

## 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 ([www.eclydre.fr](http://www.eclydre.fr)).

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 BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Auteur(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 193.-195.
Nombre de volumes	125
Cote	CNAM-BIB P 1329-B et P 1329-C
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Note	La collection comporte des lacunes : n°24; n°58; n°63; n°67; n°76-n°77
Notice complète	<a href="https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&amp;RELTYPE=NT">https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&amp;RELTYPE=NT</a>
Permalien	<a href="https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C">https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C</a>
LISTE DES VOLUMES	
	<a href="#">N°25 (1936)</a>
	<a href="#">N°26 (1937)</a>
	<a href="#">N°27 (1937)</a>
	<a href="#">N°28 (1937)</a>
	<a href="#">N°29 (1938)</a>
	<a href="#">N°30 (1939)</a>
	<a href="#">N°31 (1936)</a>
	<a href="#">N°32 (1938)</a>
	<a href="#">N°33 (1938)</a>
	<a href="#">N°34 (1938)</a>
	<a href="#">N°35 (1938)</a>
	<a href="#">N°36 (1938)</a>
	<a href="#">N°37 (1938)</a>
	<a href="#">N°38 ( 1938)</a>
	<a href="#">N°39 (1938)</a>
	<a href="#">N°40 (1939)</a>
	<a href="#">N°41 (1939)</a>
	<a href="#">N°42 (1939)</a>
	<a href="#">N°43 (1939)</a>
	<a href="#">N°44 (1939)</a>
	<a href="#">N°45 (1938)</a>
	<a href="#">N°46 (1940)</a>
	<a href="#">N°47 (1940)</a>
	<a href="#">N°48 (1940)</a>
	<a href="#">N°49 (1940)</a>
	<a href="#">N°50 (1940)</a>
	<a href="#">N°51 (1941)</a>
	<a href="#">N°52 (1941)</a>
	<a href="#">N°53 (1941)</a>
	<a href="#">N°54 (1941)</a>
	<a href="#">N°55 (1942)</a>
	<a href="#">N°56 (1942)</a>
	<a href="#">N°57 (1942)</a>
	<a href="#">N°59 (1942)</a>

	<a href="#">N°60 (1941)</a>
	<a href="#">N°61 (1942)</a>
	<a href="#">N°62 (1943)</a>
	<a href="#">N°64 (1943)</a>
	<a href="#">N°65 (1943)</a>
	<a href="#">N°66 (1943)</a>
	<a href="#">N°68 (1943)</a>
	<a href="#">N°69 (1943)</a>
	<a href="#">N°70 (1943)</a>
	<a href="#">N°71 (1943)</a>
	<a href="#">N°72 (1944)</a>
	<a href="#">N°73 (1943)</a>
	<a href="#">N°74 (1944)</a>
	<a href="#">N°75 (1944)</a>
	<a href="#">N°78 (1944)</a>
	<a href="#">N°79 (1944)</a>
	<a href="#">N°80 (1944)</a>
	<a href="#">N°81 (1944)</a>
	<a href="#">N°82 (1944)</a>
	<a href="#">N°83 (1944)</a>
	<a href="#">N°84 (1944)</a>
	<a href="#">N°85 (1944)</a>
	<a href="#">N°86 (1945)</a>
	<a href="#">N°87 (1945)</a>
	<a href="#">N°88 (1945)</a>
	<a href="#">N°89 (1945)</a>
	<a href="#">N°90 (1945)</a>
	<a href="#">N°91 (1945)</a>
	<a href="#">N°92 (1945)</a>
	<a href="#">N°93 (1945)</a>
	<a href="#">N°94 (1945)</a>
	<a href="#">N°95 (1946)</a>
	<a href="#">N°96 (1946)</a>
	<a href="#">N°97 (1946)</a>
	<a href="#">N°98 (1944)</a>
	<a href="#">N°99 (1945)</a>
	<a href="#">N°100 (1945)</a>
	<a href="#">N°101 (1946)</a>
	<a href="#">N°102 (1946)</a>
	<a href="#">N°103 (1946)</a>
	<a href="#">N°104 (1946)</a>
	<a href="#">N°105 (1946)</a>
	<a href="#">N°106 (1946)</a>
	<a href="#">N°107 (1947)</a>
	<a href="#">N°108 (1947)</a>
	<a href="#">N°109 (1947)</a>
	<a href="#">N°110 et 111 (1947)</a>
	<a href="#">N° 112 (1947)</a>
	<a href="#">N° 113 (1947)</a>
	<a href="#">N° 114 (1947)</a>
	<a href="#">N° 115 (1947)</a>
	<a href="#">N° 116 (1947)</a>
	<a href="#">N° 117 (1947)</a>
	<a href="#">N° 118 (1948)</a>
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	<a href="#">N° 119 (1948)</a>
	<a href="#">N° 120 (1948)</a>
	<a href="#">N° 121 (1948)</a>
	<a href="#">N° 122 (1947)</a>

	<a href="#">N° 123 (1948)</a>
	<a href="#">N° 124 (1948)</a>
	<a href="#">N° 125 (1948)</a>
	<a href="#">N° 126 (1948)</a>
	<a href="#">N° 127 (1948)</a>
	<a href="#">N° 128 (1948)</a>
	<a href="#">N° 129 (1948)</a>
	<a href="#">N° 130 (1949)</a>
	<a href="#">N° 131 (1949)</a>
	<a href="#">N° 132 (1949)</a>
	<a href="#">N° 133 (1948)</a>
	<a href="#">N° 134 (1949)</a>
	<a href="#">N° 135 (1948)</a>
	<a href="#">N° 136 (1949)</a>
	<a href="#">N° 137 (1950)</a>
	<a href="#">N° 138 (1950)</a>
	<a href="#">N° 139 (1950)</a>
	<a href="#">N° 140 (1950)</a>
	<a href="#">N° 141 (1950)</a>
	<a href="#">N° 142 (1948)</a>
	<a href="#">N° 143 (1950)</a>
	<a href="#">N° 144 (1950)</a>
	<a href="#">N° 145 (1951)</a>
	<a href="#">N° 146 (1951)</a>
	<a href="#">N° 147 (1951)</a>
	<a href="#">N° 148 (1951)</a>
	<a href="#">N° 149 (1951)</a>
	<a href="#">N° 150 (1951)</a>
	<a href="#">N° 151 (1951)</a>
	<a href="#">N° 152 (1951)</a>
	<a href="#">N° 153 (1952)</a>
	<a href="#">N° 154 (1952)</a>
	<a href="#">N° 155 (1952)</a>

<b>NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ</b>	
Auteur(s) volume	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Volume	<a href="#">N° 119 (1948)</a>
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1948
Collation	1 vol. (p. [285-292]) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	12
Cote	CNAM-BIB P 1329-C (27)
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Revue
Langue	Anglais Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	07/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	<a href="https://www.sudoc.fr/039014541">https://www.sudoc.fr/039014541</a>
Permalien	<a href="https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-C.27">https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-C.27</a>

...



8° Ru 107

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
LABORATOIRE D'ESSAIS



BULLETIN  
DU  
LABORATOIRE D'ESSAIS  
1948 - N° 28

---

PUBLICATION N° 119  
*(Voir le sommaire au verso)*

---



## SOMMAIRE

---

R. CABARAT — Contribution à la détermination des constantes  
élastiques des matériaux par un procédé acoustique . . .  
(à suivre)



# BULLETIN DU LABORATOIRE D'ESSAIS

DU CONSERVATOIRE NATIONAL  
DES ARTS & MÉTIERS

## CONTRIBUTION A LA DÉTERMINATION DES CONSTANTES ÉLASTIQUES DES MATERIAUX PAR UN PROCÉDÉ ACOUSTIQUE. (Suite)

### CHAPITRE II (Suite et fin)

#### VIBRATION DE TORSION

Considérons donc une éprouvette encastrée de longueur  $L$ , une tranche d'épaisseur  $\delta z$ , normale à l'axe (fig. 7). Le moment de l'effort nécessaire pour obtenir une rotation relative  $\delta\Theta$  des deux faces limitant cette tranche est :

$$C = \frac{\mu\pi R^4}{2} \cdot \frac{\delta\Theta}{\delta z} \quad \dots (1)$$

$\mu$  étant le module de rigidité de l'éprouvette et  $R$  le rayon de celle-ci.

#### ÉTUDE DES OSCILLATIONS DE TORSION.

On ne tiendra pas compte dans cette étude du frottement interne. Appliquons à la tranche ci-dessus le théorème du moment cinétique; on a :

$$I \frac{\delta^2\Theta}{\delta t^2} = \text{moment des forces agissant sur la tranche.}$$

Le second membre est la somme du couple exercé sur la face supérieure :  $C(z + dz)$  et celui exercé sur la face inférieure  $-C(z)$ .  
d'où :

$$I \frac{\delta^2\Theta}{\delta t^2} = \frac{\delta C}{\delta z} dz = \frac{\mu\pi R^4}{2} \cdot \frac{\delta^2\Theta}{\delta z^2} dz \dots (2)$$

$\Delta$  étant la densité de l'éprouvette, on a :

$$I = \frac{\Delta\pi R^4}{2} dz$$

d'où :

$$\Delta \frac{\delta^2\Theta}{\delta t^2} = \mu \frac{\delta^2\Theta}{\delta z^2}.$$

On sait que cette équation différentielle caractérise une vibration se propageant avec la vitesse :

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{\Delta}}.$$

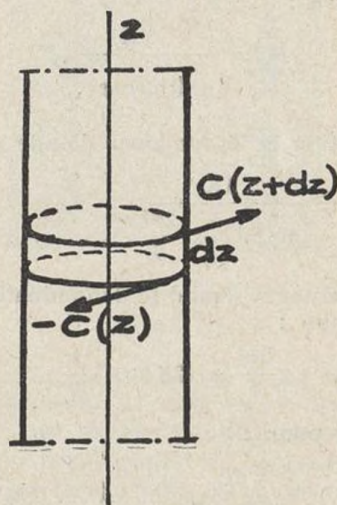


Fig. 7.

La solution la plus générale de pulsation  $\omega$  correspond donc à la superposition de deux ondes de sens inverse :



$$\Theta = \Theta_0 \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{v} \right) - \varphi_0 \right] + \Theta_1 \cos \left[ \omega \left( t + \frac{z}{v} \right) - \varphi_1 \right] \dots \dots \dots (4)$$

Nous supposons dans la suite que la barre est encastrée pour  $z = 0$  et qu'à son extrémité libre ( $z = l$ ) elle est soumise au couple.

$$C(l) = K \sin \omega t \dots \dots \dots (5)$$

K étant indépendant de la fréquence.

En tenant compte de ces conditions aux limites dans (4) il vient pour  $z = 0$  :

$$\Theta_0 \cos(\omega t - \varphi_0) + \Theta_1 \cos(\omega t - \varphi_1) = 0 \dots \dots (6)$$

qui doit être vérifié quelque soit  $t$ , d'où :

$$(7) \dots \dots \begin{cases} \Theta_0 \cos \varphi_0 + \Theta_1 \cos \varphi_1 = 0 \\ \Theta_0 \sin \varphi_0 + \Theta_1 \sin \varphi_1 = 0 \end{cases}$$

d'où :

$$\varphi_0 = K\pi$$

qui exige :

$$\varphi_0 = \varphi_1 ; \quad \Theta_0 = -\Theta_1 \dots \dots \dots (8)$$

ou :

$$\varphi_0 = \varphi_1 + K\pi ; \quad \Theta_0 = +\Theta_1 \dots \dots \dots (9)$$

Il est facile de voir que les conditions (8) et (9) donnent à (4) la même expression, que nous écrirons par exemple :

$$\Theta = 2\Theta_0 \sin \frac{\omega z}{v} \sin(\omega t - \varphi) \dots \dots \dots (10)$$

pour  $z = l$  :

$$K \sin \omega t = \frac{\mu \pi R^4 \Theta_0 \omega}{v} \cos \frac{\omega l}{v} \sin(\omega t - \varphi) \dots \dots \dots (11)$$

d'où l'on tire :  $\varphi = 0$ ,

$$\Theta_0 = \frac{VK}{\mu \pi R^4 \omega \cos \frac{\omega l}{v}}$$

ou en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$2\Theta_0 = \frac{\lambda K}{\pi^2 \mu R^4 \cos \frac{2\pi l}{\lambda}} \dots \dots \dots (12)$$

Il y a résonance quand le dénominateur est nul, ce qui donne :

$$\frac{2\pi l}{\lambda} = (2K + 1) \frac{\pi}{2}$$

c'est-à-dire pour :

$$\lambda = \frac{4l}{2K + 1} \dots \dots \dots (13)$$

L'amplitude est infinie parce que nous avons négligé les amortissements.

#### PALETTE EXCITATRICE.

Dans le chapitre précédent, nous avons indiqué un moyen commode pour produire des oscillations de torsion à l'aide d'une palette disposée

aux extrémités de la barre. Nous allons étudier l'influence de celle-ci sur la fréquence propre de l'éprouvette étudiée.

En présence d'une palette, le couple agissant sur l'extrémité de la barre est celui qui est exercé par la palette. Nous continuerons à l'appeler  $K \sin \omega t$ , tandis que le couple exercé par le milieu extérieur sur la palette sera  $K' \sin(\omega t - \eta)$ . Mais c'est  $K'$  que nous supposerons constant, tandis que  $K$  sera sans doute fonction de la fréquence.

Ecrivons l'équation du mouvement de la palette, dont le moment est  $I_1$ .

Elle est soumise de la part de la barre au couple  $-K \sin \omega t$ , et de la part de l'excitation au couple  $K' \sin(\omega t - \eta)$ ; son mouvement est donné par :

$$I_1 \left( \frac{d^2 \Theta}{dt^2} \right)_{z=l} = K' \sin(\omega t - \eta) - K \sin \omega t \dots \dots (14)$$

mais on a :

$$\Theta = 2\Theta_0 \sin \frac{2\pi^2}{\lambda_1} \sin \omega t \dots \dots \dots (15)$$

et :

$$\left( \frac{d^2 \Theta}{dt^2} \right)_{z=l} = 2\Theta_0 \sin \frac{2\pi l}{\lambda} \sin \omega t \dots \dots \dots (16)$$

d'où :

$$\begin{aligned} -2I_1 \Theta_0 \omega^2 \sin \frac{2\pi l}{\lambda_1} \sin \omega t &= K' \sin(\omega t - \eta) \\ &- K \sin \omega t \dots \dots \dots (17) \end{aligned}$$

Pour  $\eta = 0$ , il vient :

$$-2I_1 A_0 \omega^2 \sin \frac{2\pi l}{\lambda_1} = K' - K \dots \dots \dots (18)$$

Nous cherchons à avoir la relation liant  $2\Theta_0$  et  $K'$  indépendamment de  $K$ . Eliminons celui-ci entre (12 et 18),

il vient :

$$2\Theta_0 = \frac{K'}{\frac{\pi^2 \mu R^4}{\lambda_1} \cos \frac{2\pi l}{\lambda_1} - I_1 \omega^2 \sin \frac{2\pi l}{\lambda_1}} \dots \dots (19)$$

Il y a résonance pour :

$$\cotg \frac{2\pi l}{\lambda_1} = \frac{\lambda_1 I_1 \omega^2}{\pi^2 \mu R^4} \dots \dots \dots (20)$$

Soit  $I_0$  le moment d'inertie de la barre autour de son axe,

$$I_0 = \frac{\pi \Delta R^4}{2} \dots \dots (21)$$

d'où :

$$\cotg \frac{2\pi l}{\lambda_1} = 2\pi \frac{I_1}{I_0} \cdot \frac{l}{\lambda_1} \dots \dots (22)$$

En pratique,  $I_1/I_0$  est infiniment petit. Par exemple, pour des éprouvettes étudiées en laiton de 10 mm de diamètre, on a :

$$R = 0,5 \text{ cm}, \quad \Delta = \text{env. } 8,5, \quad l = 12 \text{ cm},$$

$$I_0 \cong 10 \text{ unités C.G.S.}$$

Dans nos mesures, la barre est excitée par une palette rectangulaire en laiton, longueur 2 cm, hauteur 0,6 cm et épaisseur 0,03 cm pour laquelle :



d'où :  $I_1 \cong 0,20 \text{ C.G.S.}$

$$\frac{I_1}{I_0} \cong 2 \cdot 10^{-2}.$$

Si  $l$  est du même ordre que  $\lambda_1$ , on peut écrire (22) ainsi :

$$K\pi + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi l}{\lambda_1} = 2\pi \frac{I_1}{I_0} \cdot \frac{l}{\lambda_1} \dots \dots \dots (23)$$

d'où :

$$\lambda_1 = \frac{4l}{2K + 1} \left( \frac{I_1}{I_0} + 1 \right) \dots \dots (24)$$

avec (13), on a :

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{1}{\left( \frac{I_1}{I_0} + 1 \right)} = \frac{I_0}{I_1 + I_0} = \frac{F_1}{F}.$$

Nous avons, pour la fréquence vraie, calculée :

$$F = \frac{I_1 + I_0}{I_0} \cdot F_1 = 1,02 F_1$$

$F_1$  étant la fréquence lue sur le cadran de l'oscillateur quand l'amplitude des oscillations de torsion passe par un maximum.

### CHAPITRE III

#### DESCRIPTION DES APPAREILS UTILISÉS

Nous décrirons successivement :

1° Le dispositif mécanique supportant la barre et les électrodes;

2° La chaîne d'amplificateurs permettant l'auto-entretien des vibrations longitudinales dans l'éprouvette;

3° Le démultiplicateur de fréquence utilisé pour la mesure de la fréquence propre de l'éprouvette et la détermination de la courbe de résonance;

4° Le montage électrique de l'amplificateur permettant d'enregistrer à l'oscillographe la courbe d'extinction des vibrations;

5° Le générateur basse fréquence.

#### 1° Le dispositif mécanique.

L'éprouvette E est fixée en son milieu par trois vis d'acier trempé terminées en pointe, dont les axes sont décalés de  $120^\circ$  dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette. Ces vis sont fixées sur une rondelle épaisse R en laiton, fendue suivant une génératrice, pour assurer une certaine élasticité pendant le serrage des pointes sur l'éprouvette (fig. 8). Ce mode de fixation permet de disposer l'éprouvette à l'intérieur d'un tube cylindrique en bronze, entre les deux électrodes A et B. La rondelle R repose sur la partie S du tube et est rendue immobile par la pièce P qui se visse sur le tube principal.

L'éprouvette se trouve donc disposée suivant l'axe du tube principal et cet ensemble la met à l'abri de toutes perturbations électriques extérieures. L'électrode A est vissée sur la partie supérieure de la pièce P, tandis que l'électrode B est vissée sur la partie inférieure du tube principal.

Ce dispositif assure cette condition importante : les axes des électrodes A et B sont toujours confondus avec l'axe de l'éprouvette.

L'électrode A est soigneusement isolée de son support par un canon et une rondelle en stéatite moulée; cet isolant résiste très bien aux températures que nous aurons à considérer. Le support de cette électrode est également en laiton.

Il est fileté extérieurement et percé d'un trou permettant le passage du canon de stéatite. Ce support, comportant une embase molletée, se visse à l'intérieur de la pièce P; le filetage, dont le pas est de 0,5, mm permet un réglage commode et précis de la distance entre l'électrode A et l'extrémité supérieure de l'éprouvette.

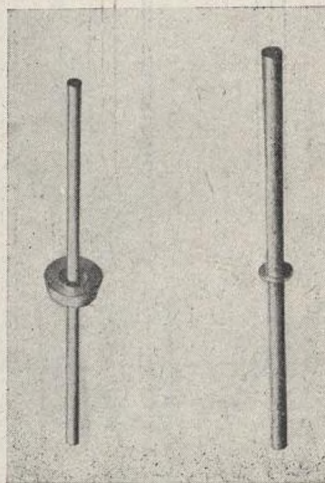


Fig. 9. — Modes de fixation des éprouvettes utilisées.

La réalisation de l'électrode B est identique à celle de l'électrode A; sauf que le diamètre de son support est légèrement plus grand.

Pour éviter la possibilité de courts-circuits accidentels entre l'éprouvette et les électrodes A et B, on a disposé sur celles-ci une mince feuille de mica, maintenue par un écrou spécial qui facilite le remplacement de celle-ci.

Nous rappelons que l'électrode A reçoit la tension alternative basse fréquence et exerce une attraction électrostatique périodique sur l'éprouvette, produisant dans celle-ci des vibrations longitudinales. L'électrode B sert de microphone électrostatique, les variations de tension micro-



phonique étant produites par le déplacement de l'extrémité inférieure de l'éprouvette.

Toutes les pièces mécaniques de ce dispositif

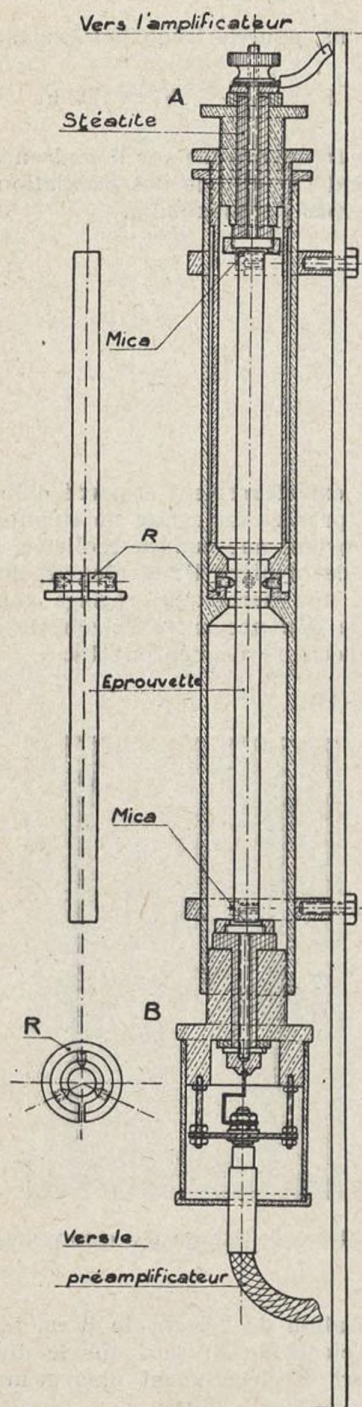


Fig. 8.

ont été construites en laiton pour nous permettre de faire des mesures du module d'élasticité en fonction de l'aimantation.

L'ensemble est fixé verticalement sur une platine en tôle, derrière laquelle sont disposés les amplificateurs et les cellules d'alimentation (fig. 10).

Pour ne pas nuire à la sensibilité de l'appar-

reil nous avons dû prendre certaines précautions dans le câblage. La capacité du microphone électrostatique constitué par l'extrémité de l'éprouvette et l'électrode B étant très faible (quelques  $\mu f$ ), nous avons été obligés de rendre la connexion entre la grille et l'électrode du microphone aussi courte que possible et de la blinder soigneusement. Comme l'indique la figure 8, ce blindage a été réalisé de telle sorte qu'il ne peut gêner le réglage de l'électrode B.

Cette disposition des différentes parties de ce montage remplit bien les conditions de principe décrites dans le chapitre I : l'éprouvette est au potentiel du sol et parfaitement blindée.

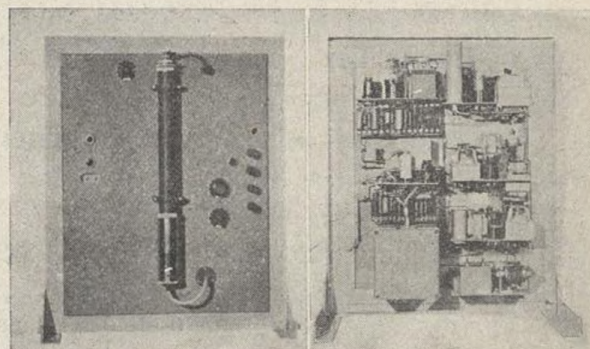


Fig. 10 et 11. — Aspects de l'oscillateur mécanique constitué par l'éprouvette (à gauche) et du rack d'amplificateurs (à droite).

Le montage électrique du microphone et de la chaîne d'amplificateurs que nous avons utilisé est représenté par la figure 12. L'interrupteur I, placé entre les bornes  $B_2$  et  $B_3$ , permet dans la position de fermeture l'auto-excitation de l'éprouvette E et, dans la position d'ouverture, l'excitation de celle-ci en oscillations forcées.

## 2° Amplificateurs.

L'étage préamplificateur comporte trois lampes triodes antimicrophoniques, à faible pente, du type 864, reliées entre elles par résistance et capacité. Elles sont disposées dans un blindage épais en duralumin coulé. Le gain de ce préamplificateur est faible, mais par contre le bruit de fond est réduit au minimum. Le transformateur de sortie du préamplificateur est branché aux bornes d'un amplificateur comportant une 6J7 reliée par résistance et capacité à une 6C5 dont la plaque est en série avec le primaire d'un transformateur-déphaseur. Ce système déphaseur est nécessaire pour rattraper les déphasages successifs produits dans chaque étage amplificateur quand le dispositif est auto-entretenu. L'amplificateur et le préamplificateur sont alimentés par la même cellule redresseuse dont la tension a été soigneusement filtrée.

Nous avons relevé la courbe de réponse de l'ensemble préamplificateur et amplificateur en injectant aux bornes du microphone une tension d'amplitude réglable par l'intermédiaire d'un système potentiométrique (microvolter R.C.A.-Général Radio) alimenté par un oscil-



lateur. La courbe (fig. 13), tension de sortie en fonction de la tension d'entrée, a été relevée à la fréquence de 9 000 p.p.s.; cette fréquence correspondant approximativement à la fréquence

à la tension de crête. Dans notre montage, cette tension continue est fournie par une valve du type 80. La tension redressée est filtrée par une résistance de 50 000  $\omega$  et une capacité de 0,1  $\mu f$ .

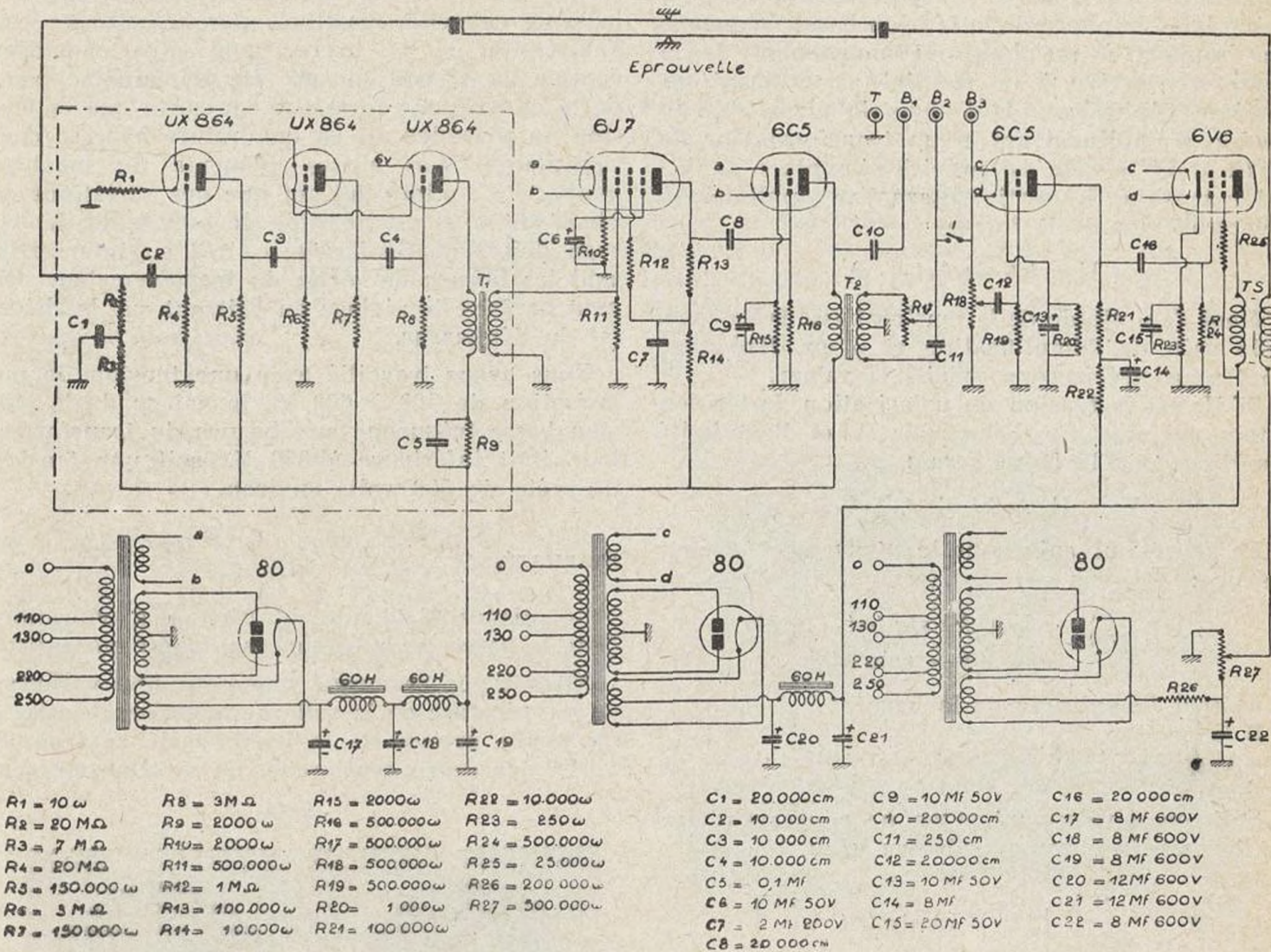
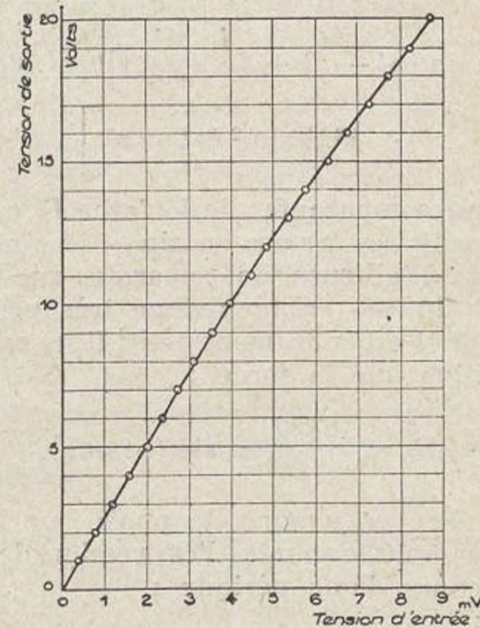


Fig. 12 (ci-dessus). Fig. 13 (ci-dessous).

propre des éprouvettes cylindriques que nous avons utilisées. L'examen de la courbe montre que celle-ci cesse d'être linéaire pour une tension de sortie supérieure à 10 volts correspondant à une tension d'entrée de 4 millivolts environ. Dans nos mesures, nous n'avons jamais dépassé 10 volts.

L'électrode A reçoit la tension amplifiée d'un générateur basse fréquence. L'amplificateur utilisé comprend deux étages : une 6C5 reliée à une 6V6 par résistance et capacité. L'impédance de charge de cette dernière lampe est un transformateur de sortie dont le secondaire, à haute impédance, se trouve placé dans le circuit d'un redresseur dont le but est de polariser l'électrode A.

En effet, l'attraction électrostatique de l'électrode A étant proportionnelle au carré de la tension alternative basse fréquence, il faut, pour entretenir le mouvement, que la fréquence de la force d'attraction soit égale à la fréquence fournie par le générateur. On parvient à ce but en superposant à la tension de sortie basse fréquence une tension continue de valeur supérieure



AUTO-ENTRETIEN DES VIBRATIONS LONGITUDINALES DANS L'ÉPROUVETTE.

Le montage précédent que nous avons utilisé pour la production de vibrations longitudinales



est complété comme suit : la tension microphonique produite par le déplacement de l'éprouvette est amplifiée et appliquée à l'électrode A. On réalise ainsi un oscillateur dont la fréquence est définie par la longueur de l'éprouvette. Comme nous allons le démontrer, pour obtenir une stabilité maximum en fréquence il est nécessaire de pouvoir régler la phase de la tension basse fréquence par rapport à la phase du mouvement de la barre. On arrive à ce résultat en utilisant un système déphaseur placé dans le circuit de la chaîne d'amplificateurs et un transformateur de sortie dont le rôle est précisé ci-après :

La tension de sortie alternative appliquée à l'électrode est de la forme :

$$U = kA \sin(\omega t - \varphi)$$

A étant l'amplitude de la tension basse fréquence, k le gain de l'amplification et  $\varphi$  un déphasage dont nous préciserons ensuite la valeur.

Si  $U_0$  est la tension de polarisation, la tension totale agissant sur l'électrode A et l'extrémité supérieure de la barre sera :

$$U_t = U_0 + kA \sin(\omega t - \varphi).$$

La force qui entretient le mouvement a pour valeur :

$$F = k_1 S \frac{[U_0 + kA \sin(\omega t - \varphi)]^2}{8\pi(e - a \sin \omega t)^2}$$

a étant l'amplitude de la barre,

S la section,

e la distance entre l'électrode et l'extrémité de la barre.

Soit, en développant et en ne conservant que les termes du premier ordre en  $a/e$  :

$$\begin{aligned} F &= \frac{S}{8\pi e^2} \left[ U_0 + kA \sin(\omega t - \varphi) \right]^2 \\ &\quad \left[ 1 + 2 \frac{a}{e} \sin \omega t \right] \\ F &= \left[ \frac{S}{8\pi e^2} U_0^2 + 2 \frac{a}{e} U_0^2 \sin \omega t \right. \\ &\quad \left. + 2kAU_0 \sin(\omega t - \varphi) + 4 \frac{kAaU_0}{e} \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) \right. \\ &\quad \left. + k^2 A^2 \sin^2(\omega t - \varphi) \right] \end{aligned}$$

Des cinq composantes de la force F, on remarque que seuls les termes en  $\sin \omega t$  et  $\sin(\omega t - \varphi)$  sont actifs. D'ailleurs, on remarque que le terme en  $\sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)$  contribue très peu à l'entretien, car il est infiniment petit. Il ne reste donc en définitive que la force :

$$F_3 = \frac{SkAU_0}{4\pi e^2} \sin(\omega t - \varphi)$$

qui doit être en avance de phase sur le déplacement, comme le montre l'expression de son travail au cours d'une période :

On a :

$$T_3 = |F_3| a \omega \sin \varphi.$$

L'efficacité de la force sera d'autant plus grande que  $\varphi$  sera voisin de  $\pi/2$ .

C'est pour remplir cette condition :  $\varphi$  positif

et voisin de  $\pi/2$ , que nous avons utilisé un transformateur de sortie. En effet, la tension basse fréquence est en phase ou en opposition de phase avec le mouvement, il faut donc insérer dans le montage de la lampe amplificatrice un élément qui introduise un déphasage de  $\pi/2$  : c'est l'objet du transformateur de sortie qui, débitant sur la seule capacité constituée par l'électrode A et l'extrémité de la barre, peut être considéré comme un circuit ouvert. Le primaire se comporte comme une forte self, de sorte que la tension au primaire est en quadrature avec le courant-plaque. Les autres éléments du montage lampe, etc... n'introduisent que des variations de phase de  $\pi$ . Il est possible de passer du déphasage  $+\pi/2$  au déphasage  $-\pi/2$  en intervertissant les bornes de sortie du transformateur. On peut parfaire le réglage en agissant sur le rhéostat du déphaseur.

Nous avons travaillé avec une tension de polarisation de 500 à 600 V., la valeur de la tension basse fréquence aux bornes du transformateur était inférieure à 350 V., soit une tension de crête de 500 volts environ.

#### STABILITÉ.

Le dispositif d'auto-entretien des vibrations dans la barre constitue un oscillateur mécanique.

Nous avons remarqué que pour une variation de température de la salle de quelques degrés, la fréquence propre de la barre varie environ de  $1.10^{-4}$  par degré centigrade. Ce système auto-en-

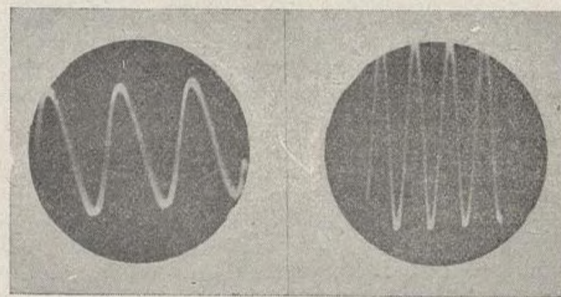


Fig. 14 et 15.

tretenue permet donc, à température constante, son utilisation comme étalon de fréquence.

La tension obtenue est parfaitement sinusoïdale, comme le montrent les photographies prises sur l'oscilloscope, pour différentes vitesses du balayage (fig. 14 et 15).

#### 3° Démultiplicateur de fréquence.

##### MESURE DE LA FRÉQUENCE PROPRE DES ÉPROUVETTES.

La tension alternative fournie par l'oscillateur est amplifiée par l'amplificateur A, qui a été décrit précédemment. La tension microphonique est maximum à la résonance et est amplifiée par le préamplificateur suivi de l'am-



plificateur II (fig. 16). Un voltmètre à lampe, branché aux bornes de ce dernier, permet de mesurer la tension microphonique amplifiée en fonction de la fréquence au voisinage de la fréquence de résonance. La mesure de cette tension microphonique, proportionnelle à l'amplitude de la barre, permet de tracer la courbe de résonance en fonction de la fréquence  $F$  de l'oscillateur.

Etant donné l'acuité de la courbe de réso-

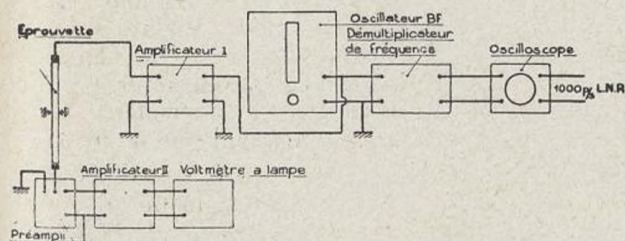


Fig. 16. — Montage utilisé pour la détermination de la courbe de résonance.

nance, la lecture de la fréquence sur le cadran n'étant plus suffisamment précise, nous avons ajouté à notre montage un démultiplicateur de fréquence dont le facteur de démultiplication est  $m = F/f$ ,  $m$  étant un nombre entier, et  $f$  la fréquence étalon de comparaison (1 000 p/s du Laboratoire national de radio-électricité).

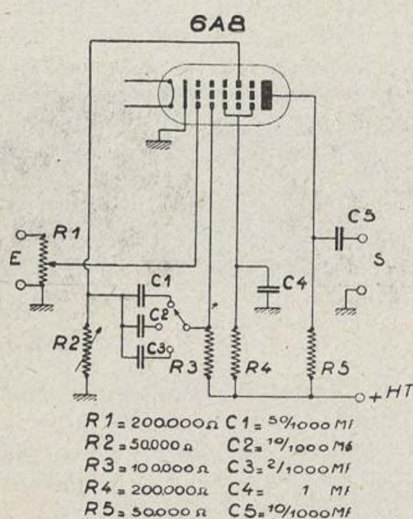


Fig. 17.

Pour réaliser cette condition, nous avons, par approximations successives, diminué la longueur de l'éprouvette de façon que sa fréquence propre soit environ :  $F_0 = m \times 1\,000$ . La tension fournie par l'oscillateur, dont la fréquence est démultipliée, attaque les plaques verticales d'un oscilloscope à rayons cathodiques; les plaques horizontales sont réunies à la source, de fréquence étalon 1 000 p/s. Les figures de Lissajous obtenues permettent, à l'aide d'un chronomètre, de définir avec précision la fréquence de l'oscilla-

teur pour des fréquences voisines de la fréquence propre de l'éprouvette étudiée.

Le démultiplicateur de fréquence (fig. 17, 18) est un oscillateur de relaxation synchronisé du genre multivibrateur. Le principe de cet appareil repose sur les considérations suivantes :

Si un oscillateur est attaqué par une force électromotrice périodique imposée de fréquence un peu différente, et si cette force électromotrice a une amplitude suffisante, il se synchronise sur l'oscillation forcée, l'oscillation libre disparaissant : d'où « une plage de synchronisation » si la fréquence incidente varie. D'autre part, si l'attaque a lieu par une force électromotrice périodique de fréquence voisine d'une harmonique de celle de l'oscillateur libre, pour une amplitude suffisante de la force électromotrice à démultiplier, l'oscillateur se synchronise sur la fréquence sous-harmonique de l'oscillation forcée la plus voisine de la sienne.

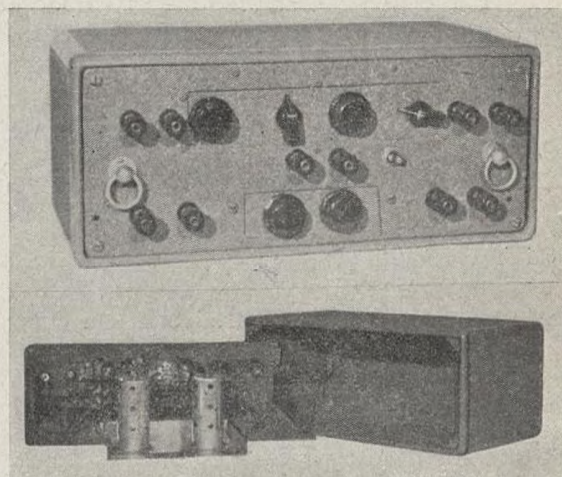


Fig. 18. — Vues extérieure et intérieure du démultiplicateur de fréquence.

Nous avons utilisé un multivibrateur à octode : une lampe 6A8. Afin d'obtenir une bonne synchronisation de l'oscillateur, le réglage précis de l'amplitude de la tension basse fréquence à démultiplier était obtenue à l'aide d'un potentiomètre de 500 000  $\Omega$  placé sur la grille de la partie triode de la lampe.

Cette méthode nous a permis de tracer avec précision la courbe de résonance des éprouvettes étudiées dans ce travail.

#### 4° Amplificateur permettant d'enregistrer à l'oscillographe la courbe d'extinction des vibrations.

Dans un chapitre précédent, nous avons montré que le frottement interne pouvait être défini par la valeur du décrément logarithmique des oscillations : pour le calculer, on peut utiliser soit la courbe de résonance, soit la courbe de décroissance exponentielle de l'amplitude en fonction du temps. Nous avons préféré cette dernière méthode, car elle permet de se rendre



compte comment varie le décrément logarithmique en fonction de l'amplitude.

Pour relever les courbes d'extinction des vibrations, nous avons utilisé le montage d'auto-entretien des vibrations. La tension microphonique produite par le déplacement de la barre est appliquée à l'électrode A après avoir été amplifiée. A l'aide d'un interrupteur placé en série avec l'électrode A, on coupe l'action de la force d'entretien sans arrêter le fonctionnement du microphone qui permet alors de suivre l'amortisse-

ment de courant de sortie en fonction de la tension d'entrée aussi linéaire que possible.

Pour vérifier la distortion en amplitude causée par la chaîne d'amplificateurs utilisée depuis le microphone jusqu'à l'oscillographe, nous avons tracé la courbe de réponse de l'ensemble en injectant à l'entrée du préamplificateur une tension alternative de fréquence 9 000 p.p.s., d'amplitude connue. Le déplacement du spot de l'oscillographe en fonction de la tension appliquée au microphone est représenté par la courbe

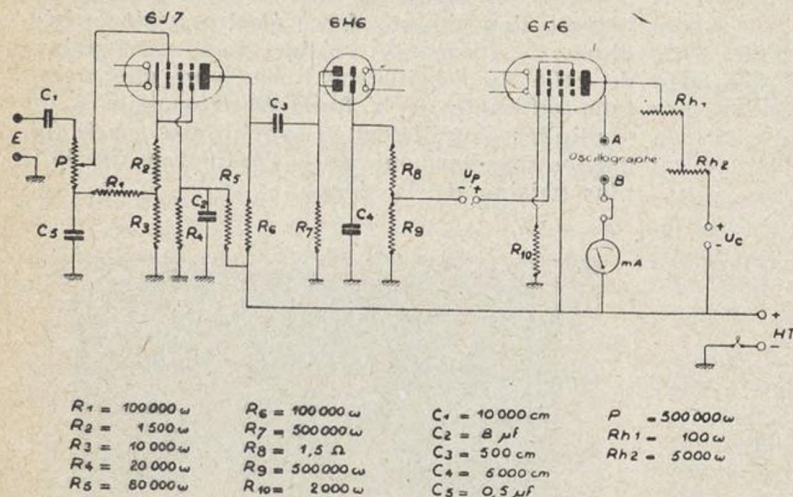
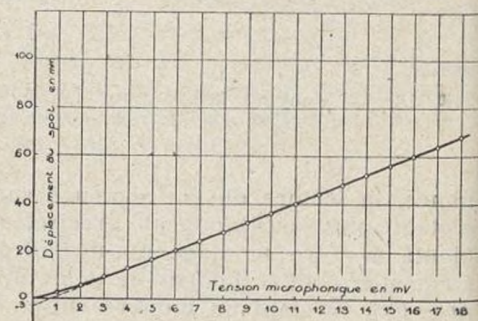


Fig. 19 (ci-contre).

Fig. 20 (ci-dessous).



ment des vibrations de l'éprouvette. On enregistre à l'oscillographe, après détection, la courbe d'amortissement des vibrations. L'échelle des temps est fournie par un diapason à 100 p.p.s. entretenu électriquement et connecté aux bornes d'un second oscillographe. Les courbes ainsi enregistrées permettent de mesurer graphiquement la constante de temps et de calculer le décrément logarithmique des oscillations.

A la sortie de l'étage préamplificateur, la tension est amplifiée par un amplificateur à résistance et capacité comprenant (fig. 10) une 6J7 dont la résistance de plaque élevée de 100 000  $\Omega$  permet d'obtenir une tension alternative de 100 volts environ qui est ensuite détectée à l'aide d'un tube 6H6. La tension détectée est amplifiée par un étage de puissance à réaction : une 6F6 polarisée par une batterie de 20 volts. Une batterie de compensation permet d'annuler le courant continu de plaque  $I_0$  débité par cette lampe. L'oscillographe n'est donc parcouru que par un courant proportionnel à l'amplitude de la tension détectée.

Dans la réalisation de cet amplificateur, nous nous sommes efforcés d'obtenir une caractéristi-

(fig. 20). On remarque que pour des tensions microphoniques faibles le déplacement du spot n'est plus linéaire. Ceci est dû au fait que la

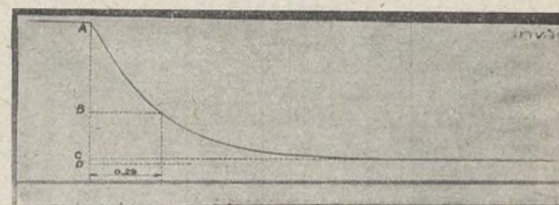


Fig. 21.

détection diode devient quadratique pour de faibles amplitudes. Aussi pour déterminer avec précision la constante de temps, nous avons dû corriger légèrement les courbes d'extinction des vibrations enregistrées à l'oscillographe (fig. 21). Pour obtenir l'amplitude réelle, maximum, nous avons fait, sur la courbe enregistrée, la correction :  $CD = 3\,\text{mm}$ .

R. CABARAT.

(A suivre.)





