

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

POUR OBTENIR

LE GRADE D'INGÉNIEUR DOCTEUR

PAR

**S. KRAUTHAMER**

Ingénieur I. D. N. (1929)

---

**PREMIÈRE THÈSE :** SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA BGRILLE EN  
CHANGEUSE DE FRÉQUENCE.

**DEUXIÈME THÈSE :** PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

*Soutenuès le*

*devant la Commission d'examen*

MM. FLEURY . . . . . President.  
CHAUDRON. } Examineurs.  
LAMBREY . . . }

---

LILLE

SOCIÉTÉ D'ÉDITION DU NORD  
28, Rue Alphonse-Me cter

—  
1934



# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

POUR OBTENIR

LE GRADE D'INGÉNIEUR DOCTEUR

PAR

**S. KRAUTHAMER**

Ingénieur I. D. N. (1929)

---

**PREMIÈRE THÈSE :** SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA BGRILLE EN  
CHANGEUSE DE FRÉQUENCE.

**DEUXIÈME THÈSE :** PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

*Soutenues le* \_\_\_\_\_ *, devant la Commission d'examen*

MM. FLEURY . . . . . Président.  
CHAUDRON.. { Examineurs.  
LAMBREY ... }

---

LILLE  
SOCIÉTÉ D'ÉDITION DU NORD  
28, Rue Alphonse-Mercier

—  
1934

UNIVERSITÉ DE LILLE

FACULTÉ DES SCIENCES

MM.

<i>Doyen</i> .....	MAIGE.	Botanique générale et appliquée.
<i>Assesseur</i> .....	MALAQUIN.	Zoologie générale et appliquée.
<i>Doyen honoraire</i> .....	DAMIEN.	
	HALLEZ.	
	DAMIEN.	
	CHATELET.	
	BARROIS.	
	BRUHAT.	
<i>Professeurs honoraires</i> ...	FOSSE.	
	PASCAL.	
	PAUTHENIER.	
	PAILLOT.	
	BÉGHIN.	
	CHAZY.	
<i>Maître de conférences honoraire</i> .....	QUINET.	
	SWYNGEDAUW.	Physique et Electricité industrielles.
	GAMBIER.	Calcul différentiel et intégral.
	PARISELLE.	Chimie générale.
	BERTRAND.	Paléobotanique.
	LERICHE.	Géologie générale et géographie physique.
	DEHORNE.	Histologie et Embryologie comparées.
	PRUVOST.	Géologie et Minéralogie.
<i>Professeurs</i> .....	JOUNIAUX.	Chimie analytique et agricole.
	CHAUDRON.	Chimie appliquée à l'Industrie et à l'Agriculture.
	FLEURY.	Physique générale.
	KAMPÉ DE FÉRIET.	Mécanique des fluides.
	CHAPELON.	Mécanique rationnelle et Calcul des probabilités.
	GALLISSOT.	Mathématiques appliquées et astronomie.
	CAU.	Physique expérimentale.
	LAMBREY.	Radiotélégraphie.
<i>Professeurs sans chaire</i> ..	DOLLE.	Hydrogéologie.
	DECARRIÈRE.	Chimie industrielle.
	DUPARQUE.	Pétrographie des roches combustibles.
	DUTERTRE.	Géologie et géographie physique.
<i>Maîtres de conférences et chargés de cours</i> .....	FRANÇOIS.	Chimie générale.
	HOCQUETTE.	Botanique agricole.
	LEFEBVRE.	Chimie de la Houille.
	MAZET.	Mécanique.
	ROUELLE.	Mécanique, Physique et Electricité industrielles.
<i>Secrétaire</i> .....	ETLICHIER.	
<i>Chargé du Secrétariat de la Faculté des Sciences.</i>	DONNART.	
<i>Secrétaires honoraires</i> ...	GUILLET.	
	LEBRUN.	

A MON CHER MAITRE  
MONSIEUR LE PROFESSEUR M. LAMBREY

*Hommage de profonde reconnaissance  
et de respectueux dévouement.*



## ERRATA

<i>Page 20, 2<sup>me</sup> ligne, au lieu de</i>	$ u_2  = \frac{M L_2 \Omega^2}{D}  I_1 $
<i>lire</i>	$ u_2  = \frac{M L_2 \Omega^2}{DR'_2}  I_1 $
<i>Page 20, 8<sup>me</sup> ligne, au lieu de</i>	$u_2 = 300.000 I_1$
<i>lire</i>	$u_2 = 3000 I_1$
<i>Page 28, 11<sup>me</sup> ligne, au lieu de</i>	0,3 volt
<i>lire</i>	3 mV
<i>Page 28, 13<sup>me</sup> ligne, au lieu de</i>	1700
<i>lire</i>	0,17





# SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA BIGRILLE EN CHANGEUSE DE FRÉQUENCE

par M. S. KRAUTHAMER

Ingénieur I. D. N. (1929)

---

## RÉSUMÉ

Cette étude a pour but d'analyser le fonctionnement de la bigrille à deux électrodes de contrôle, principalement aux points de vue de l'émission modulée et du changement de fréquence.

Le principe de son fonctionnement a attiré spécialement l'attention du monde scientifique vers 1926, époque à laquelle on utilisait beaucoup la bigrille en changeuse de fréquence.

Bien que ce montage soit actuellement presque périmé, il faut avouer qu'il y a encore suffisamment de flou dans les exposés (1) ayant trait à cette question.

C'est pourquoi nous avons cru bon de reprendre cette étude en nous donnant pour but de faire ressortir directement des expériences le principe en question.

## ÉTUDE PRÉLIMINAIRE. — COURBES STATIQUES

Pour établir une relation entre  $I$ ,  $V_0$ ,  $W_0$ , et  $U_0$ , en désignant par  $I$  le courant de plaque, par  $V_0$  la tension de plaque, par  $W_0$  et  $U_0$  les tensions de polarisation de grille interne et de grille externe, on trace deux réseaux de caractéristiques, l'un pour  $I = g(U_0)$ , avec  $V_0$  et  $W_0$  comme paramètres, et l'autre pour  $I = h(W_0)$ , avec  $V_0$  et  $U_0$  comme paramètres.

---

(1) Voir les articles de MM. de Mare, Lévy, Barthélémy et Bellescize, *Onde Electrique*, avril 1926.

En supposant que  $V_0 \geq 40$  volts et les tensions  $W_0$  et  $U_0$  voisines du zéro, on a

$$I = f(V_0 + K U_0 + K' W_0)$$

$K$  et  $K'$  désignant les coefficients d'amplification de grille externe et de grille interne.

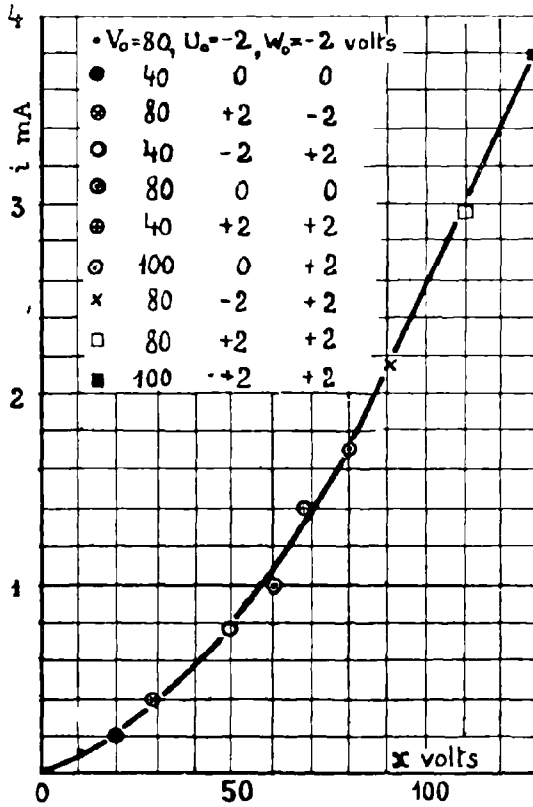


Fig. 1

Dans la région considérée, les courbes de chaque réseau peuvent être représentées par les relations

$$I = g(V_0 + K U_0)$$

et

$$I = h(V_0 + K' W_0)$$

avec  $K$  et  $K'$  sensiblement constants.

Pour étudier la forme de la fonction  $f$ , on porte en abscisses

$$x = V_0 + K U_0 + K' W_0$$

et en ordonnées les valeurs correspondantes de  $I$ . L'exemple suivant illustre ce mode d'opération.

Soient  $V_0 = 60$ ,  $W_0 = +2$ ,  $U_0 = 0$ , volts,  $K = 4,5$  et  $K' = 20$ , on trouve  $x = 100$  et  $I = 1,75$  mA.

En répétant le calcul ci-dessus pour différentes valeurs de  $V_0$ ,  $W_0$  et  $U_0$ , à chaque valeur de  $x$  correspondra une valeur de  $I$ .

Il en résulte une courbe de la forme

$$I = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \tag{1}$$

En opérant toujours dans la même région, sur des bigrilles de types différents, nous avons trouvé des résultats analogues.

Le tableau suivant résume ces résultats.

Lampe	K	K'	I milli-ampères	V volts	$U_0$ et $W_0$ volts
Philips A 441 N .	4	20	$0,0002 x^2 + 0,004 x$	40 à 100	- 2 à + 2
Gécovalve .....	6	20	$0,00015 x^2 - 0,002 x + 0,07$	» à »	» à + »
Philips E 441 ....	5	40	$0,00008 x^2 + 0,05$	» à »	» à + »
Radiofotos MX 80	18	54	$0,00002 x^2 + 0,0008 x$	» à »	» à + »

La conclusion est donc que dans un domaine relativement restreint la caractéristique d'une bigrille peut être assimilée à une parabole.

### REMARQUES

1) Dans cette étude on va considérer plus particulièrement la Philips A 441 N.

2) Il convient de noter que dans la région considérée, les courants de grille interne et ceux de grille externe sont petits; par exemple on trouve que, pour  $V_0 = 40$ ,  $W_0 = U_0 = 2$  volts, le courant de grille interne est de 0,05 mA et celui de grille externe est de 0,02 mA, par contre le courant de plaque est de 1,3 mA.

3) On peut calculer à partir de la formule (1) la résistance interne filament plaque

$$\rho = \frac{1}{\frac{\partial I}{\partial V}} = \frac{1}{\frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dV}} = \frac{1}{2 a x + b}$$

On voit que  $\rho$  varie énormément lorsqu'on se déplace le long de la caractéristique parabolique (Fig. 2).

Il est intéressant de signaler que les bigrilles travaillent toujours dans une région courbe de leur caractéristique  $I = f(x)$  et l'augmentation corrélatrice de  $\rho$ , lorsque  $x$  décroît, joue un rôle important dans le rendement du changement de fréquence.

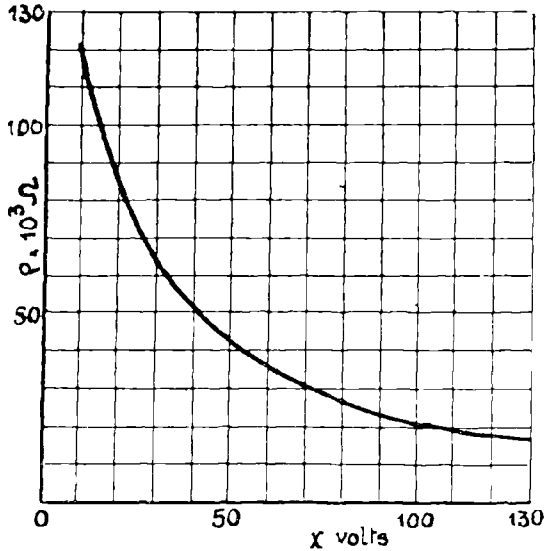


Fig. 2

### FONCTIONNEMENT EN OSCILLATRICE

Un circuit oscillant est placé sur la grille interne et couplé électromagnétiquement avec la plaque (Fig. 3). Un couple thermo-électrique est placé dans la branche capacitive du circuit oscillant et indique les amplitudes du courant H. F. Pour mesurer le courant oscillant de plaque

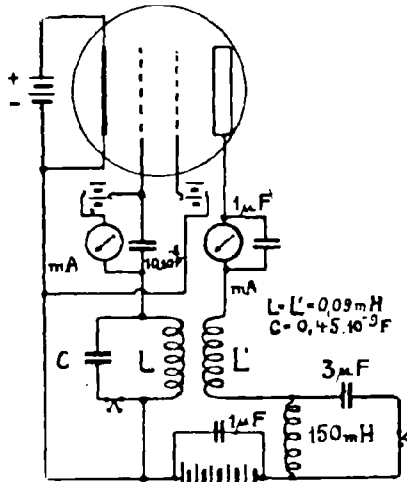


Fig. 3

on se sert également d'un thermocouple. Afin de faire passer uniquement la composante de haute fréquence dans ce dernier on intercale dans le circuit de plaque une self de choc avec une capacité en dérivation, le

couple étant placé en série avec le condensateur. Des milliampèremètres à courant continu, intercalés dans les circuits de grille interne et de plaque, indiquent les courants moyens. Le circuit oscillant est réglé sur une longueur d'onde de 400 mètres. Dans ce qui va suivre le condensateur du circuit oscillant restera fixe et l'induction mutuelle  $M$  variera. Pour avoir de petites variations de  $M$  on a réalisé un dispositif à démultiplicateur.

### ÉTALONNAGE DE L'INDUCTION MUTUELLE VARIABLE

Cet étalonnage est effectué en fonction de l'angle que font entre elles les deux bobines. La méthode utilisée (1) est celle dite par comparaison de deux inductions mutuelles (Fig. 4.).

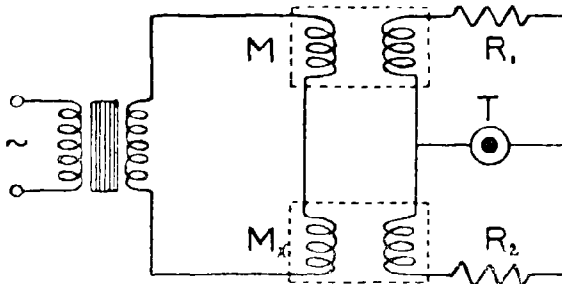


Fig. 4

Désignons par  $M$  l'induction mutuelle variable et étalonnée et par  $M_x$  celle à mesurer; on aura, lorsque l'équilibre en continu et en alternatif est réalisé, la relation

$$M_x = M \frac{R_2}{R_1}$$

### ÉTALONNAGE DES COUPLES THERMO-ÉLECTRIQUES

Les couples employés étaient à « heater » indépendant de marque Cambridge et Paul Inst. Cy. Leur résistance était de l'ordre de 8 ohms. Un galvanomètre à courant continu donne des indications proportionnelles au carré de l'intensité du courant qui passe dans le « heater ». L'étalonnage se fait suivant le schéma de la Fig. 5. Un transformateur abaisse la tension du secteur, un voltmètre de bonne qualité mesure la tension aux bornes du secondaire, la résistance  $r$  sert à la maintenir constante et la résistance  $R$  permet de faire varier l'intensité du courant et de tracer la courbe d'étalonnage.

(1) Voir Bedeau, *Cours de T. S. F.*, p. 69.

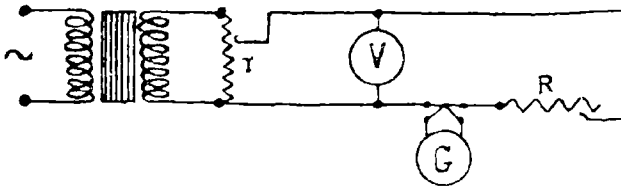


Fig. 5

### COURANT DANS LE CIRCUIT OSCILLANT

Les conditions d'amorçage étant réalisées, on trace les courbes  $I_{osc}$  en fonction de  $M$ , pour différentes tensions de plaque, de grille interne et de grille externe. Il est facile d'en déduire pour  $M$  constant, les courbes donnant  $I_{osc}$  en fonction de tensions de polarisation de grille interne et de grille externe.

En examinant les courbes de la Fig. 6, on voit qu'une faible variation de polarisation de grille externe fait varier de beaucoup l'amplitude du courant oscillant, toutefois ceci n'est vrai que lorsqu'on est assez loin de la limite d'accrochage. Près de cette dernière, l'influence de la polarisation de grille interne se fait sentir et celle de la grille externe diminue.

On remarque, en outre, que la variation est souvent linéaire et on peut en conclure que la bigrille semble être une excellente modulatrice.

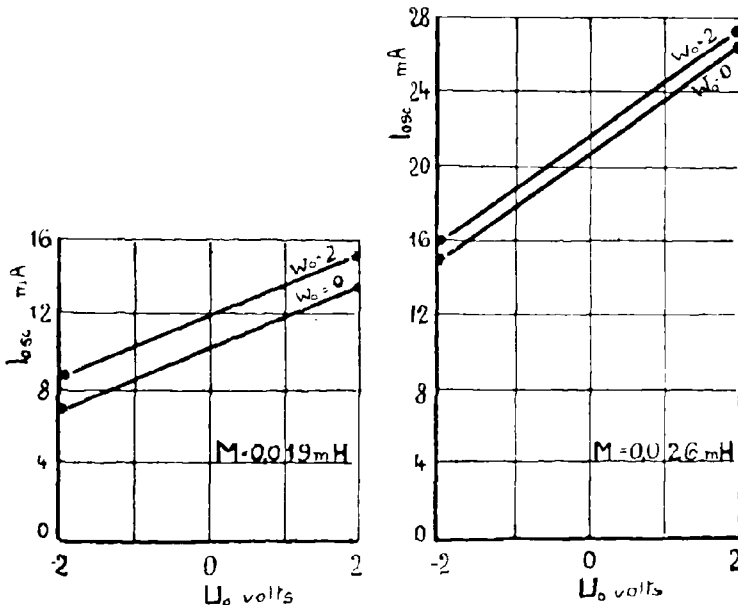


Fig. 6

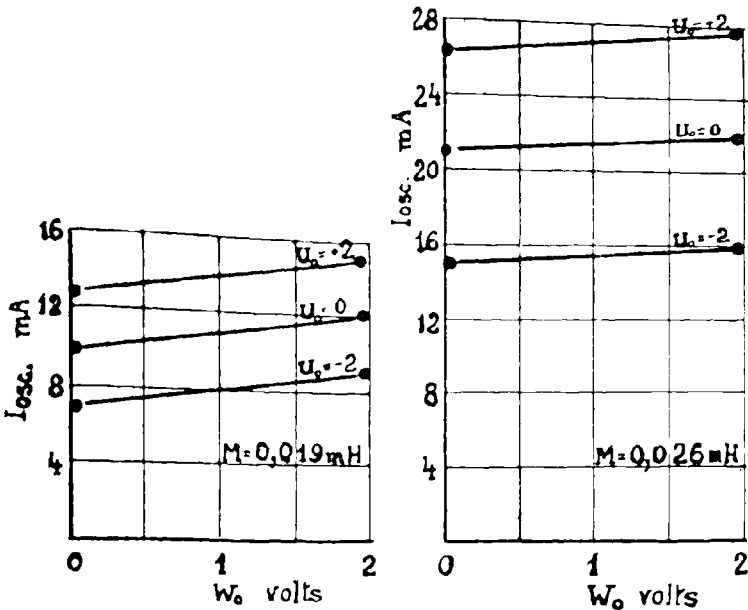


Fig. 6

En effet, en choisissant un  $M$  convenable on pourra faire agir des courants de fréquence audible sur le potentiel de grille externe et moduler de cette façon les amplitudes d'oscillation sur la grille interne.

Ajoutons encore que les oscillations ne peuvent pas se désamorcer pour les grandes variations du potentiel de grille externe, ce qui peut arriver lorsqu'on utilise une triode.

Enfin, je voudrais faire remarquer que le courant moyen de grille interne est très petit lorsqu'on est près de la limite d'accrochage.

#### CONDITION LIMITE D'ENTRETIEN

a) Le schéma est celui de la Fig. 3. On note les valeurs de  $M$  pour lesquelles les oscillations s'amorcent. Un thermocouple placé dans le circuit oscillant indique l'amorçage.

La condition limite d'entretien pour une triode (1) est

$$M^2 + K' L M + \rho C L R = 0 \quad (1)$$

nous avons vu, d'autre part, que dans une bigrille  $\rho$  avait pour valeur  $\frac{1}{2 a x + b}$

(1) Bedeau, *Cours de T. S. F.*, p. 173.

Remplaçant  $\rho$  par sa valeur dans (1) on trouve

$$M. (M + K'L) (2 a x + b) = L C R = \text{constante} \quad (2)$$

Connaissant  $M$ ,  $K' = 20$ ,  $K = 4,5$ ,  $L = 0,09$  mH,  $x = V_0 + K U_0 + K' W_0$ ,  $a = 0,002$  et  $b = 0,004$ , on peut vérifier la relation (2).

Voici quelques résultats numériques :

x	:	42	55	58,65	60	64,5	69	75,5	77,3
M <sub>mH</sub>	:	0,0136	0,0108	0,0103	0,0098	0,0086	0,0078	0,0072	0,0067
Const.	:	51	51	47,5	49	46	44,5	44	43
x	:	78,5	84,5	87,3	93				
M <sub>mH</sub>	:	0,008	0,0082	0,0079	0,0077				
Const.	:	51	56	55	57				

b) Considérons le montage Hartley dans lequel la réaction est purement électrostatique. On note ici les valeurs de la capacité pour lesquelles le système accroche.

Si nous partons de la condition limite d'entretien d'une triode, avec montage analogue, qui s'écrit (1)

$$K' L L' - L^2 = R C \rho (L + L')$$

nous trouvons, en désignant comme précédemment par  $\rho$  la résistance filament-plaque,

$$\frac{C}{2 a x + b} = \text{Const.}$$

Si on opère avec  $L = 0,03$  mH et  $L' = 0,09$  mH on trouve les résultats suivants :

x	:	49	51	89	91	100	109	111	129
C <sub>m<math>\mu</math>F</sub>	:	0,46	0,52	0,75	0,76	0,91	1,03	1,04	1,23
Const.	:	195	213	190	188	206	216	214	220

De ces résultats numériques, il ressort que le courant de grille interne n'intervient sensiblement pas pour la détermination de la condition limite d'entretien.

### HARMONIQUES

Pour se rendre compte de l'importance des harmoniques on couple par induction le circuit à étudier avec un circuit étalonné en longueurs d'ondes et comprenant une self, un condensateur variable et un thermocouple. On trace des courbes de résonance relatives à chacun des harmoniques, en opérant avec un couplage très lâche. Afin de pouvoir

(1) Bedeau, *Cours de T. S. F.*, p. 173.



comparer les courants harmoniques au fondamental ces couplages sont maintenus fixes.

Dans notre expérience, la comparaison des courants de plaques de pulsations  $2 \omega$  et  $3 \omega$  au fondamental donne le rapport suivant I :  $1/1,4 : 1/5$ .

Il est à remarquer que ce rapport reste à peu près constant pour les différentes valeurs des tensions continues de plaque, de grille interne et de grille externe.

En ce qui concerne les harmoniques du circuit de grille interne, on a constaté qu'ils étaient peu importants.

### FONCTIONNEMENT EN CHANGEUSE DE FRÉQUENCE

Si on applique les tensions  $u_1 = U_1 \cos \omega t$  à la grille externe et  $w_1 = W_1 \cos \omega' t$  à la grille interne, il en résulte dans l'expression du courant de plaque un terme en  $u_1 w_1$  correspondant à un courant de battement.

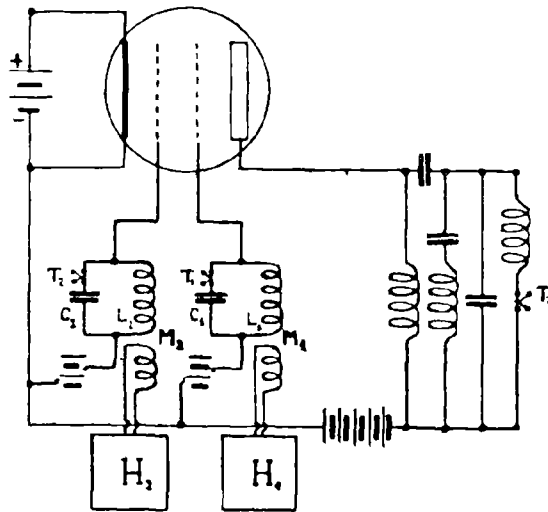


Fig. 7

En effet, on a vu que dans un domaine restreint on pouvait écrire pour le courant de plaque

$$i = a x^2 + b x + c \quad (1)$$

avec  $x = v + K u + K' w$ ; en développant et en conservant le terme en  $u_1 w_1$ , égal à  $2 a K K' U_1 W_1 \cos \omega t \cos \omega' t$ , on en tire le courant de battement, ayant pour valeur

$$I_B = a K K' U_1 W_1 \cos (\omega - \omega') t \quad (2)$$

Soient les hétérodynes  $H_1$  et  $H_2$  fournissant les tensions  $u_1$  de pulsation,  $\omega = 1,93 \cdot 10^5$  et  $w_1$  de pulsation,  $\omega' = 2,05 \cdot 10^6$  dont les amplitudes sont réglées par  $M_1$  et  $M_2$  et mesurées à l'aide des thermocouples  $T_1$  et  $T_2$  (on sait que ces amplitudes sont reliées aux courants par les relations  $U_1 = I_1/C_1 \omega$  et  $W_1 = I_2/C_2 \omega'$ ). Les circuits oscillants  $C_1 L_1$  et  $C_2 L_2$  sont réglés sur les fréquences à recevoir. Chaque hétérodyne était placée dans une cage de Faraday, réunie au sol; il en était de même pour les bobines de couplage  $M_1$  et  $M_2$ ; tous les fils étaient sous plomb, mis à la terre; les sources d'alimentation des hétérodynes et de la bigrille étaient séparées (fig. 7).

L'équation (1) montre qu'il y aura dans le circuit de plaque, en outre le courant de battement, des termes constants correspondant à des courants continus et des termes correspondant à des courants de H. F. et ayant pour valeur

$$i = (2 a x + b) K U_1 \cos \omega t$$

$$i = (2 a x + b) K' W_1 \cos \omega' t$$

$$i = \frac{1}{2} a K^2 U_1^2 \cos 2\omega t$$

$$i = \frac{1}{2} a K'^2 W_1^2 \cos 2\omega' t$$

et 
$$i = a K K' U_1 W_1 \cos (\omega + \omega') t$$

Il est aisé de constater par le calcul, et l'expérience le confirme, que les courants les plus gênants sont de pulsations  $\omega'$ ,  $2\omega'$  et  $\omega$ .

Il s'agit donc de séparer le courant de battement de la composante continue et de le transmettre à l'appareil de mesure; il faut éliminer aussi les courants de H. F.

La composante continue s'élimine aisément en intercalant un condensateur de forte capacité ( $C = 5 \mu F$ ), formant pratiquement un court-circuit pour le courant de battement; une self de choc de 150 mH, laisse passer la composante continue et empêche le retour au filament, des courants de H. F. et du courant de battement; le courant de pulsation  $\omega'$  est éliminé à l'aide d'un circuit résonnant accordé sur cette pulsation; un condensateur de 4 m $\mu$ F élimine ensuite les courants de pulsations  $\omega$ ,  $2\omega'$ ,  $2\omega$  et  $\omega + \omega'$ ; une self de 4 mH empêche le passage de la H. F. dans le couple  $T_3$ . Finalement le courant de battement est recueilli dans un thermocouple  $T_3$  de 35 ohms.

Ajoutons encore que pour éviter toute action directe des hétérodynes sur les éléments intercalés dans le circuit de plaque, on a enfermé ces derniers ainsi que la bigrille dans une cage de Faraday de grandes dimensions, réunie au sol.

Il est facile de vérifier que le thermocouple  $T_3$  reçoit seulement le courant utile, ce qui se fait en annulant  $u_1$  ou  $w_1$ .

Pour vérifier la formule (2), nous avons mesuré le courant de battement, en faisant varier les amplitudes de  $u$  et  $w$  ainsi que le point de fonctionnement moyen sur la courbe

$$I = f(V_0 + K U_0 + K' W_0).$$

Nous avons constaté une concordance convenable entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par le calcul.

La conclusion est donc que le courant de battement résulte de l'apparition, dans l'expression du courant de plaque, d'un terme en  $u_1 w_1$ .

Ceci s'explique très simplement par le fait que dans toute la région d'utilisation normale, les caractéristiques statiques sont courbes.

#### REMARQUE

Avant de passer à l'étude du montage dans lequel l'oscillation locale est fournie par la bigrille, je voudrais signaler un phénomène qui semble à première vue intervenir dans le mécanisme du changement de fréquence.

On observe qu'en appliquant à l'une des grilles une tension oscillante de forte amplitude (de l'ordre de 5 volts et plus), le potentiel oscillant de l'autre grille se trouve modifié.

Pour expliquer ce phénomène on a supprimé l'alimentation de la bigrille et on couplait, par exemple, le circuit de grille interne avec une hétérodyne. En faisant varier le condensateur du circuit de grille externe on pouvait relever, à l'aide du thermocouple, une courbe de résonance.

On en conclut qu'il existe une capacité entre électrodes et que de ce fait la grille externe et la grille interne se trouvent portées à des potentiels supplémentaires  $U_2 \cos \omega' t$  pour la grille externe et  $W_2 \cos \omega t$  pour la grille interne. Dans les conditions de l'expérience nous avons trouvé pour  $W_1$  (ou  $U_1$ ) = 10 volts  $U_2$  (ou  $W_2$ ) = 0,7 volts. Si on compare les termes  $2 a K^2 U_1 U_2 \cos \omega t \cos \omega' t$  et  $2 a K'^2 W_1 W_2 \cos \omega t \cos \omega' t$ , qui en résultent, au terme  $2 a K K' U_1 W_1 \cos \omega t \cos \omega' t$  on voit qu'ils sont beaucoup moins importants. On doit remarquer, en outre, qu'en fonctionnement normal les tensions appliquées à la grille externe sont  $10^3$  fois environ plus petites que celles appliquées à la grille interne. En définitive, ce phénomène n'a pratiquement pas d'influence sur l'expression primitive du courant de battement.

Passons maintenant au montage dans lequel l'oscillation locale est engendrée par couplage inductif du circuit oscillant de grille interne avec la self de plaque. Tout d'abord nous chercherons à vérifier expérimentalement l'hypothèse émise par certains auteurs d'après laquelle le changement de fréquence s'opère grâce aux propriétés modulatrices de la bigrille.

En effet, en examinant la Fig. 6 qui représente le courant oscillant de grille interne en fonction de polarisation de grille externe, on pourrait penser que le régime oscillatoire de grille interne est modifié sous l'influence du potentiel instantané de grille externe, et qu'il en résulte un courant de battement. Mais la fréquence de la perturbation est tout à fait de même ordre de grandeur que celle du phénomène permanent qu'on lui suppose perturber. Il est logique d'en conclure que les tensions  $u_1$  et  $w_1$  sont pratiquement indépendantes. Pour arriver à vérifier ceci expérimentalement on transmet l'oscillation de grille interne à la grille d'une triode (1). Un microampèremètre intercalé dans le circuit de plaque de cette dernière indique les variations du potentiel de grille interne. Si l'amplitude de la tension de grille externe est de l'ordre de celle que lui applique un signal, on ne constate aucune variation de l'oscillation sur la grille interne.

Revenons donc à l'expression du courant de battement fournie par la formule parabolique, ayant pour valeur

$$I_B = a K K' U_1 W_1$$

et remarquons qu'elle n'est valable que dans un domaine restreint pour  $V_0 \geq 40$  volts,  $U_0$  et  $W_0$  de  $-2$  à  $+2$  volts, et qu'elle ne convient plus pour  $V_0 < 40$  volts et  $W_0$  notablement différent du zéro. D'autre part on constate que  $\frac{\partial^2 i}{\partial u \partial w}$  cesse d'être une constante et qu'elle varie avec le point de fonctionnement sur la caractéristique statique, elle croît lorsque  $U_0$  et  $V_0$  diminuent et dépend aussi un peu de  $W_0$ .

Ces considérations nous amènent à modifier la formule qui donne le courant de battement. Si en effet on examine les caractéristiques statiques de la Fig. 8, on voit que pour une tension de plaque donnée, le courant de plaque est représenté par la relation

$$i = f(u, w)$$

Pour une impédance de plaque négligeable, le développement en série de Taylor de la fonction  $f$ . autour de chaque point de fonctionnement donne comme terme en  $u, w$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial u \partial w} u w$$

Si  $u_1 = U_1 \cos \omega t$  et  $w_1 = W_1 \cos \omega' t$ , il en résulte le courant de battement

$$I_B = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 i}{\partial u \partial w} U_1 W_1$$

---

(1) On a utilisé pour cela la méthode d'opposition de Bedeau, *Onde Electrique*, 1925, p. 462.

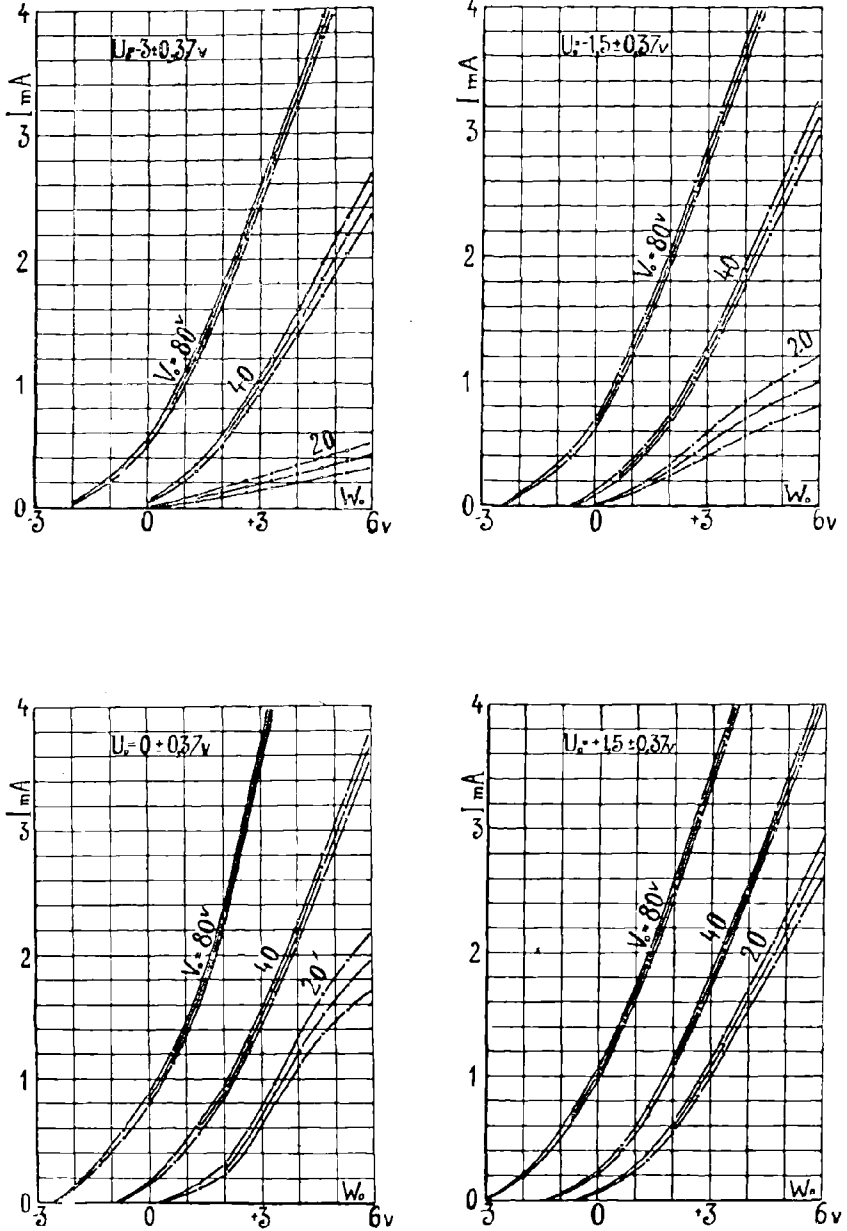


Fig. 8

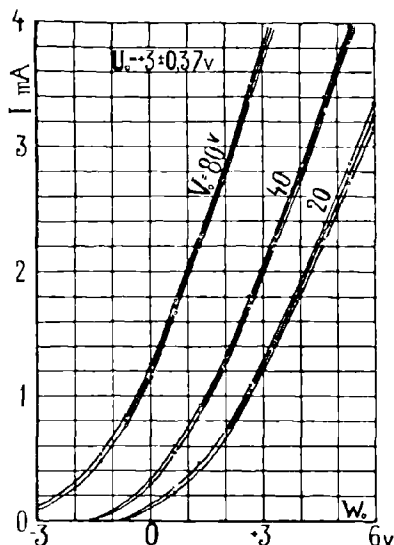


Fig. 8 (suite)

Il convient de signaler que  $U_1$  est très petit, mais  $W_1$  relativement grand. Il conviendra donc de faire intervenir pour la vérification expérimentale une expression telle que  $\frac{\Delta}{\Delta W} \left( \frac{\partial i}{\partial u} \right)$  dans laquelle  $\frac{\partial}{\partial u}$  désigne une dérivée (pente d'une tangente) tandis que le signe  $\frac{\Delta}{\Delta W}$  indique qu'il s'agit d'une valeur moyenne (pente d'une corde).

#### DISPOSITIFS EMPLOYÉS POUR LES MESURES

L'hétérodyne H (Fig. 9) fournit le signal  $u_1$  de pulsation,  $\omega = 1,93 \cdot 10^6$  dont l'amplitude est réglée par les bobines de couplage  $M_1$  et l'affaiblisseur A; ce dernier donne des forces électromotrices connues et mesurées directement par le thermocouple  $T_1$ . Le circuit oscillant de grille interne est couplé par couplage inductif avec la self de plaque et donne l'oscillation locale  $w_1$  de pulsation,  $\omega' = 2,05 \cdot 10^6$ ; son amplitude est réglée par le couplage  $M_2$  et mesurée par le thermocouple  $T_2$  (on a  $W_1 = I/C \omega'$ ). Dans le circuit de plaque est intercalé un transformateur à secondaire accordé sur la moyenne fréquence; cette dernière étant ainsi isolée, est amplifiée et mesurée par un voltmètre amplificateur. Pour éviter tout couplage perturbateur, l'hétérodyne et le voltmètre amplificateur étaient enfermés chacun dans une cage de Faraday, reliée au sol; il en était de même pour l'affaiblisseur, l'oscillateur local et le transformateur M. F.; ces derniers éléments et la bigrille

étaient placés dans une cage de Faraday, de grandes dimensions, mise à la terre. Signalons enfin que les sources d'alimentation étaient séparées ; que les fils étaient sous plomb mis au sol ; que les batteries étaient shuntées par des condensateurs ; que les galvanomètres  $G_1$  et  $G_2$  étaient blindés.

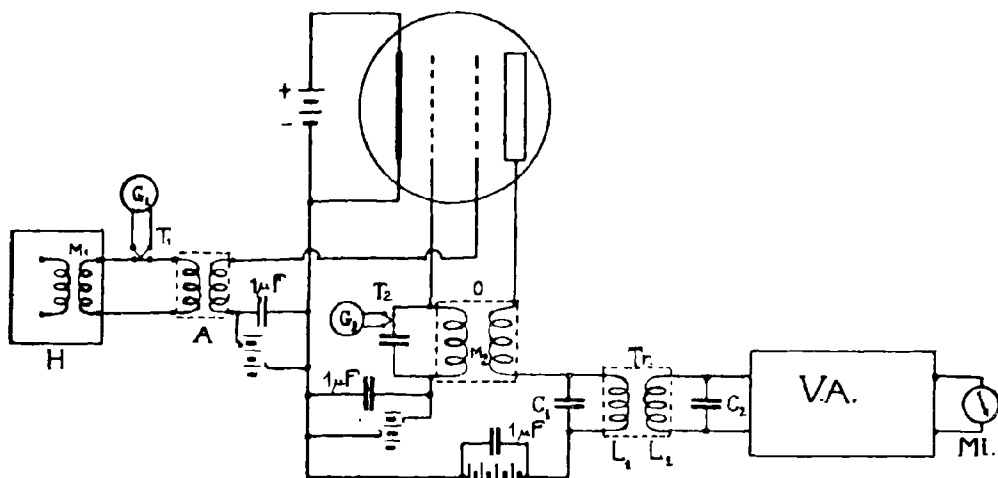


Fig. 9

### VOLTMÈTRE AMPLIFICATEUR

Nous avons réalisé un voltmètre amplificateur Abraham et Bloch. Il comprend trois étages à résistances ; les deux premiers sont amplificateurs et le dernier est détecteur. Un microampèremètre est disposé dans le circuit de plaque de la dernière lampe, il est ramené au zéro à l'aide d'une pile et d'une résistance réglable. Il est shunté par une capacité de  $1 \mu F$  qui sert à dévier la H. F.

Pour étalonner l'appareil, on applique à la première lampe une tension connue, prise aux bornes d'une résistance sans self et sans capacité (un fil fin tendu sur une plaquette d'ébonite). Cette résistance est parcourue par un courant mesuré à l'aide d'un thermocouple et sa fréquence est voisine de celle que l'on veut étudier.

On a utilisé des lampes Philips A 425 ; les capacités de liaison étaient de  $0,01 \mu F$  ; les résistances intercalées dans les circuits de plaque étaient de  $40.000 \text{ ohms}$  et celles de fuite étaient de  $4 M \Omega$  ; la tension anodique était de  $80 \text{ volts}$ .

## PRODUCTION DU SIGNAL

Pour obtenir des f.é.m. de l'ordre de quelques millivolts on se sert d'une hétérodyne émettant sur la fréquence désirée ( $\omega = 1,93.10^6$ ) et on fait arriver à la grille externe une faible fraction connue de la tension fournie. Pour cela on emploie un affaiblisseur constitué par deux bobines dont l'induction mutuelle varie sinusoidalement en fonction de l'angle de rotation (1).

Pour que ceci soit réalisé il faut que :

- 1) L'enroulement fixe présente un plan de symétrie suivant l'axe de rotation de l'enroulement mobile ;
- 2) Ce dernier ait la forme d'un solide de révolution autour de l'axe de rotation ;
- 3) Ses spires soient placées dans des plans parallèles et équidistants.

Soient  $e_2$  la f.é.m. au secondaire,  $M = A \sin \alpha$  l'induction mutuelle et  $i_1$  le courant au primaire, on a

$$e_2 = i_1 \omega M = i_1 \omega A \sin \alpha$$

Pour faire l'étalonnage de l'appareil on réalise le montage de la Fig. 10 ; le primaire est couplé inductivement avec une hétérodyne émettant sur la pulsation,  $\omega = 1,93.10^6$  ; le circuit L C est accordé sur cette pulsation, un thermocouple indique le courant  $i_1$  ; la tension qui

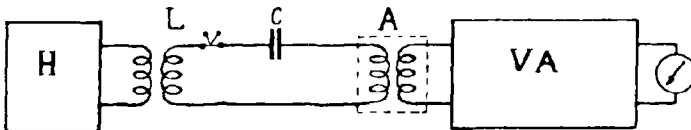


Fig. 10

apparaît aux bornes du secondaire est transmise au voltmètre amplificateur préalablement étalonné. Pour un courant  $i_1$  donné on obtient au secondaire des f.é.m.  $e_2, e'_2, e''_2$ , en faisant varier l'angle  $\alpha$ , et il en résulte la courbe d'étalonnage  $e_2 = f(\alpha)$ , représentée par la courbe I de la Fig. 11.

(1) Voir R. Mesny, *Onde Electrique*, 1922, p. 54-61.



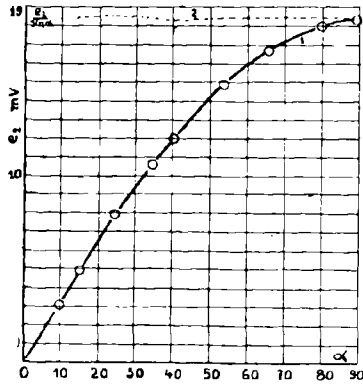


Fig. 11

Pour vérifier que la loi de variation de l'induction mutuelle est parfaitement sinusoïdale on forme le rapport

$$\frac{e_1}{\sin \alpha_1} = \frac{e_2}{\sin \alpha_2} = \frac{e_3}{\sin \alpha_3} = \dots = A$$

(courbe 2 de la même figure).

La Fig. 12 donne le schéma de cet appareil ; la bobine mobile a est constituée par un cylindre en ébonite ; les spires sont logées dans des rainures. La bobine fixe b est constituée par des fils enroulés sur un cadre en ébonite, à section rectangulaire. L'ensemble est enfermé dans une boîte en laiton de dimensions suffisantes. Enfin, un cadran gradué permet de lire les angles.

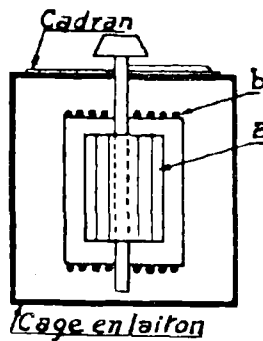


Fig. 12

### MESURE DE COURANT DE BATTEMENT

Nous avons vu (p. 10) que le courant de battement était mélangé de H. F. Il faut donc l'isoler et le transmettre à l'appareil de mesure.

Pour cela on emploie un transformateur à secondaire accordé sur la moyenne fréquence. Pour maintenir cet accord il est indispensable de retoucher la capacité du circuit oscillant de grille interne lorsqu'on fait varier son couplage avec la self de plaque.

### CALCUL DU TRANSFORMATEUR

Afin de voir comment se comporte notre transformateur vis-à-vis des courants de H. F., nous allons d'abord étudier le cas où la pulsation est très différente de la pulsation de résonance du secondaire, ensuite nous verrons le cas du secondaire accordé.

a) *Secondaire non accordé.*

Les notations employées sont celles de la Fig. 13.

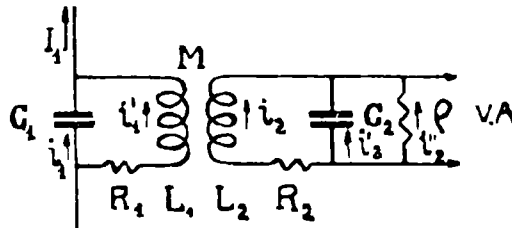


Fig. 13

En remarquant que la réaction du secondaire sur le primaire est négligeable, on a

$$i_1 + i'_1 = I_1 \quad (1)$$

$$- \frac{j}{C_1 \omega} i_1 = (R_1 + j L_1 \omega) i'_1 \quad (2)$$

d'où pour  $R_1 \ll L_1 \omega$  il vient

$$\frac{i_1}{I_1} = \frac{- \frac{j}{C_1 \omega}}{j(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega})} \quad (3)$$

et 
$$\left| \frac{i'_1}{I_1} \right| = \frac{1}{C_1 L_1 \omega^2 - 1} \quad (4)$$

$|i'_1|$  et  $|I_1|$  désignant les modules de  $i'_1$  et  $I_1$ .

Si nous désignons par  $Z$  l'impédance apparente du transformateur et par  $u_2$  la tension aux bornes du secondaire, on a

$$Z = L_1 \omega \left| \frac{i_1}{I_1} \right| = \frac{L_1 \omega}{C_1 L_1 \omega^2 - 1} \quad (5)$$

et 
$$u_2 = M \omega i'_1 = \frac{M \omega}{1 - C_1 L_1 \omega^2} |I_1| \quad (6)$$

Pour  $\omega = 2,05 \cdot 10^4$ ;  $C_1 = 2 \text{ m}\mu\text{F}$ ;  $L_1 = 3,5 \text{ mH}$ , et  $M = 0,3 \text{ mH}$ ,

on trouve 
$$\frac{i_1}{I_1} = \frac{1}{28}$$

$$Z = 250 \text{ ohms}$$

et 
$$u_2 = 22 I_1$$

On voit que  $Z$  est pratiquement un court-circuit pour la H. F.; il n'y a donc pas de chute de tension pour la H. F.

b) *Secondaire accordé.*

Le secondaire étant accordé sur la pulsation  $\omega = \omega' = \Omega$  il faut tenir compte de la réaction sur le primaire.

On a les équations

$$i_1 + i'_1 = I_1 \quad (1)$$

$$j M \Omega i'_1 = - \left( R_2 + \frac{L_2^2 \Omega^2}{\rho} \right) i_2 \quad (2)$$

$$- j \frac{1}{C_1 \Omega} i_1 = (R_1 + j L_1 \Omega) i'_1 + j M \Omega i_2 \quad (3)$$

Remplaçons  $R + \frac{L^2 \Omega^2}{\rho}$  par  $R'$  dans (1); il vient

$$i_2 = - j \frac{M \Omega}{R_2} i'_1 \quad (4)$$

On tire de (1) et (3)

$$- j \frac{1}{C_1 \Omega} i_1 = \left[ (R_1 + \frac{M^2 \Omega^2}{R_2}) + j L_1 \Omega \right] i'_1 \quad (5)$$

Tenant compte de (2), il vient

$$I_1 = i'_1 \left[ 1 - C_1 L_1 \Omega^2 + j C_1 \Omega \left( R_1 + \frac{M^2 \Omega^2}{R_2} \right) \right] \quad (6)$$

Passant aux modules, on a

$$\frac{|i'_1|}{|I_1|} = \frac{1}{\sqrt{(1 - C_1 L_1 \Omega^2)^2 + C_1^2 \Omega^2 \left( R_1 + \frac{M^2 \Omega^2}{R_2} \right)^2}} = \frac{1}{D} \quad (7)$$

L'impédance apparente du système est donnée par la formule

$$Z = j L_1 \Omega i'_1 + j M \Omega i_2 = \left( j L_1 \Omega + \frac{M^2 \Omega^2}{R_2} \right) i'_1 \quad (8)$$

$$\text{d'où son module } |Z| = \frac{\sqrt{\left( \frac{M^2 \Omega^2}{R_2} \right)^2 + L_1^2 \Omega^2}}{\sqrt{(1 - C_1 L_1 \Omega^2)^2 + C_1^2 \Omega^2 \left( R_1 + \frac{M^2 \Omega^2}{R_2} \right)^2}} \quad (9)$$

La tension aux bornes du secondaire sera

$$|u_2| = \frac{M L_2 \Omega^2}{D} |I_1| \quad (10)$$

Si l'on pose  $M = 0,3$  mH;  $L_1 = 3,5$  mH;  $L_2 = 60,6$  mH;  $C_1 = 2 \cdot 10^{-6}$  F;  $\Omega = 125 \cdot 10^3$ ;  $R_1 \approx 10$  ohms;  $R_2 \approx 40$  ohms (valeurs mesurées) et si on prend pour  $r \approx 10^6$  ohms, on trouve

$$\frac{i_2}{I_1} = \frac{1}{0,9}$$

$$Z = 450 \text{ ohms}$$

et  $u_2 = 300.000 \text{ I}$

On voit que l'impédance  $Z$  est petite pour la fréquence du battement; en effet, on s'est arrangé pour qu'il en soit ainsi, afin que la formule donnant le courant de battement calculé à partir de résultats statiques soit directement applicable.

#### ÉTALONNAGE DU TRANSFORMATEUR

Pour étalonner le transformateur on réalise le schéma de la Fig. 14; une hétérodyne émettant sur la fréquence du battement induit dans le primaire un courant  $I_1$ ; un thermocouple permet de mesurer ce dernier; une résistance sans self et sans capacité  $R = 1,3$  ohms, shunte le primaire et sert à dériver le courant  $i_1$ .

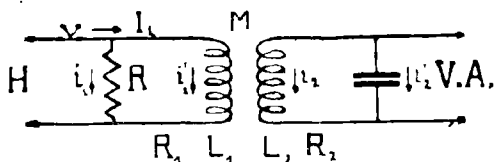


Fig. 14

En employant les notations de la même figure, on a

$$i_1 + i_1' = I_1 \quad (1)$$

$$R i_1 = (R_1 + j L_1 \Omega) i_1' + j M \Omega i_2 \quad (2)$$

$$R_2 i_2 = - j M \Omega i_1' \quad (3)$$

d'où l'on tire  $\frac{i_1'}{I_1} = \frac{R}{\sqrt{(R + R_1 + \frac{M^2 \Omega^2}{R_2})^2 + L_1^2 \Omega^2}} \quad (4)$

En appliquant cette formule, et en nous reportant aux valeurs numériques données précédemment, on trouve

$$\frac{i_1'}{I_1} \approx \frac{R}{L_1 \Omega} \approx \frac{1}{340} \quad (5)$$

En faisant varier  $I_1$  on peut faire l'étalonnage de l'appareil et tracer la courbe  $z = f(I_B)$  (Fig. 15). ( $z$  = déviation du V. A.).

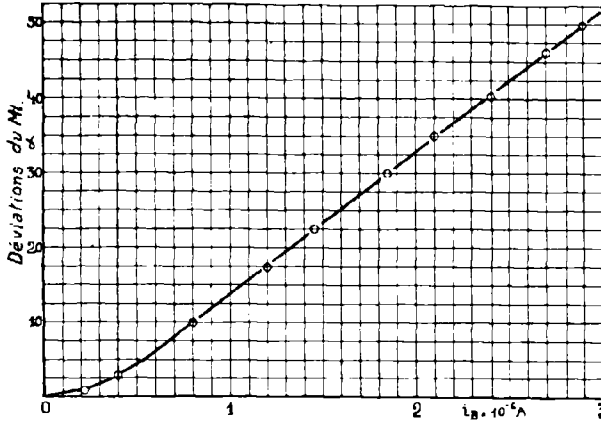


Fig. 15

Il est indispensable de régler l'hétérodyne exactement sur la fréquence du battement, ce qui se fait en reliant le primaire du transformateur, dont le secondaire est connecté au voltmètre amplificateur, à la plaque de la bigrille en fonctionnement ; on note la valeur de la capacité  $C_2$  pour laquelle le voltmètre amplificateur indique l'accord avec le battement.

On déconnecte ensuite ces éléments et on relie le primaire à une bobine, sur laquelle on fait agir une hétérodyne ; dans cette seconde mesure on fait varier la fréquence de l'hétérodyne jusqu'à obtenir l'accord, pour la même valeur de  $C_2$ .

### VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

Il reste à vérifier l'expression

$$I_B = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 i}{\partial u. \partial w} U_1 W_1$$

Il est bien entendu que nous supposons l'impédance du circuit de plaque négligeable.

On commence par mesurer les amplitudes du courant de battement en fonction de l'amplitude de tension oscillante  $W_1$ , avec  $V_0$ ,  $U_0$ ,  $W_0$ , comme paramètres et pour une amplitude du signal  $U_1$ , fixe et égale à 18 millivolts.

Les courbes de la Fig. 16 résument ces résultats.

On détermine ensuite la variation  $\frac{\partial i}{\partial u}$  en fonction de  $V_0$ ,  $U_0$  et  $W_0$ .

Finalement on calcule la valeur de  $\frac{\partial^2 i}{\partial u. \partial w}$  pour une variation de  $W_0$  donnée, autour d'un point de fonctionnement.

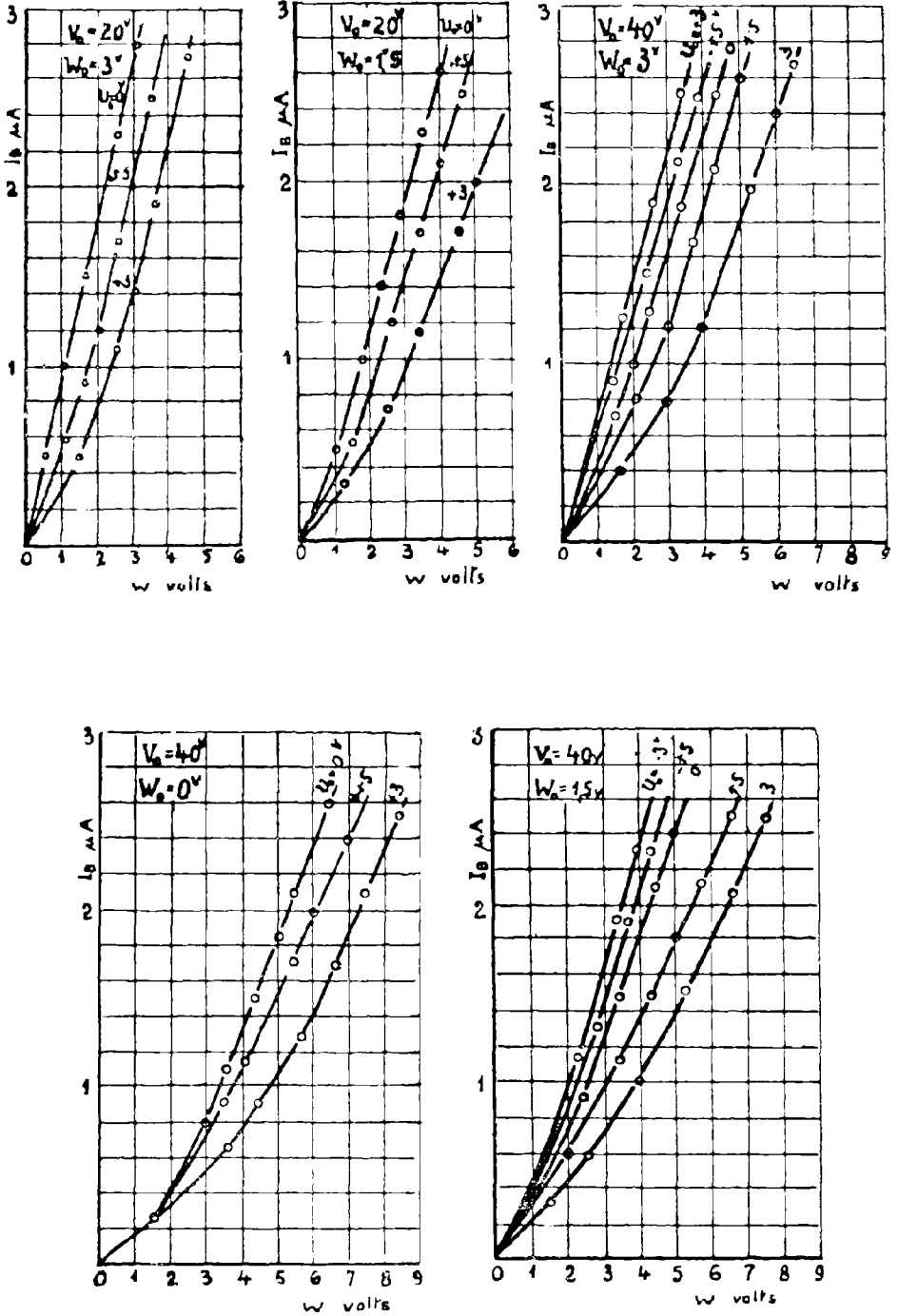


Fig. 16

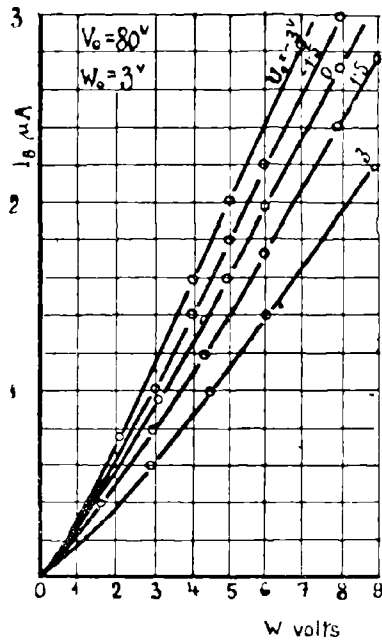
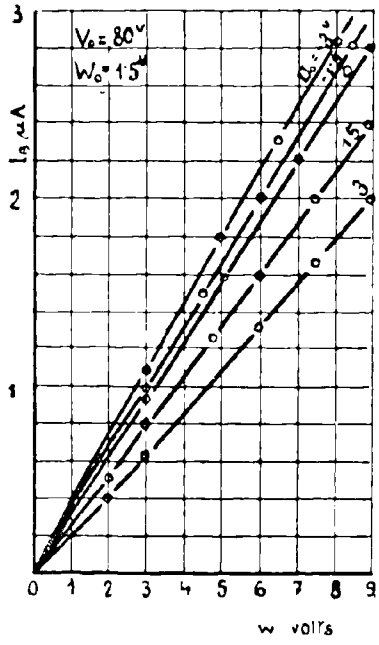
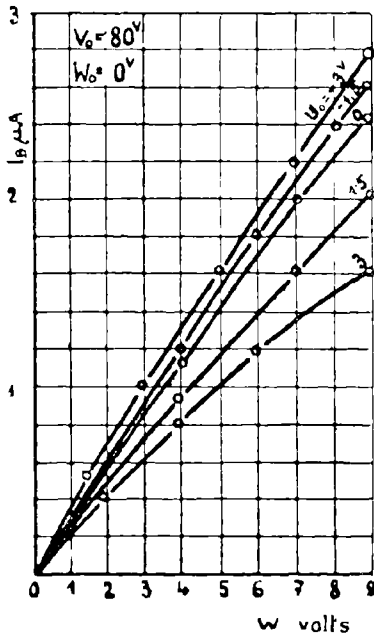


Fig. 16 (suite)

Occupons-nous d'abord de la détermination de  $\frac{\partial i}{\partial u}$  ; pour cela on fait appel à la méthode de Barkhausen (1). Le dispositif (Fig. 17)

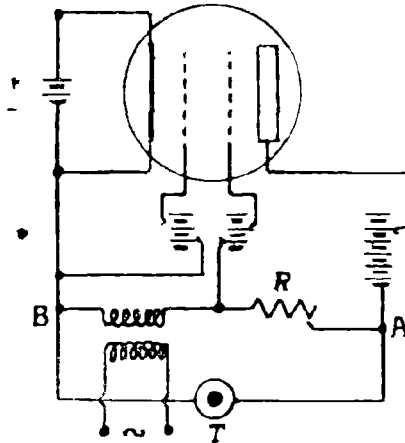


Fig. 17

comprend une source de fréquence audible, placée entre le filament et la grille externe, une résistance variable  $R$  placée entre la grille externe et la plaque ; enfin un téléphone  $T$  est intercalé entre le filament et la plaque. On fait varier  $R$  jusqu'à l'extinction au téléphone ; les points  $A$  et  $B$  sont alors au même potentiel.

Si  $dU$  désigne la variation de tension de grille externe et  $dI$  la variation correspondante du courant de plaque, on a

$$dU_{AB} = dU - R dI = 0$$

d'où l'on tire  $\frac{dI}{dU} = \frac{1}{R}$

Tandis que d'autre part, aucun courant ne passant dans la branche téléphone, on a en même temps  $\mu dI = K dU$  d'où  $\frac{1}{R} = \left( \frac{\partial i}{\partial u} \right)_{\text{stat}}$ . On donne à  $R$  des valeurs allant de 1.000 à 20.000 ohms ; c'est une résistance sans self et sans capacité.

Signalons qu'il faut que  $dU$  soit petit ; pour cela on interpose entre la source et la grille externe un transformateur, abaisseur de tension.

En faisant varier  $V_0$ ,  $U_0$  et  $W_0$  on trace les courbes représentées Fig. 18.

Pour compléter la méthode précédente, dont la sensibilité n'est plus suffisante lorsque  $dI$  devient très petit, et pour avoir une vérification des résultats obtenus, on détermine  $\frac{\partial i}{\partial u}$  directement à partir des caractéristiques statiques (Fig. 8).

(1) Barkhausen, *Elektronenroehren*, Verlag Hirzel, Leipzig, 1931.



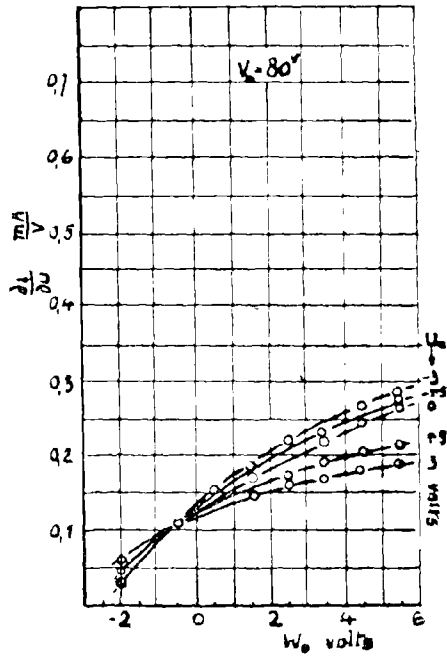
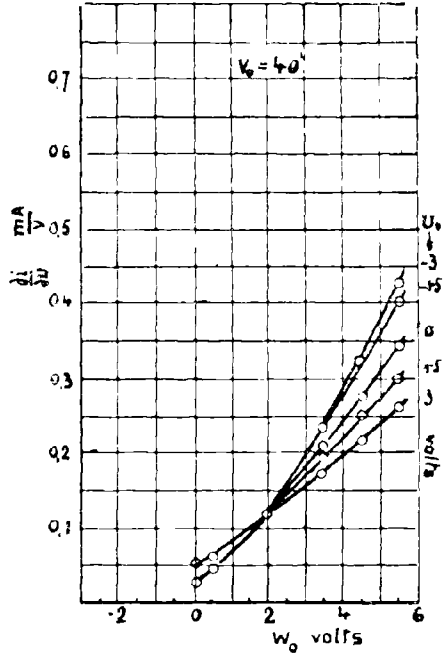
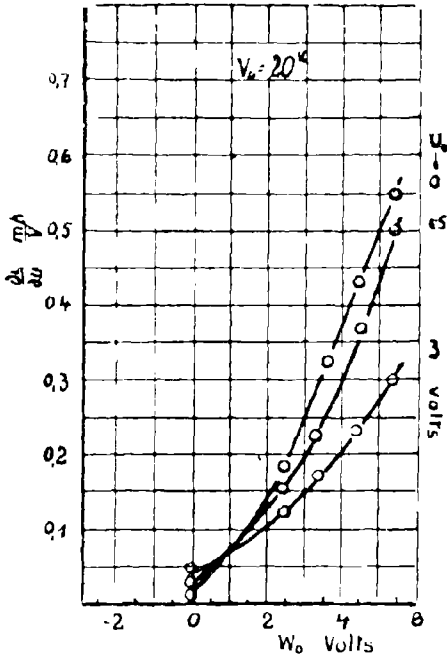


Fig. 18

Ces résultats sont résumés par les courbes de la Fig. 19.

La comparaison des résultats obtenus par ces deux méthodes nous montre qu'ils sont sensiblement les mêmes.

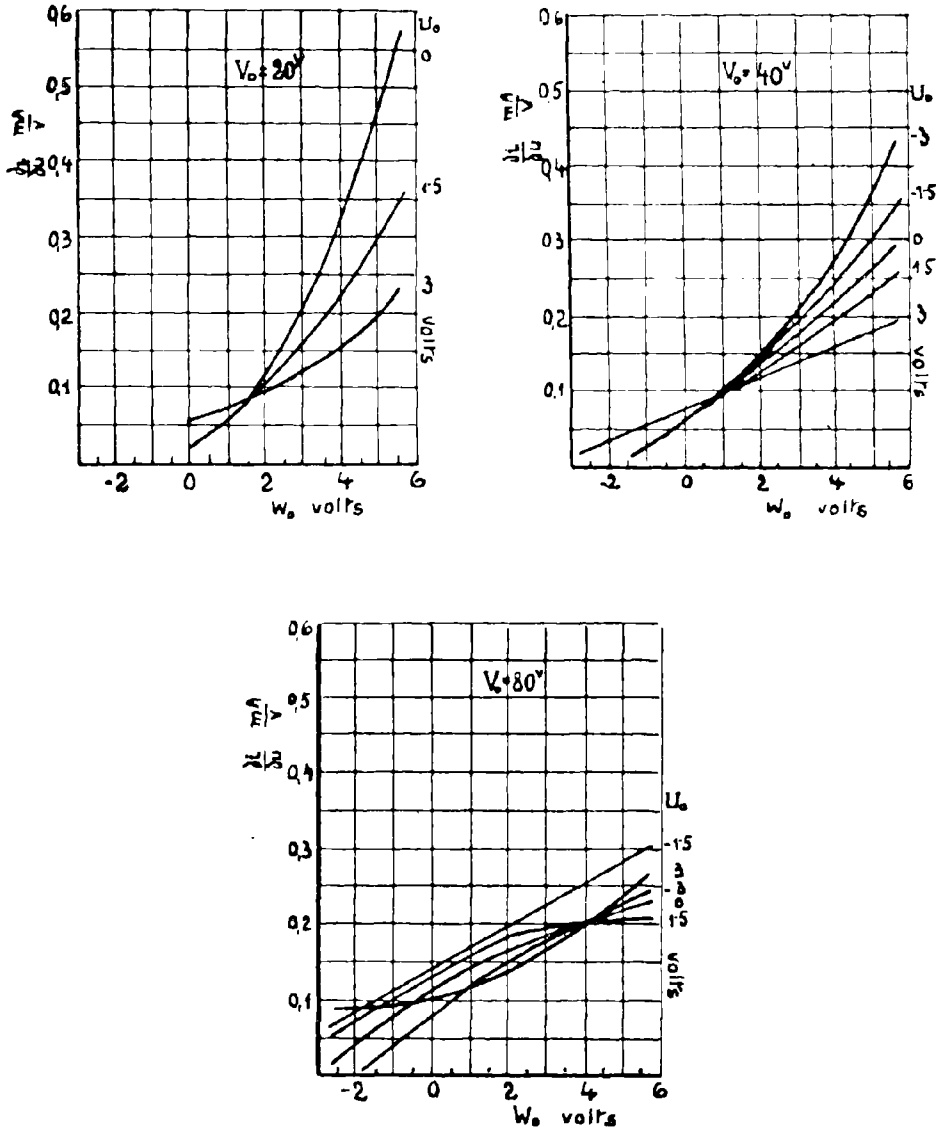


Fig. 19

Il nous reste maintenant à chercher la variation de  $\frac{\partial^2 i}{\partial u_0 \partial W}$

Supposons  $W_0 = 1,5$  volts et  $W$  variant entre  $-2,5$  et  $+5,5$  volts ; calculons la valeur moyenne de  $\frac{\partial^2 i}{\partial u. \partial w}$  entre les extrémités de l'intervalle considérée, en fonction de  $U_0$ , avec  $V_0$  comme paramètre. Ces résultats sont représentés sur la Fig. 20 ; les courbes pointillées sont établies à

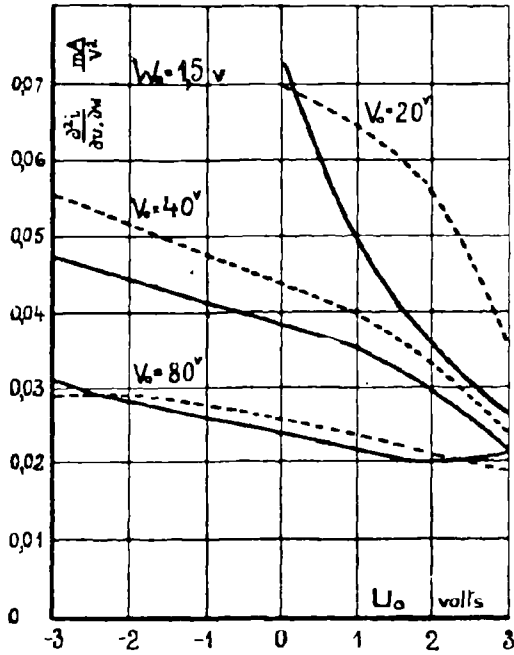


Fig. 20

partir de la méthode de Barkhausen, et celles en trait plein dérivent de l'autre méthode.

On constate, dans l'ensemble, une bonne concordance entre les valeurs numériques trouvées par les deux méthodes.

En définitive, on adopte des courbes moyennes.

Ces résultats acquis, traçons les courbes représentant le courant de battement en fonction de la tension de polarisation de grille externe pour  $W_0 = 1,5$  volts,  $V_0 = 20, 40$  et  $80$  volts,  $U_1 = 18 \sqrt{2}$  mV,  $W_1 = 3 \sqrt{2}$  volts et  $\left(\frac{\partial^2 i}{\partial u \partial w}\right)$  stat. calculé entre  $W = -2,5$  et  $+5,5$  volts (fig. 21).

Les courbes A se déduisent de la formule  $I_B = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 i}{\partial u \partial w} U_1 W_1$  ; les courbes observées sont les courbes B et la courbe C correspond au courant de battement déduit de la formule parabolique.

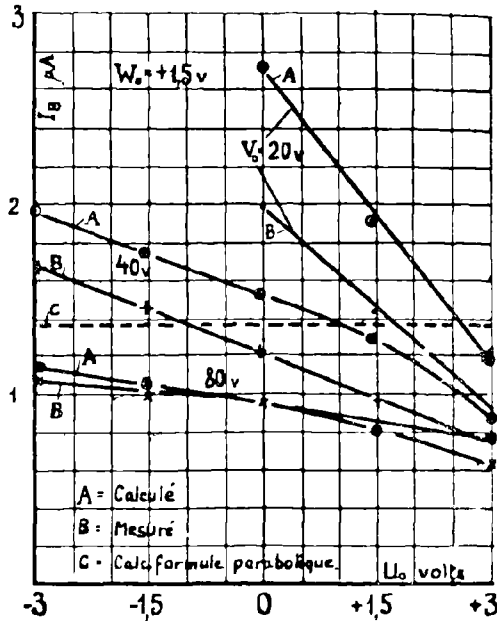


Fig. 21

On constate, dans l'ensemble, une concordance convenable entre les valeurs mesurées et celles que donne la première formule.

On remarque que la formule parabolique fournit un ordre de grandeur raisonnable.

La différence entre les valeurs numériques expérimentales et celles que l'on trouve en appliquant la première formule, semble imputable au fait que nous avons adopté pour  $\frac{\partial^2 i}{\partial u \partial w}$  des valeurs moyennes, que nous avons réduit l'oscillation de grille interne à son terme fondamental, etc.

Enfin, signalons que dans le cas étudié on pouvait disposer, aux bornes du secondaire du transformateur M. F., d'une tension efficace de l'ordre de 0,3 volt. Si l'on compare cette tension à celle que l'on applique à la grille externe, on trouve qu'elles sont dans le rapport 1700 environ; ceci montre l'intérêt que présente la bigrille pour cette application.

## CONCLUSION

---

En réalisant le montage, dans lequel l'oscillation locale est produite par couplage inductif du circuit oscillant de grille interne avec le circuit de plaque, j'ai constaté qu'une variation de la tension de polarisation de grille externe modifiait beaucoup l'amplitude d'oscillation sur la grille interne ; cette variation étant souvent linéaire, il en résulte que la bigrille semble pouvoir être une excellente modulatrice.

Nombre d'auteurs se sont basés sur ce fait pour expliquer le mécanisme du changement de fréquence.

En effet, en appliquant à la grille externe un signal de pulsation  $\omega$  et en créant une oscillation locale sur la grille interne de pulsation  $\omega'$ , on recueille dans le circuit de plaque un courant de pulsation  $[\omega - \omega']$ . Si l'on admet le régime permanent toujours établi on peut, en se basant sur l'hypothèse précédente, calculer l'amplitude du courant de battement ; ce calcul donne un ordre de grandeur en accord avec les résultats expérimentaux.

Or, la fréquence du signal est tout à fait du même ordre de grandeur que celle de l'oscillation locale.

Cette simple remarque conduit à abandonner l'hypothèse proposée, car on ne peut admettre la perturbation d'un phénomène permanent par un phénomène franchement sinusoïdal et ayant sensiblement la même fréquence que lui.

Tout se passe donc comme si les deux tensions  $u_1$  et  $w_1$  étaient pratiquement indépendantes ; la vérification expérimentale confirme cette conclusion.

Pour expliquer l'apparition du courant de battement dans le circuit de plaque, j'invoque le fait que les caractéristiques statiques sont courbes dans tout le domaine d'utilisation normale.

La conséquence immédiate de cette propriété est l'apparition dans l'expression du courant de plaque, d'un terme en  $u_1 w_1$  correspondant à un courant de battement.

Malheureusement, la formule parabolique ne convient que dans une région limitée. En particulier  $\frac{\partial^2 i}{\partial u \partial w}$  cesse d'être une constante, elle est fonction de  $V_0$ ,  $U_0$  et  $W_0$ .

Les considérations précédentes nous amènent à définir le principe du changement de fréquence de la façon suivante :

Le courant de battement provient du fait que la lampe amplifie une très faible tension sinusoïdale  $u_1 = U_1 \cos \omega t$ , appliquée à sa grille externe, ses constantes étant considérablement modifiées, avec la pulsation  $\omega'$ , par déplacement du point de fonctionnement sous l'influence du potentiel instantané de grille interne.

Enfin, je voudrais signaler qu'en pratique il conviendra d'opérer avec des tensions de plaques relativement faibles pour que le rendement de la bigrille en changeuse de fréquence soit intéressant.

-----

# SECONDE THÈSE

---

## PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

L'influence des impuretés sur les propriétés magnétiques du fer.

---

*Vu et Approuvé :*

Lille, le 16 Mars 1934.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

A. MAIGE

*Vu et permis d'imprimer :*

Lille, le 21 Mars 1934.

LE RECTEUR DE L'ACADEMIE DE LILLE,

A. CHATELET