique serait composé de doublets électriques et la traction aurait pour effet de les orienter suivant la direction de l'axe électrique (fig. 6). Le cristal *abcd* étant polarisé il apparaît, par exemple, des charges négatives

sur la face ad , des charges positives sur la face bc . Si le cristal est inséré entre deux plaques métalliques M et M' celles-ci se chargeront par influence et les feuilles de l'électroscope divergeront.

Réunissons la boule de l'électroscope à la cage de l'appareil, les charges tombent car les charges apparues sur les faces m'_1 et m'_2 se neutralisent; par contre, les charges des faces m_1 et m_2 subsistent étant retenues par les charges des faces ad et cb .

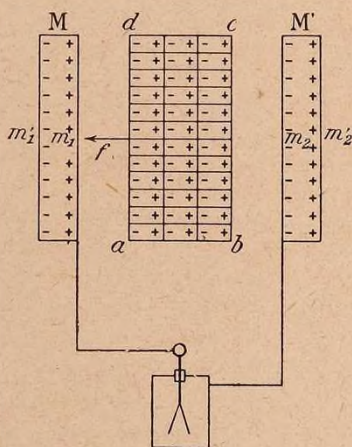


FIG. 6.

Si maintenant nous supprimons la compression, la polarisation disparaît et par conséquent les charges des faces ad et cb , les charges en m_1 et m_2 sont libérées; les feuilles de l'électroscope divergent à nouveau.

Fréquences propres des lames de quartz.

Considérons une lame de quartz (fig. 7) taillée perpendiculairement à la direction XX de l'axe électrique et comprimons-la brusquement suivant la direction de cet axe. Cette lame, qui est élastique, se mettra à vibrer avec une période qui est sa période propre. Il y aura un nœud de vibration suivant YY et des ventres de vibration suivant les deux faces bc et ad . L'expérience montre que les oscillations sont *extrêmement peu amorties*. On conçoit donc que si nous donnons au quartz des impulsions à des intervalles de temps égaux à la période propre, les oscilla-

tions prendront des amplitudes de plus en plus grandes : c'est le phénomène de résonance du quartz utilisé pour la première fois par Langevin.

L'Américain Cady, auquel pendant la guerre MM. Abraham et Fabry avaient indiqué les travaux de Langevin, a cherché une relation entre la fréquence propre et l'épaisseur e .

Puisqu'il y a un ventre sur chaque face l'épaisseur e est égale à $\frac{\lambda}{2}$, λ désignant la longueur d'onde; si v est la vitesse de propagation du son dans le quartz suivant la direction e , on a :

$$e = \frac{\lambda}{2} = \frac{vT}{2} = \frac{v}{2f},$$

T désignant la période et f la fréquence.

On trouve finalement :

$$f = \frac{2.730.000}{e},$$

e étant compté en millimètres.

Hund, à la suite de nombreuses expériences, a donné d'excellentes formules empiriques. Il a montré que le quartz pouvait vibrer avec une fréquence f_1 suivant la troisième direction, une fréquence f_2 suivant la direction de l'axe optique, une fréquence f_3 suivant la direction de l'axe électrique et que, comptant les fréquences en kilocycles, les longueurs en millimètres on a, pour les lames rectangulaires :

$$f_1 l = 2.785 \quad f_2 l' = 2.943 \quad f_3 e = 2.870.$$

Pour les lames circulaires taillées perpendiculairement à l'axe électrique et de diamètre d , on a :

$$f_1 d = 2.743 \quad f_2 d = 3.830 \quad f_3 e = 2.870.$$

Ainsi, une lame d'épaisseur $e = 1$ mm., peut vibrer suivant l'axe électrique avec une fréquence 2.870.000.

Si nous réussissons à la faire vibrer nous aurons réalisé ainsi un véritable doublet de Hertz produisant une onde hertzienne de longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{300.000}{2.870.000} \approx 103 \text{ mètres.}$$

(vitesse de propagation de l'onde hertzienne égale à celle de la lumière : 300.000 kilomètres).

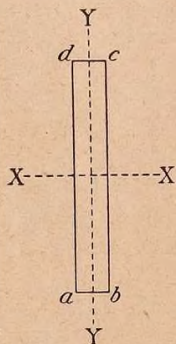


FIG. 7.

Amortissement du quartz.

Lorsqu'un pendule oscille, les élongations sont représentées en fonction du temps par une courbe telle que celle de la figure 8; cette courbe représente une sinusoïde amortie.

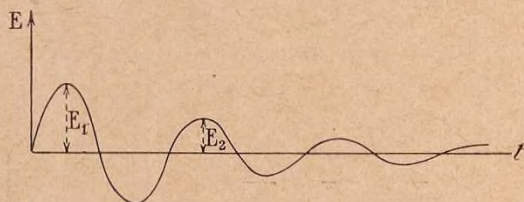


FIG. 8.

Le rapport de deux élongations maxima consécutives et de même sens E_1 et E_2 est donné par la formule :

$$\frac{E_1}{E_2} = e^D,$$

e est la base de logarithmes népériens; D porte le nom de « décrement logarithmique ». Si D était égal à zéro il n'y aurait pas d'amortissement, la courbe représentative serait une sinusoïde. On voit que le système sera d'autant moins amorti que D sera plus petit.

Vous savez qu'en T. S. F. on utilise des circuits dits circuits oscillants comprenant une bobine et un condensateur. Si on charge le condensateur le courant de décharge est représenté par une courbe analogue à celle de la figure 7. On cherche naturellement à avoir des circuits présentant le plus faible amortissement.

Voici le résultat remarquable trouvé par Dye qui est arrivé à mesurer le décrement D pour les quartz : ce décrement est environ 1.000 fois plus petit que celui d'un bon circuit électrique!

Vous voyez donc que si nous réussissons à faire vibrer notre quartz, il aura une singulière aptitude à continuer à vibrer. Si, par exemple, les amplitudes sont encore notables au bout de 10.000 vibrations et si le quartz émet une onde hertzienne de longueur d'onde égale à 400 mètres (fréquence 3.000.000) le cristal vibrera encore après $\frac{1}{300}$ de seconde.

Sifflement du quartz.

Je vous rappellerai tout d'abord ce qu'on entend par sifflements d'hétérodyne. Un hétérodyne est un poste émetteur d'ondes hertziennes entretenues et de faible puissance. Supposons que nous disposions de deux hétérodynes émettant des fréquences f et f' ; l'expérience montre que le téléphone d'un poste récepteur rend un son de fréquence $f - f'$ si, bien entendu, la différence $f - f'$ n'est ni trop grande ni trop petite, car dans l'un et l'autre cas pas plus le téléphone que l'oreille ne pourraient enregistrer le son.

Si laissant f' constant nous faisons varier f régulièrement en le supposant d'abord plus grand que f' et en le faisant décroître nous entendrons d'abord des sons aigus, puis graves et enfin nous n'entendrons plus rien. Le téléphone ne rend pas ou rend mal les fréquences de l'ordre de vingt à trente. Si nous continuons à faire varier f dans le même sens nous entendrons à nouveau des sons graves puis aigus.

Prenons maintenant un seul hétérodyne et faisons varier rapidement sa fréquence au voisinage d'un quartz. Il y aura un moment où la fréquence de l'hétérodyne sera égale à celle du quartz. Or, l'hétérodyne produit un champ électrique hertzien; sous l'action de ce champ, le quartz se mettra à vibrer avec sa période propre lorsque la fréquence d'excitation sera égale à la sienne; le quartz continuera à vibrer avec sa fréquence propre f' , alors la fréquence f de l'hétérodyne continuera à varier; nous entendrons donc pendant un temps extrêmement court les sifflements d'hétérodyne. C'est bien ce que vous pouvez constater.

Oscillateurs à quartz.

NÉCESSITÉ DE LA STABILISATION DES FRÉQUENCES.

Imaginons qu'un poste émette sur une longueur d'onde $\lambda = 10.000$ m. (fréquence $f = 3.10^4$) et proposons-nous de recevoir l'émission par le procédé hétérodyne.

Supposons que le son entendu au téléphone ait une fréquence 1.000, l'hétérodyne est alors accordé sur une fréquence f' égale à 29.000 ou 31.000. Le son entendu a, en effet, une fréquence :

$$F = f - f' \quad \text{ou} \quad F = f' - f.$$

Supposons encore que la fréquence f de l'hétérodyne soit bien stable, les variations de F seront alors égales aux variations de f . Si f varie de cent périodes F variera de 100 périodes; la variation relative de fréquence est :

$$\frac{df}{f} = \frac{100}{30.000} = \frac{1}{300}.$$

C'est là une bien grosse variation qui se produira difficilement.

Nous pouvons donc conclure que le son entendu au téléphone variera peu et en tout cas restera dans la gamme audible sans qu'il y ait lieu de modifier le réglage de l'hétérodyne.

Mais supposons maintenant que la longueur d'onde du poste émetteur soit égale à 100 m. On a alors $f = 3.10^6$. Pour $df = 100$, on a :

$$\frac{df}{f} = \frac{1}{30.000}.$$

Les moindres variations de chauffage des lampes, des tensions de plaque, du vent sur l'antenne... peuvent produire des variations aussi faibles et même de beaucoup plus importantes.

L'inconvénient signalé n'est pas le plus grave. Lorsqu'il s'agit de trafic commercial, le poste récepteur est alors un appareil complexe, de réglage délicat; ces appareils sont réglés une fois pour toutes sur l'onde à recevoir. Des variations de fréquence à l'émission réduisent sensiblement l'acuité de réception.

Enfin, considérons un poste émetteur destiné à la radiodiffusion. Si un tel poste est réglé sur une onde principale dite onde porteuse de fréquence f les ondes envoyées dans l'espace occupent une bande de fréquence comprise entre $f - 5.000$ et $f + 5.000$, soit une bande de 10 kilocycles. Une modification dans la valeur de f entraîne un déplacement à droite ou à gauche de toute cette bande de fréquences et celle-ci risque de pénétrer dans la bande occupée par un poste voisin. Il y aura empiètement d'une bande sur l'autre.

Aujourd'hui, on tend à exiger des émetteurs une stabilisation de la fréquence à $\frac{1}{100.000}$ près.

RÉALISATION D'UN OSCILLATEUR A QUARTZ.

La méthode la plus simple pour stabiliser la fréquence est d'utiliser un oscillateur à quartz.

Nous avons vu l'aptitude que possède le cristal à entrer en vibrations et à conserver sa fréquence propre. C'est cette propriété fondamentale du quartz qui est utilisée.

Les montages réalisés sont extrêmement nombreux. L'un des plus simples et des plus utilisés est celui de Pierce (fig. 9). Le quartz est intercalé dans le circuit de grille. Une résistance de fuite ρ permet de fixer le potentiel moyen de grille; une self $\mathcal{L}'$ empêche la dérivation des courants de haute fréquence. En fait l'appareil fonctionne bien en supprimant ρ et $\mathcal{L}'$. Dans le circuit de plaque est intercalé un circuit oscillant $\mathcal{L}C$.

Le fonctionnement de l'oscillateur est évident. La moindre variation du potentiel de grille amorce les oscillations du quartz (effet piézo-électrique inverse).

L'amortissement du quartz étant très faible le cristal oscille et fait varier la tension de grille (effet direct). Evidemment le

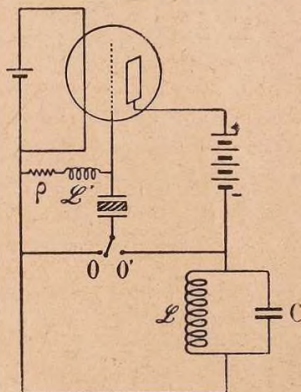


FIG. 9.

fonctionnement n'est possible que s'il y a réaction du circuit de plaque sur le circuit de grille; or, ces deux circuits sont bien couplés par suite de la capacité grille-plaque, d'une part, et par les connexions réalisées en O ou O', d'autre part.

Encore une fois on peut réaliser un grand nombre de montages et en fait presque tous ceux qui sont utilisés pour produire des oscillations au moyen de lampes peuvent être stabilisés lorsqu'on y ajoute un quartz.

Nous allons vous présenter un oscillateur d'un type un peu nouveau.

Il est constitué par une lampe à grille-écran (fig. 10) dans le circuit de plaque de laquelle on a intercalé un circuit oscillant $\mathcal{L}C$; on a eu soin, d'autre part, de porter le potentiel de l'écran E à une valeur plus grande que celui de plaque. La grille de contrôle G est simplement reliée au filament. Or, si maintenant le potentiel de la grille de contrôle et celui de l'écran à une valeur constante, on fait varier la tension plaque V, le courant filament plaque I est représenté en fonction de V par une courbe analogue à celle de la figure 11. On voit qu'il existe une région AB telle que V allant en croissant, I va

en décroissant; la lampe se comporte comme une résistance négative. On peut démontrer d'autre part que lorsqu'on branche une résistance négative aux bornes d'un circuit oscillant,

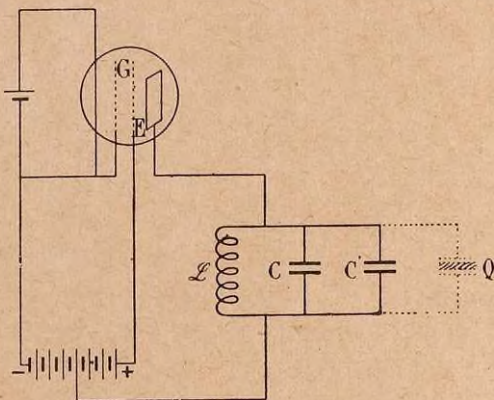


FIG. 10.

celle-ci entretient les vibrations du circuit lorsqu'elles sont amorcées; le circuit de la figure 9 constitue donc bien un oscillateur émettant une onde de fréquence f .

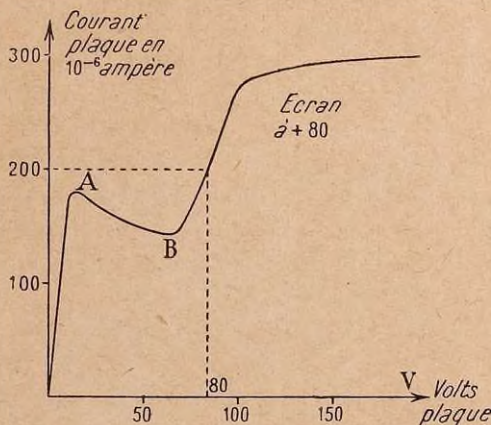


FIG. 11.

Faisons fonctionner en même temps que ce premier oscillateur un hétérodyne accordé sur une fréquence f' voisine de f . Le téléphone d'un poste récepteur rend un son de fréquence $f - f'$.

Aux bornes de C nous avons monté un condensateur variable C' de très petite capacité. Vous constatez qu'en agissant sur C' nous faisons varier la hauteur du son, nous avons fait varier f .

Il suffit d'ailleurs d'approcher la main de la bobine $\mathcal{L}$ pour modifier la hauteur du son.

Si maintenant nous branchons un quartz Q aux bornes de C, la période du circuit $\mathcal{L}C$ étant voisine de celle du quartz, vous constatez qu'en faisant varier C nous ne faisons plus varier la hauteur du son de fréquence $f - f'$. La fréquence f est stabilisée.

Des expériences précises montrent qu'un émetteur oscillant à une fréquence 3.10^6 ($\lambda = 100$ m.) conserve pendant des heures entières cette fréquence à moins de 40 cycles. La fixation de la fréquence se fait donc à $\frac{1}{300.000}$ près.

Bien entendu il faut opérer avec quelques précautions. En particulier le quartz doit être placé dans un thermostat, une variation de température de 1 degré centigrade produit des variations de fréquence de l'ordre de $1/300.000$.

DOUBLEURS DE FRÉQUENCE.

Supposons que nous voulions stabiliser une onde de trente mètres ($f = 10.000.000$) avec un quartz ayant la forme d'un disque circulaire d'épaisseur e millimètres dans la direction de l'axe électrique et vibrant suivant cet axe.

La formule de Hund ($f_3 e = 2.870$ kilocycles) nous donne :

$$e = \frac{2.870.000}{10.000.000},$$

soit un peu moins de trois dixièmes de millimètres!

Une lame de quartz d'une épaisseur aussi faible peut parfaitement vibrer; elle vibre même si bien qu'elle se brise.

On tourne la difficulté de la façon suivante.

Prenons une lame d'épaisseur double, la fréquence obtenue sera deux fois plus petite; doublons encore l'épaisseur, la fréquence sera quatre fois plus petite. Si nous faisons suivre notre oscillateur à quartz de deux doubleurs de fréquence, nous retrouverons la fréquence désirée.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour doubler la fréquence. Nous indiquerons un des montages les plus employés, d'ailleurs en service au poste à ondes courtes de Sainte-Assise. Ce montage est celui de la figure 12. Le circuit AB est parcouru par un courant de fréquence f ; il agit par induction sur le circuit A'B' dont les extrémités sont connectées aux deux grilles de deux lampes identiques.

Les piles p_1 servent au chauffage des filaments, les piles p_2 fournissent les tensions de plaques, enfin les piles p_3 maintiennent les tensions moyennes de grilles fortement négatives. Le courant filament-plaque ne peut s'établir dans l'une des lampes que lorsque la tension de plaque de celle-ci est forte-

ment positive; il ne dure par conséquent qu'un temps très court et fournit alors une impul-

sion au circuit $\mathcal{L}C$. Or, pendant la moitié de la période $\frac{1}{f}$, A' est positif; c'est B' au contraire qui est positif pendant la demi-période suivante. On voit donc que le circuit $\mathcal{L}C$ reçoit deux impulsions pendant la période $\frac{1}{f}$.

Ce circuit $\mathcal{L}C$ étant accordé sur une fréquence $2f$ fournira par conséquent des oscillations de fréquence $2f$. C'est encore un courant de fréquence $2f$ que nous recueillerons dans le cir-

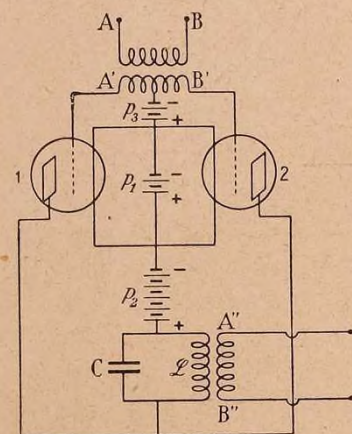


FIG. 12.

cuit $A''B''$. En doublant cette fréquence $2f$ par un dispositif analogue, nous obtiendrons la fréquence $4f$ désirée.

REMARQUE. — En choisissant convenablement les valeurs de $\mathcal{L}$ et C (fig. 10), on peut faire émettre les fréquences f_1 , f_2 ou f_3 . Il est bien naturel que le quartz, placé dans un champ électrique, puisse produire la fréquence f_1 (vibration suivant la troisième direction) et la fréquence f_3 (vibration suivant l'axe électrique); il est, par contre, tout à fait inattendu de constater une vibration suivant l'axe optique. Cette vibration existe cependant d'une façon indiscutable et il a été jusqu'à présent impossible de donner de son existence une explication correcte.

Mesure des fréquences.

Ce problème, de toute première importance pour le radio-télégraphiste, est aujourd'hui à peu près complètement résolu grâce au diapason et au quartz piézo-électrique. Les Américains prétendent même mesurer les fréquences avec une précision de $1/10.000.000$! En fait, un laboratoire bien outillé peut certainement obtenir le $1/100.000$.

Je vous indiquerai le montage que M. J. de Mare et moi-même avons utilisé.

Supposons le circuit AB (fig. 13) parcouru par un courant de fréquence relativement basse et parfaitement connue; ce sera, par exemple, un courant de fréquence $F = 1.000$ engendré par un diapason entretenu électriquement. En choisissant convenablement le rapport de transformation du transformateur T on peut faire osciller le potentiel de grille entre des tensions de l'ordre de -100 volts et $+100$ volts. Or, si vous examinez la caractéristique de la lampe, c'est-à-dire la courbe qui donne le courant filament-plaque

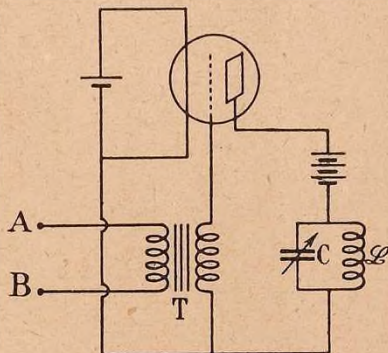


FIG. 13.

qui donne le courant filament-plaque I en fonction de la tension de grille u , vous voyez (fig. 14) que le courant-plaque devient nul pour des tensions de grille inférieures à 10 volts, il est au contraire

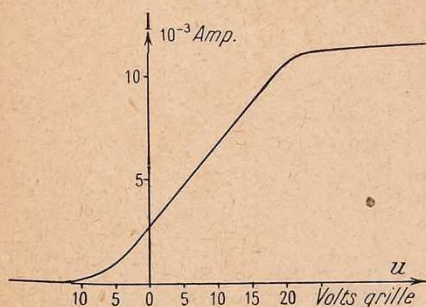


FIG. 14.

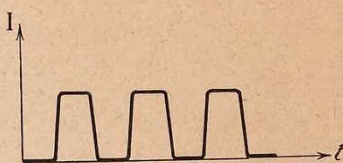


FIG. 15.

constant pour des valeurs de u supérieures à 20 volts. Il en résulte que le courant-plaque sera représenté en fonction du temps par une courbe analogue à celle de la figure 15. C'est bien ce que l'on constate d'ailleurs à l'oscillographe cathodique. Ce courant est riche en harmoniques. Il suffit alors d'accorder le circuit LC sur une fréquence pF , p étant un nombre entier pour que ce circuit émette la fréquence pF . Nous avons ainsi un multiplicateur de fréquences utilisé d'ailleurs parfois au lieu du montage de la figure 12.

Utilisons d'autre part un hétérodyne, c'est-à-dire un poste émetteur de très faible puissance accordé également sur pF et recevons les deux émissions avec un même poste récepteur. L'expérience montre que si l'hétérodyne est rigoureusement accordé sur pF le téléphone du récepteur rend un son qui est précisément celui du diapason. Si l'hétérodyne n'est pas rigoureusement accordé sur pF , mais sur une fréquence voisine $pF + \varepsilon$, on entend bien le son du diapason, mais celui-ci est haché et donne l'impression du son d'un sifflet à roulette, suivant l'expression de M. L. Brillouin. Il suffira d'agir sur la fréquence de l'hétérodyne pour entendre exactement le son du diapason. A ce moment l'hétérodyne est bien rigoureusement accordé sur pF .

L'explication du phénomène est simple. Notre récepteur n'est pas tellement sélectif qu'il ne puisse recevoir simultanément les harmoniques :

$$\dots (p-2)F \quad (p-1)F \quad F \quad (p+1)F \quad (p+2)F \dots$$

émis par $\mathcal{LC}$ lorsque p est suffisamment grand.

Or, nous avons vu que lorsqu'on reçoit simultanément deux ondes dans un récepteur, le téléphone est parcouru par des courants de fréquences égales à la différence des fréquences des deux ondes.

Nous recevons donc :

$$pF + \varepsilon - (p-1)F = F + \varepsilon \quad (p+1)F - (pF + \varepsilon) = F - \varepsilon$$

$$pF + \varepsilon - (p-2)F = 2F + \varepsilon \quad (p+2)F - (pF + \varepsilon) = 2F - \varepsilon$$

.....

Les oscillations de fréquence $F + \varepsilon$ et $F - \varepsilon$, interféreront pour donner des battements de fréquence 2ε et de même les oscillations de fréquences $2F + \varepsilon$ et $2F - \varepsilon$.

Cette fréquence pF peut être aisément repérée sur un contrôleur d'ondes. Cet appareil est constitué par un circuit oscillant comprenant une self fixe et une capacité variable.

Si on approche de l'hétérodyne la self du contrôleur, l'hétérodyne est désaccordé par suite de la réaction de circuits; les battements réapparaissent. La théorie montre et l'expérience vérifie que si le contrôleur est exactement accordé sur pF les battements disparaissent. Ainsi nous pourrions repérer exactement la position du curseur du condensateur variable du contrôleur pour laquelle ce dernier est rigoureusement accordé sur pF .

Comme il est facile de connaître la valeur de p nous pourrions étalonner notre contrôleur pour des fréquences 80.000, 81.000, 82.000, etc. si $p = 80$.

On peut même montrer qu'on peut repérer les fréquences 80.500, 81.500, etc. Je ne puis m'étendre sur ce sujet et vous renvoie aux ouvrages spéciaux pour la démonstration.

Utilisation du quartz.

Le quartz se comporte comme un véritable diapason pouvant produire les fréquences f_1 , f_2 et f_3 .

Si la fréquence la plus basse f_1 est dans la gamme des fréquences repérées sur le contrôleur, nous pourrions la mesurer exactement.

Or, si le quartz émet bien f_1 et f_1 seulement, l'oscillateur à quartz émet les harmoniques de f_1 , même de rang très élevé.

Si par conséquent $f_1 = 80.000$, nous pourrions repérer les fréquences :

$$2 \times 80.000, \quad 3 \times 80.000 \quad \dots \quad 30 \times 80.000, \quad \text{etc.}$$

Ce repérage se fait au moyen d'une méthode à laquelle nous avons donné le nom de « méthode des doubles battements ». Le matériel utilisé comprend :

- 1° le quartz Q;
- 2° un hétérodyne H;
- 3° un poste récepteur autodyne R;
- 4° le contrôleur ou ondemètre O.

Nous vous rappelons qu'un poste autodyne est un poste qui est susceptible, lorsqu'on agit sur ce que l'on désigne sous le nom de « réaction », d'engendrer des oscillations. Nous vous rappelons encore que lorsqu'un poste reçoit deux oscillations de fréquences f et f' , le téléphone rend un son de fréquence $f - f'$.

Nous allons examiner successivement trois cas que nous désignerons par A, B, et C.

A. — Le quartz ayant pour fréquence fondamentale f_1 , l'oscillateur à quartz émet la fréquence pf_1 .

Accordons l'hétérodyne H sur pf_1 . Au moment de l'accord exact, le téléphone du récepteur R, accordé également sur pf_1 , ne rend aucun son.

A vrai dire comme l'oreille n'est pas sensible aux sons de très basse fréquence et comme, d'autre part, le téléphone rend

mal ces sons, l'incertitude est assez grande. Si nous faisons varier la fréquence de H, nous entendons les sifflements bien connus d'hétérodyne, qui passent de l'aigu au grave, puis du grave à l'aigu; mais le silence persiste pour des variations relativement grandes de la fréquence de H.

Avec cette méthode, dite méthode hétérodyne, nous n'accordons pas avec précision H sur pf_1 et H émet $pF_1 + \varepsilon$, ε étant inconnu et compris entre zéro et vingt ou trente.

Lorsque le silence a été obtenu, accrochons les oscillations en R de façon que R émette $pf_1 + \varphi$, φ étant une fréquence audible, 435 par exemple. Dans ces conditions le téléphone devra rendre les sons de fréquences :

$$(pf_1 + \varphi) - pf_1 = \varphi$$

$$pf_1 + \varphi - (pf_1 + \varepsilon) = \varphi - \varepsilon$$

Les deux sons φ et $\varphi - \varepsilon$ donneront des battements de fréquence ε ; les battements disparaissent pour $\varepsilon = 0$. Il suffit donc d'agir sur le circuit de H de telle sorte que les battements disparaissent; lorsqu'il en est ainsi, nous pouvons être assurés que l'hétérodyne H est rigoureusement accordé sur pF_1 .

Approchons alors la self du contrôleur de l'hétérodyne; nous constatons que les battements réapparaissent. Agissons sur la capacité du contrôleur; nous nous apercevons que nous faisons varier la fréquence des battements et pouvons les faire disparaître. La théorie montre que si on s'est placé dans des conditions convenables, le contrôleur est rigoureusement accordé sur pF_1 au moment de la disparition des battements. Si on repère alors la position du curseur de la capacité du contrôleur, si on fait de même pour une fréquence $(p + 1)f_1$, $(p + 2)f_1$ puis pour la fréquence pf_2 , $(p + 1)f_2$ pf_3 , $(p + 1)f_3$, etc., f_1 , f_2 et f_3 désignant les fréquences propres du quartz, nous aurons étalonné notre contrôleur en fréquences.

B. — Nous pouvons encore repérer les fréquences :

$$\frac{f_1}{q} \text{ ou } \frac{f_2}{q} \text{ ou } \frac{f_3}{q},$$

q étant un nombre entier.

En effet, si nous accordons notre hétérodyne sur $\frac{f_1}{q}$, le q^e harmonique de l'hétérodyne sera égal à f_1 . Pour faire la mesure nous accorderons notre récepteur sur f_1 .

C. — Supposons maintenant l'hétérodyne accordé sur une fréquence f' telle que :

$$k_1 f' = k_2 f_1,$$

k_1 et k_2 étant des nombres entiers. Accordons le récepteur sur $k_2 f_1$; nous pourrions ainsi en approchant le contrôleur de l'hétérodyne repérer la fréquence f' . Comme :

$$f' = \frac{k_2}{k_1} f_1$$

nous voyons qu'en définitive, nous pouvons repérer toutes les fréquences données par l'expression $\frac{k_2}{k_1} f_1$. Opérant de même pour f_2 et f_3 , on voit que l'on pourra effectuer un nombre considérable de pointés.

Cellule électrique équivalente à un quartz piézo-électrique.

Fréquemment, dans l'enseignement de l'électricité élémentaire, le professeur s'efforce de faire comprendre les phénomènes en donnant de ceux-ci des analogies mécaniques ou hydrauliques. Parfois les phénomènes électrique et mécanique n'ont qu'une apparence lointaine, parfois au contraire elle peut se poursuivre pas à pas; ceci arrivera chaque fois que le phénomène électrique et le phénomène mécanique pourront être représentés par des équations de formes identiques. C'est ainsi que l'élongation d'un pendule libre, écarté de sa position d'équilibre, et la tension aux bornes d'un condensateur, dont le circuit est fermé par une self et une résistance, sont données par la même équation; dans ce cas la variable est le temps pour l'un et l'autre des phénomènes. Si donc nous avons étudié complètement la décharge du condensateur, nous aurons du fait même étudié le mouvement d'un pendule. De même l'étude de la propagation d'une onde plane dans un tuyau indéfini peut se ramener à l'étude de propagation d'un courant le long de la ligne indéfinie, etc.

Il est bien évident que si nous pouvions remplacer notre quartz piézo-électrique par un ensemble de selfs, de résistances et de capacités; nous serions ramenés à des calculs familiers aux électriciens.

Or, Butterworth a démontré que chaque fois qu'un circuit électrique était couplé à un ensemble mécanique susceptible de vibrer, cet ensemble mécanique pouvait effectivement être remplacé par un certain circuit électrique équivalent.

IMPÉDANCE, CIRCUITS RÉSONNANT ET ANTIRÉSONNANT.

Lorsqu'aux bornes d'un circuit électrique on applique une tension alternative E , le circuit est parcouru par un courant alternatif I de même période que E . I est donné en fonction de E par la relation :

$$E = ZI$$

Z est l'impédance. La formule est tout à fait analogue à celle bien connue du courant continu :

$$E = RI$$

formule dans laquelle R désigne la résistance. Mais alors qu'en courant continu R est une constante, Z en courant alternatif varie avec la fréquence f du courant, ou si on veut avec sa pulsation ω , ω étant égal à $2\pi f$.

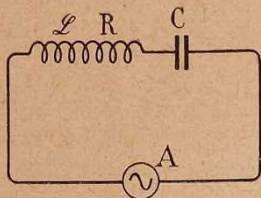


FIG. 16.

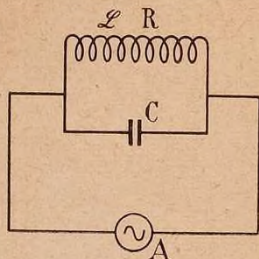


FIG. 17.

Deux circuits jouent un rôle primordial en électricité.

Le circuit de la figure 16 comporte une self $\mathcal{L}$ de résistance R , une capacité C et une source de courant alternatif A ; le tout est monté en série; le circuit $\mathcal{L}RC$ est un circuit résonnant.

Le circuit de la figure 17 dans lequel la capacité C est montée en parallèle aux bornes de la self $\mathcal{L}$ est un circuit anti-résonnant.

Si nous désignons par Z_0 la valeur numérique de l'impédance du circuit résonnant (ce que d'une façon précise on désigne sous le nom de module) par Z' le module de l'impédance du circuit antirésonnant ayant même self et même capacité; Z_0 et Z' sont représentés en fonction de ω par les courbes de la figure 18.

Si I_0 et I'_0 désignent les courants, ceux-ci sont représentés en fonction de ω par les mêmes courbes. (Voir *Onde Electrique*, avril 1930, p. 178.)

I'_0 (ou Z_0) présentent un minimum pour une certaine valeur de ω pour laquelle I_0 (ou Z'_0) passent par un maximum. Cette valeur de ω est égale à $\frac{1}{\sqrt{LC}}$. Pour cette valeur on dit que les circuits sont en résonance.

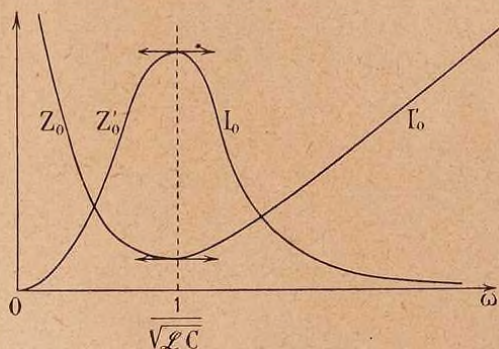


FIG. 18.

Si on négligeait la résistance des circuits, le maximum de I_0 serait infini, le minimum de I'_0 serait nul; d'où le nom de « circuit bouchon » donné au circuit antirésonnant. Au moment de la résonance, le courant débité par A (fig. 16) est nul, ce qui n'empêche pas d'ailleurs le circuit LC d'être à ce moment parcouru par un courant intense.

CELLULE ÉQUIVALENTE AU QUARTZ.

Nous avons remarqué précédemment que la quantité d'électricité débitée par une pile connectée aux bornes d'un quartz était non pas :

$$q = k_1 v,$$

k_1 désignant la capacité du condensateur, mais bien :

$$q = k_1 v + q_1,$$

ce supplément q_1 étant dû au phénomène piézo-électrique.

Nous pouvons donc représenter notre quartz par une capacité k_1 , aux bornes de laquelle nous branchons un circuit absorbant q_1 . Or, q_1 est une fonction de ω et cette fonction doit être maxima lorsque la pulsation excitatrice ω est égale à la

pulsation propre du quartz. Nous sommes donc tout naturellement amenés à constituer par un circuit résonnant accordé sur la fréquence propre du quartz, le circuit en dérivation aux bornes de k_1 et finalement notre quartz est représenté électriquement par la cellule de la figure 19 (traits pleins); N, S, et k désignent une self, une résistance et une capacité.

CREVASSE DE LA COURBE DE RÉSONANCE DU QUARTZ.

Considérons un circuit de self $\mathcal{L}$ et de capacité C; couplons à la bobine $\mathcal{L}$ une bobine l parcourue par un courant de pulsation ω comprise entre zéro et l'infini; mesurons le courant I_0 .

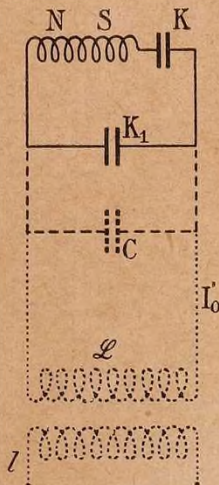


FIG. 19.

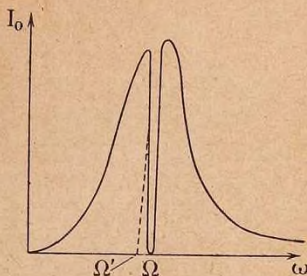


FIG. 20.

pour chaque valeur de ω et construisons la courbe obtenue en portant ω en abscisses et I_0 en ordonnées (le quartz étant supprimé). On obtient la courbe de la figure 18.

Si maintenant nous plaçons notre quartz aux bornes de C et si nous recommençons l'expérience nous obtenons la courbe de la figure 20. Suivant l'expression de Cady elle présente une étroite et profonde crevasse.

La figure 19 va nous permettre de comprendre immédiatement pourquoi il en est ainsi.

Faisons abstraction de la bobine $\mathcal{L}$ et considérons le circuit constitué par Nk_1 et C. Ce circuit comprend une self N et, en série, un condensateur k puis l'ensemble de deux condensateurs k_1 et C en parallèle.

Un théorème élémentaire d'électrostatique nous apprend que la capacité X équivalente est donnée par la relation :

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{k} + \frac{1}{k_1 + C} = \frac{k + k_1 + C}{k(k_1 + C)}.$$

L'ensemble N et X constitue un circuit antirésonnant dont la pulsation Ω de résonance est donnée par :

$$NX\Omega^2 = 1$$

$$\Omega = \frac{1}{\sqrt{NX}} = \frac{1}{Nk} \sqrt{\frac{k + k_1 + C}{k_1 + C}}.$$

Pour cette valeur Ω de ω , I_0 est nul, car peu important les points d'attaque du circuit antirésonnant, celui-ci résonne évidemment quelle que soit la façon de l'attaquer par une pulsation Ω .

Cette valeur Ω est différente de la pulsation Ω' du quartz; en effet, celle-ci est donnée par :

$$Nk\Omega'^2 = 1$$

$$\Omega' = \frac{1}{Nk}$$

On a donc :

$$\Omega = \Omega' \sqrt{\frac{k + k_1 + C}{k_1 + C}}.$$

Des mesures précises montrent que k et k_1 sont extrêmement petits, il en résulte que Ω est très voisin de Ω' mais plus faible. La construction de la crevasse permet donc pratiquement la détermination de Ω' .

Si la bobine $\mathcal{L}$ était ouverte, le courant I_0 serait évidemment nul, puisqu'aucune capacité ne permettrait le passage du courant. On est alors amené à dire que le quartz est équivalent à une certaine capacité qui pour la valeur Ω de ω est égale à $-C$.

Pour $\omega = \Omega'$, le circuit NSk étant en résonance, constitue un véritable court-circuit pour les condensateurs C et k_1 et la bobine $\mathcal{L}$; tout se passe comme si le quartz avait une capacité très grande, laquelle doit rapidement devenir négative puisque pour Ω (voisin de Ω') elle est égale à $-C$.

Pour $\omega = 0$, le quartz est équivalent à un condensateur comportant k et k_1 en parallèle, il a donc une capacité $k + k_1$.

Enfin pour $\omega = \infty$, la self N oppose un obstacle infranchissable au courant, le quartz se comporte alors comme une capacité k_1 .

En définitive, et c'est là un des modes de représentation qui ont été fréquemment donnés, on peut remplacer la cellule équivalente par une simple capacité k_0 qui serait fonction de ω et représentée en fonction de ω par la courbe de la figure 21.

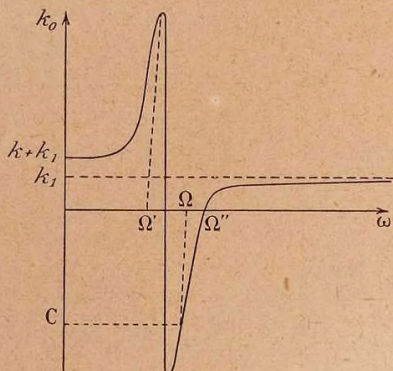


FIG. 21.

Nous voyons encore que nécessairement, pour une valeur Ω'' de ω , la capacité k_0 est nulle; c'est dire que le courant ne peut passer dans le quartz; c'est dire encore que la cellule Nk_1 , constitue un circuit bouchon. Comme la self est N et que la capacité est constituée par deux condensateurs k et k_1 en série, de valeur globale X' telle que :

$$\frac{1}{X'} = \frac{1}{k} + \frac{1}{k_1} = \frac{k + k_1}{kk_1}$$

la pulsation Ω'' est donnée par :

$$NK \frac{k_1}{k_1 + k_1} \Omega''^2 = 1$$

ou :

$$\Omega'' = \frac{1}{\sqrt{Nk}} \sqrt{\frac{k + k_1}{k_1}}$$

Il y a bien une autre valeur de ω , comprise entre Ω' et Ω'' pour laquelle la capacité est nulle; nous ne pourrions évidemment la calculer qu'en tenant compte de la résistance S, ce qui nous mènerait aux calculs compliqués effectués par Dye.

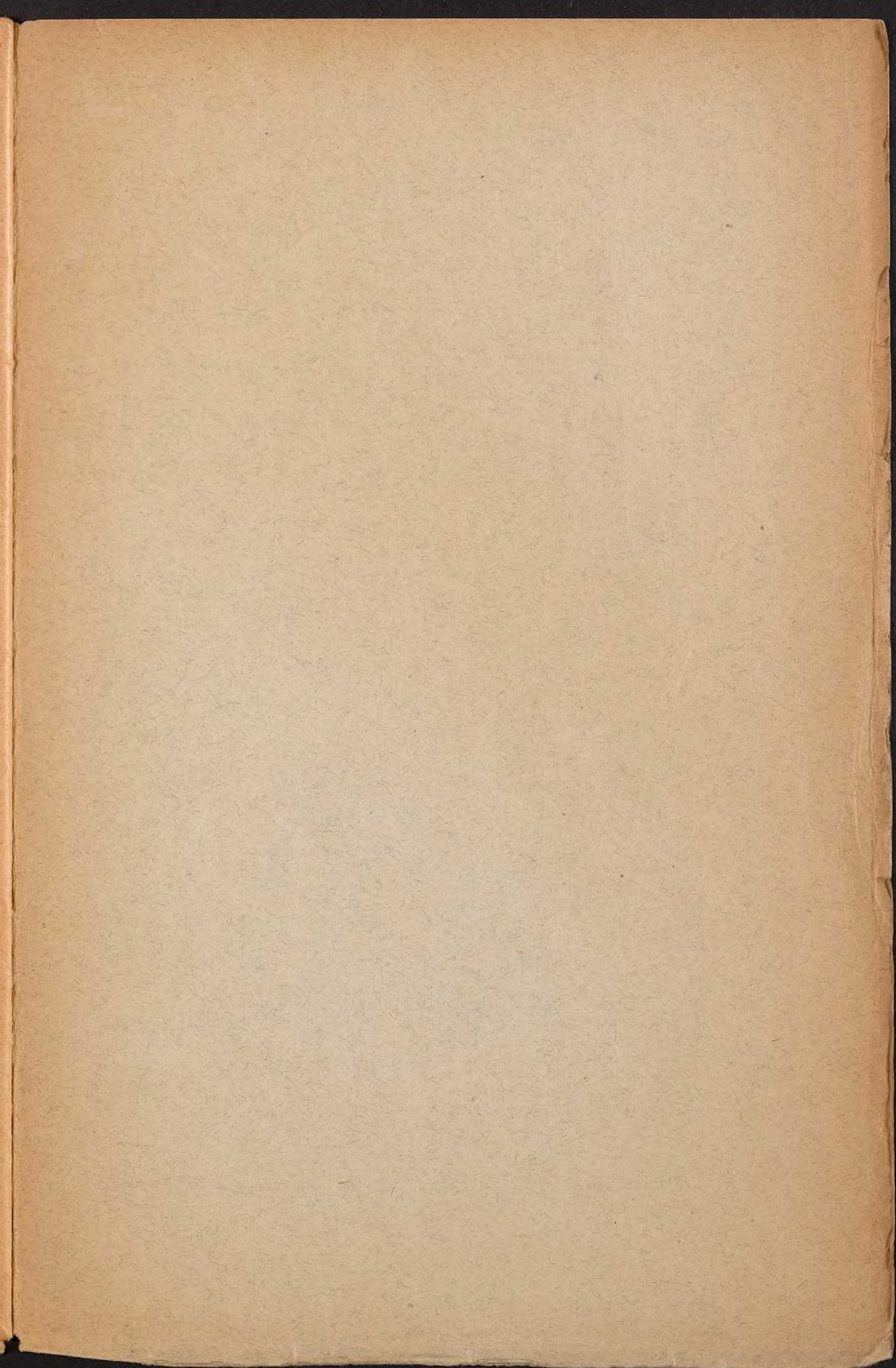
C'est précisément en tenant compte de S que ce même savant a pu calculer l'amortissement du quartz.

Nous nous sommes efforcé, dans cette brève causerie, de vous donner des notions précises sur les phénomènes de piézo-électricité et leurs applications à la T. S. F.

Nous nous sommes efforcé également, sans effectuer les calculs d'impédance, toujours un peu longs, de vous montrer les propriétés de la cellule équivalente. Pour plus de détails nous vous renvoyons au fascicule VI du *Mémorial des Sciences physiques* (Gauthier-Villars, éditeur). Dans ce fascicule nous avons étudié le quartz avec beaucoup plus de détails que nous n'avons pu le faire ici; vous trouverez encore dans ce fascicule une importante bibliographie.

En terminant, je tiens à remercier très vivement la Direction des Etablissements Ducretet d'avoir bien voulu mettre à ma disposition son beau matériel; je remercie M. de Mare, ingénieur en chef, MM. Pan et Bick, ingénieurs aux Etablissements Ducretet, de l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée dans le montage des expériences.





LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET C^{ie}

6, RUE DE LA SORBONNE, PARIS (5^e).

PUBLICATIONS ANTÉRIEURES :

**CONFÉRENCES D'ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES
FAITES AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS
ET MÉTIERS**

En 1929, par MM.

BROGLIE (DE) (Prix Nobel de physique, 1929). — La crise récente de l'optique ondulatoire.

FOEX (G.). — Les substances mésomorphes, leurs propriétés magnétiques.

BLOCH (EUGÈNE). — Les atomes de lumière et les quanta.

DUNOYER (L.). — La cellule photo-électrique et ses applications.

RIBAUD (G.). — Le rayonnement des corps incandescents. Températures apparentes de brillance, de radiation et de couleur. Mesure, optique des températures.

JULLIEN (LIEUTENANT-COLONEL). — Applications du courant électrique, des oscillations radio-électriques et des phénomènes photo-électriques à la réalisation d'instruments de musique.

BLOCH (LÉON). — Les hautes pressions de vapeur.

MESNY (R.). — Les ondes dirigées et leurs applications.

Préface de M. J. LEMOINE.

Un volume in-8° raisin, 270 pages, nombreuses figures. Prix 35 francs.

En 1930, par MM.

GUTTON. — Les ondes électriques de très courtes longueurs et leurs applications 4 francs.

BALDET, astronome à l'Observatoire à Paris. — La constitution des comètes 5 »

RIBAUD, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Strasbourg. — Température des flammes et des gaz incandescents. 5 »

CABANNES, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Montpellier. — Les récents progrès réalisés dans l'étude de la diffusion moléculaire de la lumière. L'anisotropie des molécules. L'effet Raman..... 8 »

DAVID, ingénieur au Laboratoire national de radioélectricité. — Les rapports de l'acoustique et de l'électricité..... 5 »

BRILLOUIN (Léon), professeur à l'Institut Henri Poincaré. — Les nouvelles statistiques quantiques. Les électrons dans les métaux..... 5 »

DARMOIS, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Nancy. — La structure et les mouvements de l'univers stellaire..... 3 »

FLEURY, professeur à la Faculté des sciences de Lille. — Les couleurs (étude physique). La colorimétrie, ses applications. . 5 »

Catalogue sur demande.