

Buv 202053

50376
1970

202

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES
DE SCIENCES PHYSIQUES

Mention : Electronique

--o O o--

ETUDE ET REALISATION
D'UN OSCILLATEUR A DIODE A AVALANCHE
A LARGE BANDE DE FREQUENCE

--o O o--



Par Pierre Marie LEBRUN
Ingénieur I. D. N.



A LILLE, le 9 Juillet 1970

S O M M A I R E

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE : DIODE AVALANCHE EN OSCILLATION

I. Présentation théorique	1
II. Dispositif expérimental d'oscillation	2
III. Etude expérimentale de la puissance émise	3
IV. Caractérisation en puissance	4
IV.1. Corrélation entre la puissance et la résistance négative en régime linéaire	5
IV.2. Relation entre la puissance émise et la résistance de charge d'espace	6
IV.3. Dispositif d'essai pour la caractérisation	6

DEUXIEME PARTIE : OSCILLATEUR A LARGE BANDE DE FREQUENCE

I. Exposé du problème. Recherche d'une structure	8
I.1. Cellule guide d'onde	8
I.2. Cellule coaxiale guide	9
I.3. Cellule coaxiale-guide à transition standard	10
II. Conditions d'oscillation à large bande de fréquence. Mesure d'impédance de diodes en bande X	12
III. Etude de l'impédance ramenée par un système de slugs. Possibilités d'oscillation	13
III.1. Slug unique mobile	13
III.2. Ensemble de 2 slugs mobiles	16
III.3. Equipage mobile à 2 slugs	17
IV. Réalisation d'un oscillateur à bande étroite de fréquence (1 à 2 GHz)	18
V. Réalisation d'un oscillateur à large bande de fréquence (4 à 5 GHz)	19

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

L'étude présentée dans ce rapport a été effectuée dans les laboratoires du Centre hyperfréquence des milieux condensés. Elle contribue à la connaissance des propriétés des diodes à avalanche, et à leur utilisation comme source hyperfréquence. Un certain nombre d'études antérieures effectuées par ALLAMANDO, VAESKEN, DOUMBIA et résumées en ⁽¹⁾ portent sur le fonctionnement des diodes en régime non linéaire.

Nos recherches ont un triple but : élargir le champ des vérifications expérimentales, élaborer des méthodes simples de caractérisation en puissance, et enfin, concevoir un oscillateur à large bande de fréquence. Les deux premiers aspects sont développés dans la première partie de ce travail, la deuxième partie traite de la conception de l'oscillateur et de sa réalisation.

I. P R E S E N T A T I O N T H E O R I Q U E

Les études antérieures sur les diodes semiconductrices à avalanche et temps de transit nous incitent à représenter leur partie active par un circuit équivalent d'impédance Z_d .

$$Z_D = R_D + j X_D$$

On peut dire ⁽²⁾ que la résistance négative dépend du courant de polarisation I_0 , de la fréquence, de la tension hyperfréquence et de l'angle de transit. On tient compte du substrat par l'introduction dans le schéma de la diode d'une résistance série R_s .

La diode oscille dans un circuit hyperfréquence dont l'impédance doit être le complexe conjugué de l'impédance interne de la diode. En pratique on veut recueillir la puissance aux bornes d'une résistance d'utilisation qui est voisine de l'impédance caractéristique du guide. Celle-ci, trop élevée, n'est pas adaptée à la diode et nécessite un transformateur d'impédance. L'ensemble peut être représenté dans le plan de référence passant par la diode, par une résistance R_p , une réactance X_p et une résistance R_{HF} qui tient compte des pertes dans le circuit hyperfréquence.

Le schéma d'ensemble du circuit est représenté fig. 1.

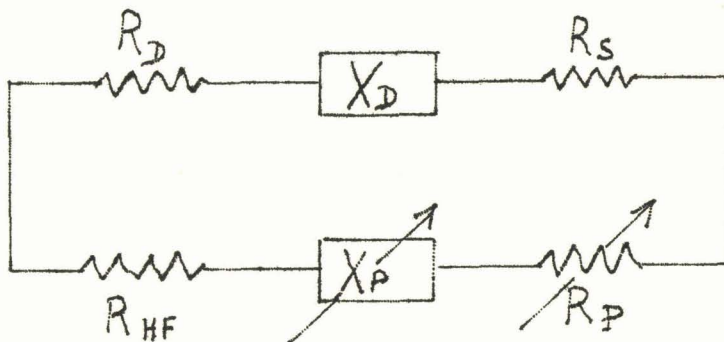


Figure 1

La résistance totale du circuit est :

$$R_T = R_D + R_S + R_{HF} + R_P$$

et sa réactance : $X_T = X_D + X_P$

On obtient une oscillation permanente lorsque $R_T = 0$

Donc si :

$$|R_D| = R_S + R_{HF} + R_P$$

la fréquence d'oscillation F est définie par :

$$|X_D| = X_P$$

Pour un courant donné, $|R_D|$ décroît avec le niveau hyperfréquence I_1 , et l'oscillation augmente jusqu'à ce que $|R_D| = R_S + R_{HF} + R_P$.

La puissance émise est alors égale à $P_E = |R_D| \frac{I_1^2}{2}$ et la puissance utile est $P_u = P_E - (R_S + R_{HF}) \frac{I_1^2}{2}$

En fait la puissance émise doit tenir compte des courants circulants dans la diode aux fréquences harmoniques (3).

II. DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'OSCILLATION

Dans la pratique, quand on veut faire une étude expérimentale on utilise une structure hyperfréquence de type coaxial qui seule permet de connaître les impédances réellement vues par la diode. Le transformateur d'impédance est réalisé au moyen d'un système d'un ou deux slugs d'impédance caractéristique inférieure à celle de la structure. Nous faisons l'étude de l'impédance ramenée par ces slugs dans la deuxième partie.

Pour la partie de notre travail consacrée aux vérifications de formules théoriques et à la caractérisation nous utiliserons donc le dispositif schématisé fig. 2.

La structure coaxiale d'oscillation est suivie d'une ligne unidirectionnelle de haut isolement, et d'un té de polarisation.

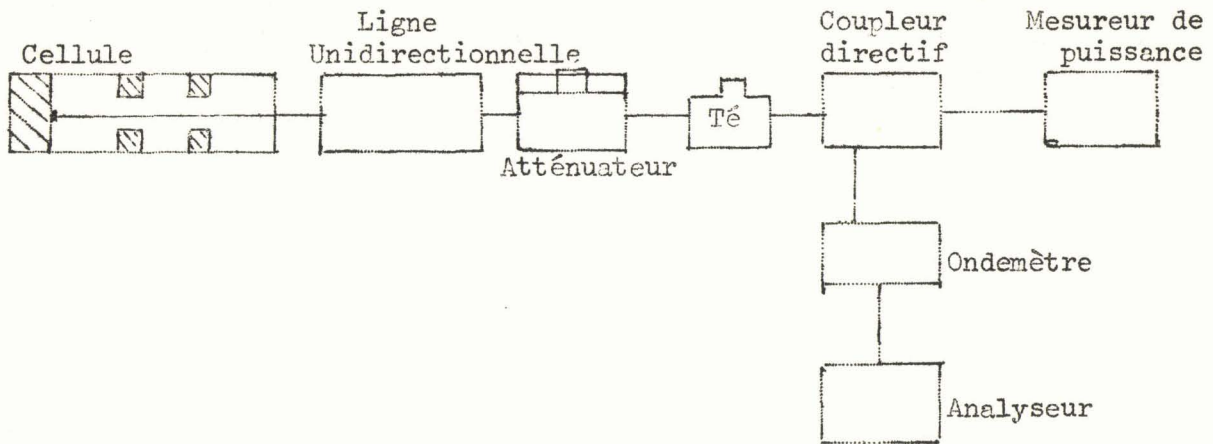


Figure 2

Un coupleur 10 dB permet de faire à la fois une mesure de puissance et de fréquence. L'analyseur nous renseigne sur la qualité du spectre d'émission.

III. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA PUISSANCE EMISE

Les considérations théoriques faites au paragraphe I, nous montrent que la puissance émise par une diode A.T.T. varie avec le courant de polarisation, la résistance de charge ramenée dans le plan de la diode et la fréquence. Nous avons effectué un certain nombre de mesures qui permettent de compléter les vérifications expérimentales entreprises par d'autres auteurs ⁽⁴⁾.

La théorie non linéaire développée dans Acta Electronica ⁽¹⁾ prévoit que pour une valeur de la résistance ramenée R_p , l'oscillation ne se produit que si le courant est supérieur à une valeur de seuil I_{start} , qui croît avec R_p pour une diode donnée. La puissance augmente ensuite comme le carré du courant et passe par un maximum pour une valeur du courant I_{OM} qui croît également avec la résistance ramenée. On peut donc définir pour chaque valeur du courant une résistance ramenée optimale R_{PM} qui donne une puissance maximale. Cette puissance croît d'abord avec le courant et passe par un maximum au voisinage du courant d'avalanche ; nous avons entrepris de vérifier qualitativement ces divers éléments.

La figure 3 représente un certain nombre de courbes donnant la variation de la puissance utile en fonction du courant pour diverses diodes alimentées en continu ($I_0 < 60 \text{ mA}$). Dans la première partie de ces courbes, on constate que la puissance dépend de façon sensiblement linéaire du carré du courant et que les courbes sont très différentes d'une diode à l'autre.

Les courants d'alimentation des diodes ne sont pas suffisants pour faire apparaître nettement les maxima de puissance, c'est pourquoi nous avons entrepris une étude où la diode est polarisée en impulsion, donc peut supporter des courants plus importants. Les résultats sont donnés fig. 4 où l'on a représenté la variation de la puissance obtenue en fonction du courant pour différentes résistances de charge ; l'allure des courbes est bien conforme aux considérations théoriques précitées. Sur ce diagramme nous avons tracé la courbe enveloppe des courbes précédentes qui donne l'évolution de la puissance maximum P_{uM} en fonction du courant. Par interpolation on pourra définir pour chaque valeur de I_0 la valeur de la résistance optimale, qui croît avec le courant comme le prévoit la théorie.

Par exemple, pour la diode BI + 10 :

$I_0 = 110 \text{ mA}$	$R_{PM} = 5,3 \Omega$
$I_0 = 140 \text{ mA}$	$R_{PM} = 6,9 \Omega$
$I_0 = 170 \text{ mA}$	$R_{PM} = 8,5 \Omega$
$I_0 = 190 \text{ mA}$	$R_{PM} = 10 \Omega$
$I_0 = 210 \text{ mA}$	$R_{PM} = 11,5 \Omega$

IV. CARACTERISATION EN PUISSANCE

Lorsqu'on utilise une diode avalanche en oscillation on cherche habituellement à obtenir le maximum de puissance sur la bande de fréquence la plus large possible.

Il existe pour chaque diode une impédance de charge Z_p qui donne la puissance optimale à fréquence donnée. Pour connaître cette puissance et sélectionner les diodes il faut faire de nombreux essais jusqu'à l'obtention du meilleur rendement. Habituellement ils sont effectués dans une cellule Iglesias

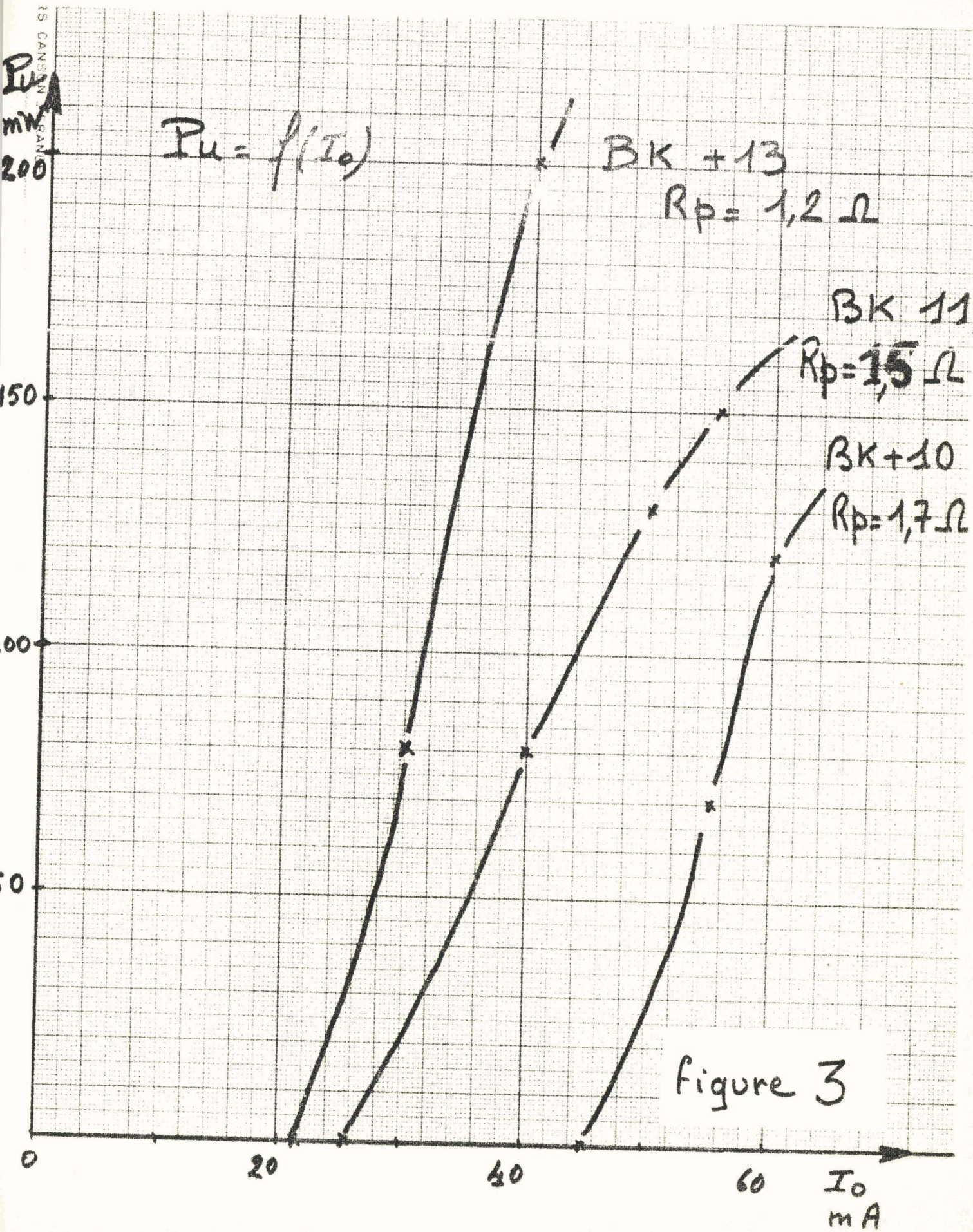
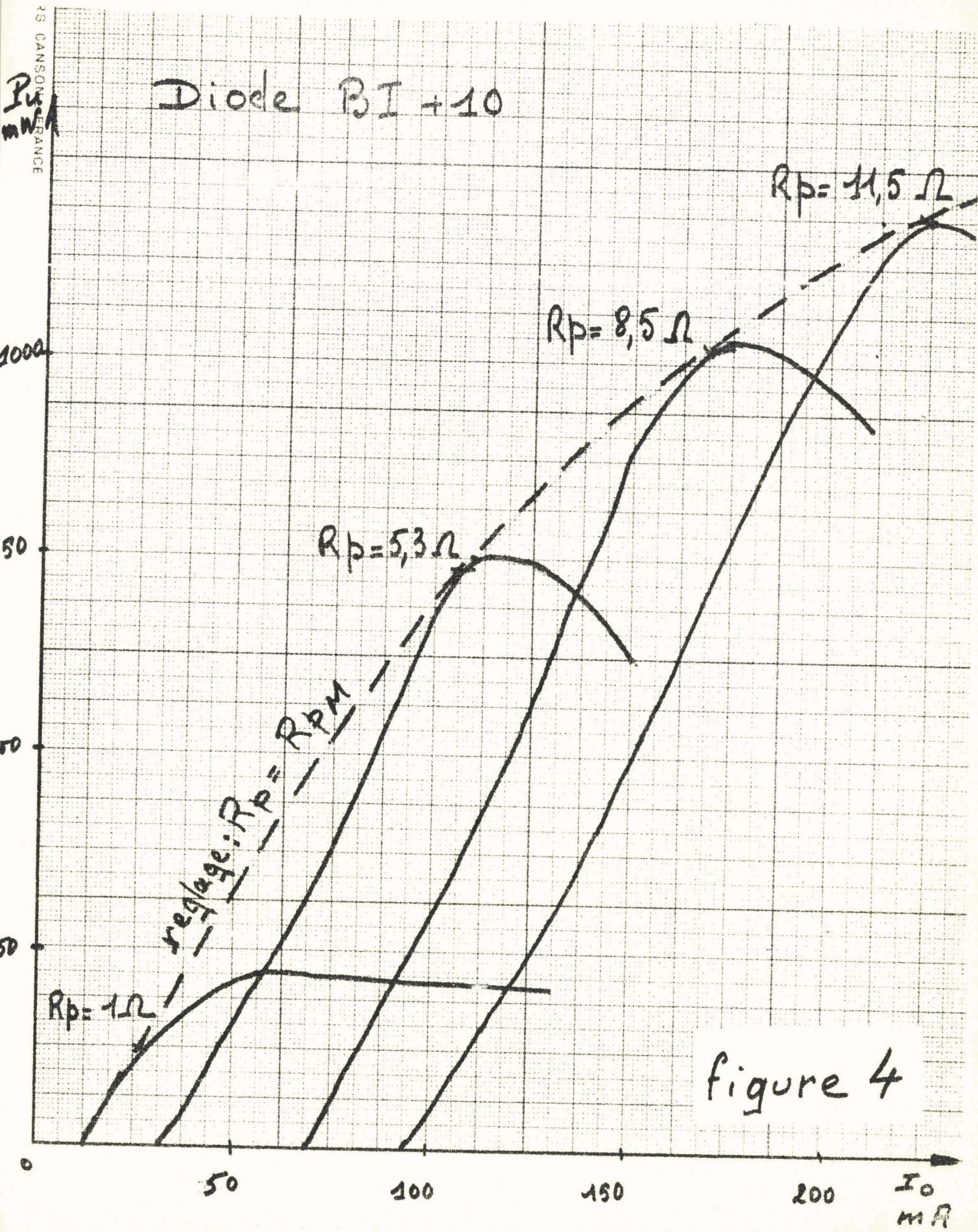


figure 3



à deux slugs mobiles. Nous prendrons la valeur obtenue par cette méthode, comme valeur caractéristique de la puissance des diodes.

Cependant cette méthode est très lourde et pose des problèmes technologiques. Nous cherchons donc, une corrélation entre la puissance émise par la diode et ses paramètres facilement mesurables, puis nous proposons une structure simple pour réaliser les essais.

IV.1. Corrélation entre la puissance et la résistance négative en régime linéaire

Il semble probable que la puissance émise en oscillation soit d'autant plus forte que la résistance R_D présentée par la diode en régime linéaire est plus négative. Pour vérifier cette hypothèse nous utilisons le relevé systématique de l'impédance présentée par la diode à 7,7 GHz, en fonction du courant de polarisation. Une relation simple entre la puissance et la résistance négative est difficile à mettre en évidence et nous avons préféré classer les diodes par catégories pour $I_0 = 40$ mA.

Sur 27 diodes d'une même série BK⁺, ayant une largeur moyenne $W - S$ de 2,73 microns on obtient :

R_D relevé à 7,7 GHz	Nb de diodes	Puissance moyenne obtenue en oscillation
$ R_D < 1$	5	65 mW
$1 < R_D < 3$	7	90 mW
$3 < R_D < 4$	11	120 mW
$4 < R_D < 5$	4	200 mW

Il faut noter que la valeur de la résistance mesurée est en fait $R_D + R_S$ et que son relevé à partir d'abaque de Smith est peu précis. Cette méthode permet d'avoir un ordre de grandeur de la puissance à 50 % près.

IV.2. Relation entre la puissance et la résistance de charge d'espace

(5) En nous appuyant sur des études théoriques antérieures nous essayons d'établir une corrélation entre la puissance maximum et la valeur de la résistance de charge d'espace R_c .

On peut mettre la puissance utile sous la forme :

$$P_u = \frac{Qv}{\omega \cdot W} \cdot I_0^2 \chi(\theta) R_c F(I_0/I_{start})$$

où $Q = \frac{1}{\omega C(R_s + R_{HF})}$ est le coefficient de qualité de la diode.

$$d'où \quad P_u = \frac{v I_0^2}{\epsilon \omega^2 (R_s + R_{HF})} \cdot \frac{R_c}{S} \chi(\theta) F(I_0/I_{start})$$

On en déduit que pour des diodes de même type, à courant de polarisation identique, la puissance utile est proportionnelle à $\frac{R_c}{S}$. Comme R_c est lui-même proportionnel à $\frac{1}{S}$ la puissance hyperfréquence varie comme le carré de la densité de courant : $\frac{I_0^2}{S^2}$

Pour la vérification expérimentale nous disposons d'indications sur la puissance émise pour une cinquantaine de diodes de type P^+NN^+ autour de 10 GHz pour $I_0 = 50$ mA. En portant $P = f(R_c/S)$ et en faisant des moyennes par série de diodes on obtient sensiblement une droite (fig. 5). En réalité nous avons utilisé la variable $R'_c = R_c \times (\frac{100}{\phi})^2$, avec ϕ diamètre de la jonction en microns. On peut expliquer la dispersion autour de cette droite par le fait que les fréquences d'essai varient autour de 10 GHz (10 %) et que le $F(I_0/I_{start})$ peut varier entre 0,2 et 0,8 (6). Toutefois on peut dire que cette loi est vérifiée à 20 % près.

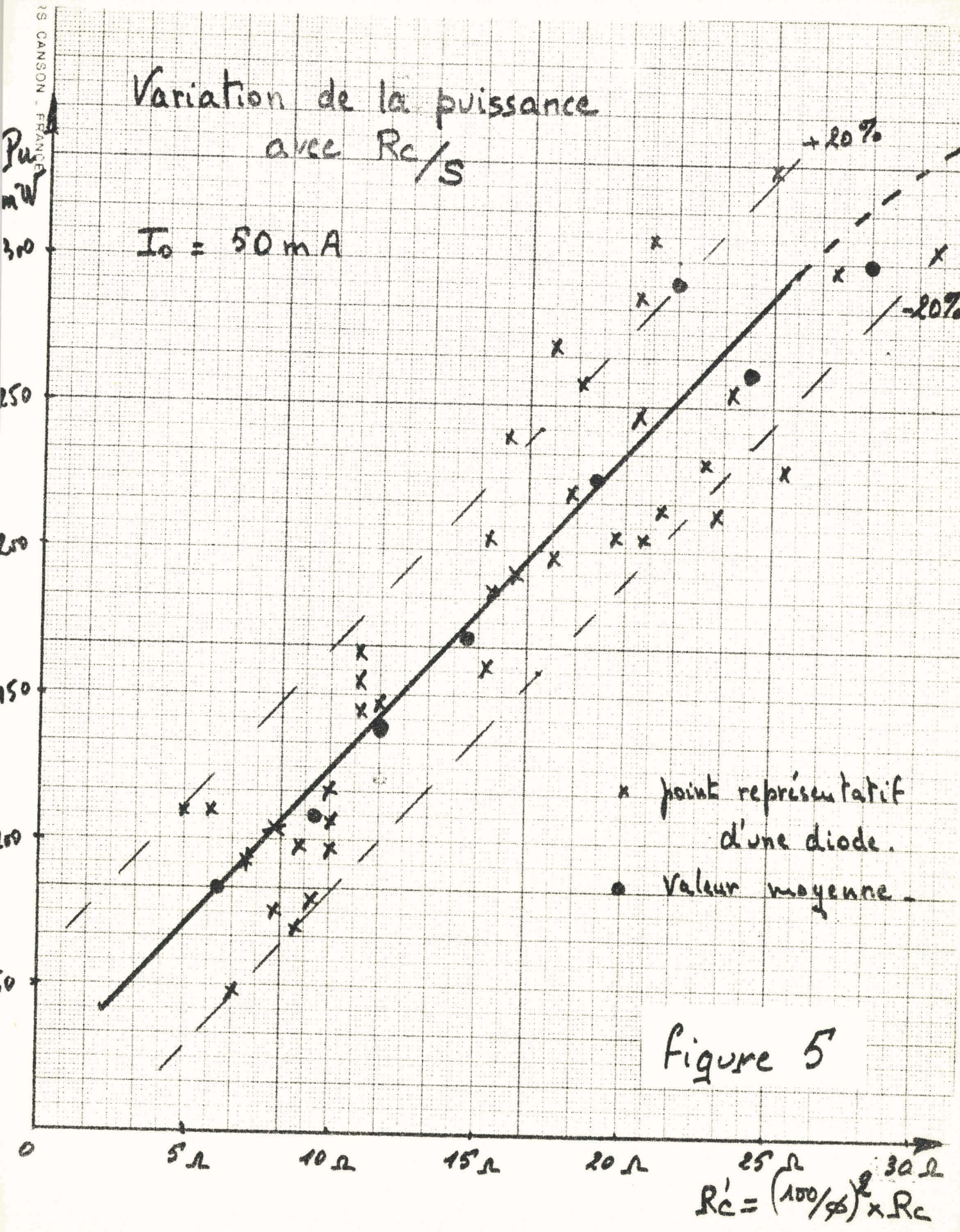
IV.3. Dispositif d'essai pour la caractérisation

Nous avons vu que les deux méthodes précédentes laissent une incertitude sur la puissance émise, elle peut être levée au moyen d'un dispositif d'essai que nous avons voulu le plus simple possible.

Variation de la puissance avec R_c/s

$I_0 = 50 \text{ mA}$

Puissance
mW



x point représentatif d'une diode.
• valeur moyenne.

Figure 5

$$R_c' = \left(\frac{100}{\phi}\right) \times R_c$$

La puissance de référence est celle qui est fournie par un système de deux slugs mobiles ; nous constatons qu'avec l'ensemble constitué d'un slug fixe et d'un slug mobile nous nous en rapprochons très sensiblement.

De nombreuses mesures ont été effectuées et le tableau ci-dessous donne la comparaison entre les différents systèmes pour quelques diodes polarisées à 50 mA.

Diodes	Puissance avec 1 slug fixe	Puissance avec 1 slug mobile	Puissance avec 1 slug fixe et 1 mobile	Puissance de référence avec 2 slugs mobiles
BK 11	125 mW	130 mW	210 mW	230 mW
BK +10	165 mW	170 mW	280 mW	280 mW
BK 12	125 mW	150 mW	220 mW	230 mW
BK +12	160 mW	200 mW	290 mW	300 mW
BI +10	200 mW	230 mW	290 mW	290 mW

En conclusion, on peut dire que suivant la précision souhaitée dans la caractérisation des diodes, on choisira l'une ou l'autre méthode, en sachant que la troisième est la plus précise (10 %) mais aussi la plus longue à réaliser.

DEUXIEME PARTIE

OSCILLATEUR A LARGE BANDE DE FREQUENCE

I. EXPOSE DU PROBLEME. RECHERCHE D'UNE STRUCTURE

Nous devons réaliser dans le cadre de ce travail, un oscillateur à large gamme de fonctionnement, comprise entre 7 et 12 GHz. La conception de ce dispositif est soumise aux impératifs suivants :

- a) La puissance doit être aussi grande et aussi constante que possible dans toute la gamme de fonctionnement.
- b) La variation de fréquence doit être obtenue si possible au moyen d'un seul paramètre de réglage.

Dans ce but, nous avons envisagé un certain nombre de structures.

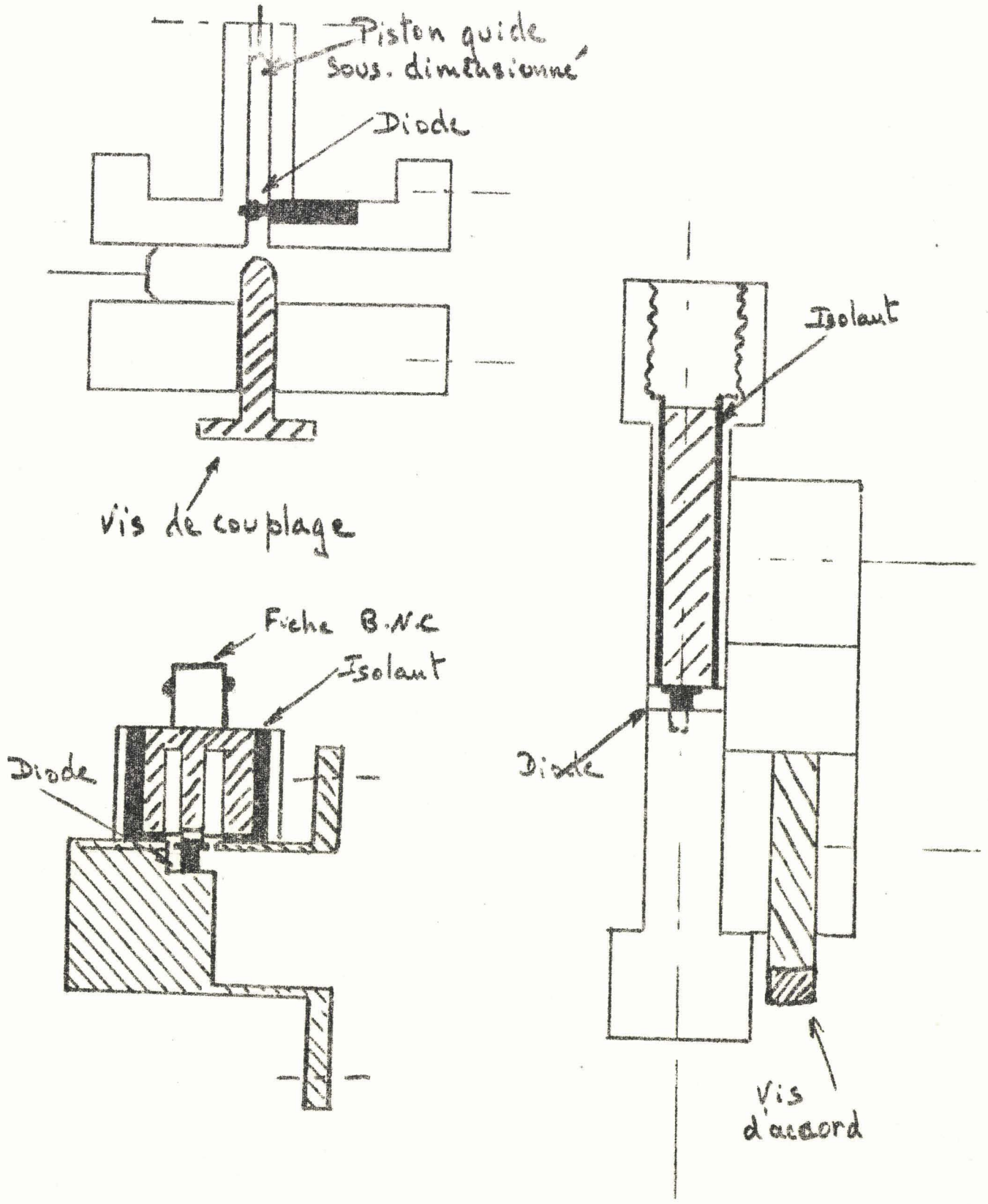
I.1. Cellule guide d'onde

Dans la gamme de fréquence (7 - 12 GHz), il semble à priori, logique de faire osciller la diode dans une structure guide-rectangulaire. Dans une telle structure, les dimensions de la diode sont très inférieures à celles du guide lui-même et les impédances équivalentes dans le guide (si tant est qu'on puisse les définir) sont élevées ; il semble normal de placer la diode dans une structure sous-dimensionnée, en résolvant au mieux les problèmes de polarisation, de découplage et d'accord du circuit hyperfréquence.

Nous avons essayé des dispositifs de différents types et nous en donnons les schémas figure 6.

Des mesures systématiques ont été effectuées sur ces cellules, en réglant au mieux les éléments d'accord : les puissances obtenues et l'accordabilité de ces dispositifs restent très inférieures à celles obtenues en structure coaxiale (cavité Iglesias). Ces résultats peuvent apparaître surprenants et une explication complète ne peut en être donnée ; on peut penser cependant

Cellules Guide d'onde



que l'impédance vue par la diode pour les fréquences harmoniques et sous-harmoniques n'est pas favorable.

I.2. Cellule coaxiale - guide

Nous avons envisagé ensuite la solution d'une structure coaxiale à un ou plusieurs slugs. Pour obtenir une variation de fréquence il faut déplacer les slugs dans la cellule, ce qui pose de nombreux problèmes de réalisation

- contacts des slugs mobiles avec les parois du guide
- existence d'une fente pour permettre le déplacement des slugs
- complexité du système mécanique de déplacement.

De plus il est nécessaire de prévoir une transition coaxial-guide pour l'utilisation du signal produit dans cette bande.

Nous avons résolu en partie ces problèmes avec le dispositif représenté en coupe figure 7.

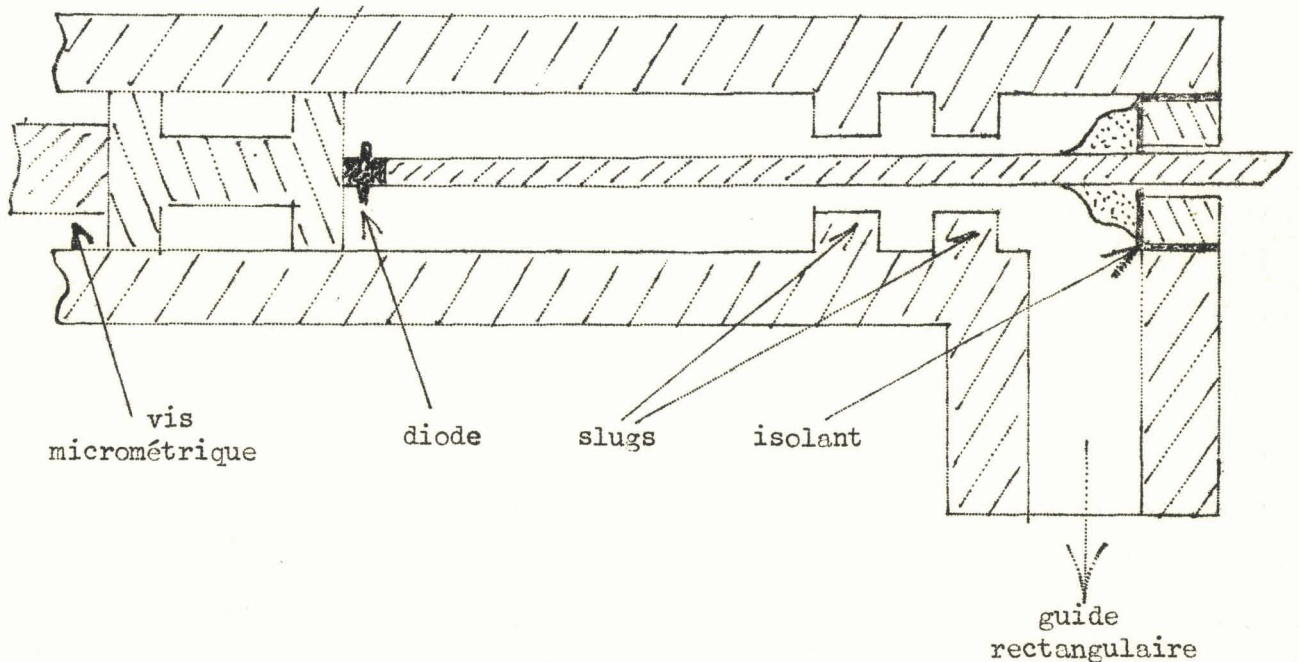


Figure 7

La diode est portée par un court-circuit mobile et les slugs sont solidaires de la paroi du tube. L'ensemble de la cellule coaxiale est lié directement à une transition coaxial-guide, le conducteur central coulissant dans l'élément type "Bouton de Porte" de cette transition. Après plusieurs essais, notre transition présente une perte d'insertion inférieure à 2 dB dans toute la bande 8 - 12 GHz. Ce court-circuit mobile qui porte la diode doit lui-aussi être de très bonne qualité, car il est placé dans une zone de courant maximum ; les meilleurs résultats ont été obtenus avec un piston à piège.

Malgré ces éléments favorables, les essais réalisés sont peu encourageants. Les variations de la puissance produite en fonction de la fréquence sont très irrégulières (fig. 8). Ces résultats nous amènent à penser que l'impédance équivalente vue du second slug ne présente pas un coefficient de réflexion suffisamment faible à toutes les fréquences. En effet, en utilisant une cellule Iglesias classique nous avons pu mettre en évidence cette influence :

- La figure 9 représente la courbe de puissance obtenue quand la cellule est liée directement à une transition coaxial-guide standard : cette courbe est très irrégulière et présente des minimums nuls.

- La figure 10 représente la courbe de puissance obtenue dans les mêmes conditions si l'on intercale un atténuateur de 10 dB entre la cellule et la transition : la courbe est beaucoup plus régulière.

Il semble donc capital que l'impédance vue par le système de slugs présente un T.O.S. très faible (inférieur à 1,1). Comme il était très difficile d'améliorer les caractéristiques de la transition dans des proportions importantes, nous avons abandonné cette solution.

1.3. Cellule coaxiale à transition standard

Nous avons alors essayé de résoudre les problèmes posés par l'utilisation d'une cellule Iglesias classique. La structure mise au point est représentée figure 11. Le diamètre intérieur du coaxial est égal à 10 millimètres et celui du conducteur central à 4 millimètres. La diode est placée dans une pince en cuivre solidaire d'un radiateur. Les slugs utilisés

NSON - FRANCE

Influence de l'adaptation.

figure 8

P

mW

100

50



figure 9

P

mW

100

50



figure 10

P

mW

100

50



7

8

9

10

F (GHz)

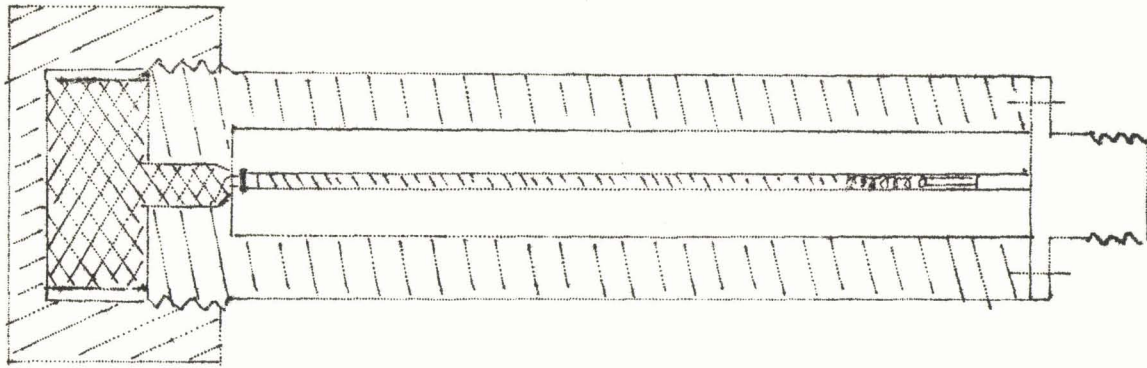


Figure 11

sont isolés du conducteur extérieur par une pellicule de téflon très mince qui assure le glissement. Pour éviter des réglages complexes, nous avons utilisé essentiellement des dispositifs à un slug mobile, on a deux slugs mobiles maintenus à une distance constante l'un de l'autre. Une fente de 1 millimètre est pratiquée dans la cellule et permet la liaison de l'ensemble des slugs avec une bague extérieure. Le déplacement de la bague est assuré par un dispositif mécanique et entraîne le déplacement conjoint des slugs. La cellule est suivie d'un té de polarisation optimisé, et d'une ligne unidirectionnelle à haut isolement (> 20 dB). L'ensemble est relié à une transition coaxial-guide à large bande et les mesures de puissance et de fréquence sont effectuées à la suite de cette transition (fig. 12).

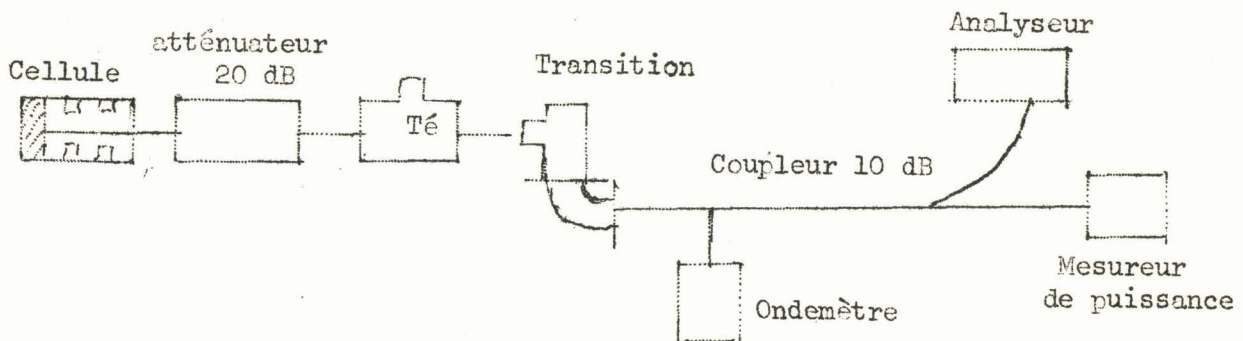


Figure 12

Ne disposant pas de ligne unidirectionnelle dans cette bande, nous avons utilisé un atténuateur de 20 dB.

II. CONDITIONS D'OSCILLATION A LARGE BANDE DE FREQUENCE. MESURES D'IMPEDANCES DE DIODES EN BANDE X.

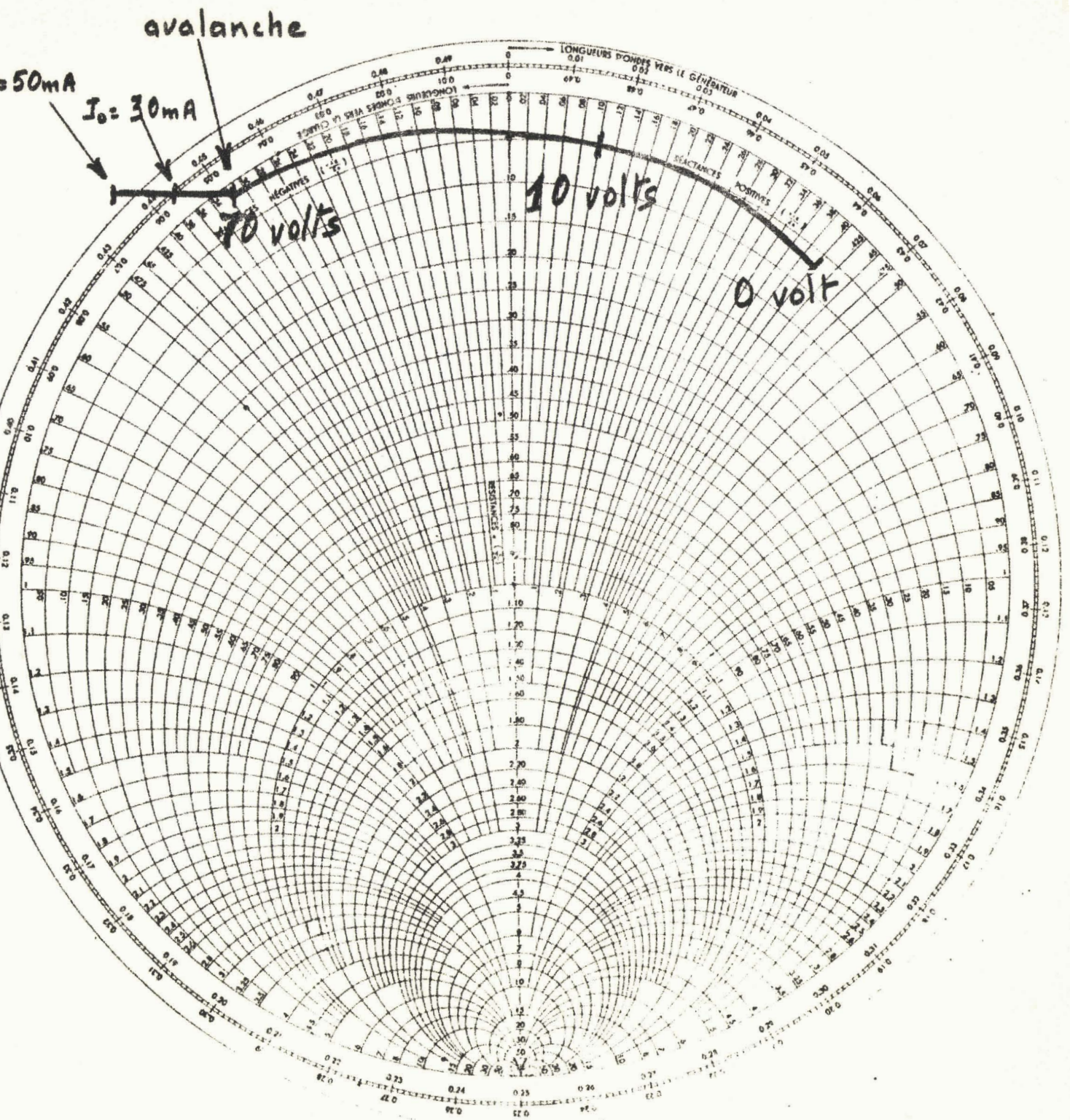
Les conditions d'oscillation d'une diode à avalanche rappelées dans la première partie, montrent l'importance des paramètres R_D et X_D de la diode. Ceux-ci dépendent du courant I_0 , de la fréquence et de la puissance émise. Pour connaître la combinaison de slugs optimale, il est bon de connaître dans cette bande de fréquence, tant l'impédance présentée par la diode, que celle ramenée par le système de slugs.

Les variations de l'impédance Z_D en fonction du courant de polarisation et de la fréquence ont été étudiées au mesureur automatique d'impédance. Les valeurs mesurées sont relatives à l'ensemble de la diode et tiennent compte de la résistance série et des éléments parasites. La fig. 13 donne un exemple de courbe à 9 GHz pour la diode BK + 20 traduisant l'évolution de l'impédance en fonction du courant de polarisation ; on y voit nettement apparaître la résistance négative de la diode.

A partir de telles courbes, nous obtenons les variations de X/R_0 et R/R_0 , pour différentes diodes, en fonction de la fréquence, à $I_0 = 40$ mA (fig. 14 et 15). Conformément aux théories précitées, les valeurs de la résistance négative et de la réactance diminuent avec la fréquence.

Il faut remarquer qu'à partir de 10,5 GHz les mesures deviennent délicates car la résistance négative devient très faible. On voit aussi qu'en haut de la bande de fréquence la réactance a tendance à devenir selfique, vraisemblablement en raison de la self des fils de connection de la diode. On vérifie également que l'influence du courant de polarisation I_0 est assez faible sur la réactance, ce qui explique la faible variation de la fréquence d'oscillation avec I_0 (moins de 1 MHz/mA). Par contre cette influence est très nette sur la valeur de la résistance (fig. 16).

Remarquons enfin qu'en régime non linéaire la résistance de la diode est plus faible que celle qui est tracée fig. 15 . D'après les relations données en première partie, paragraphe I, le système de slugs doit ramener des impédances qui soient les complexes conjuguées de Z_d : les résistances ramenées



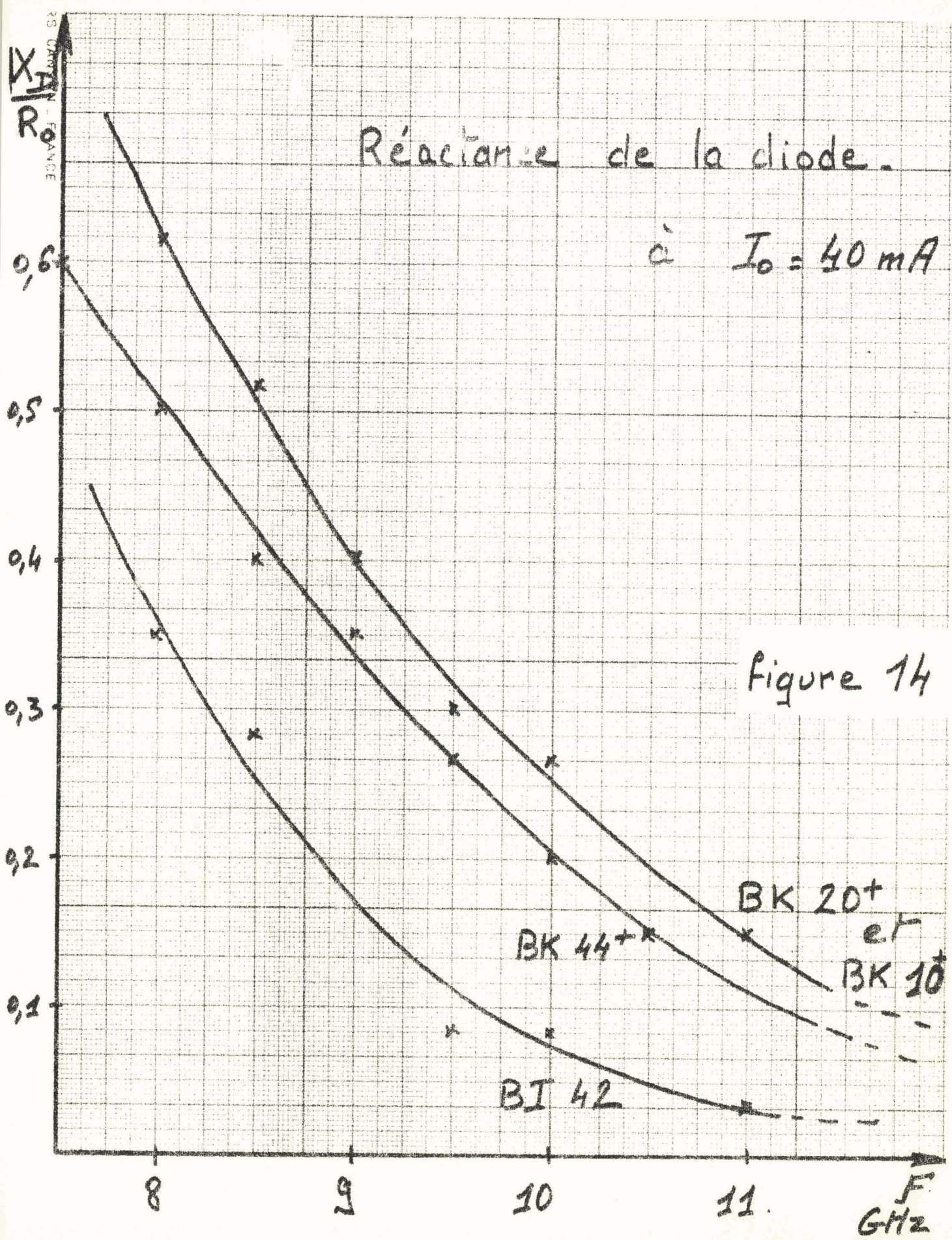
Relevé de l'impédance d'une diode (BK) à avalanche à 9 GHz en fonction de sa polarisation.

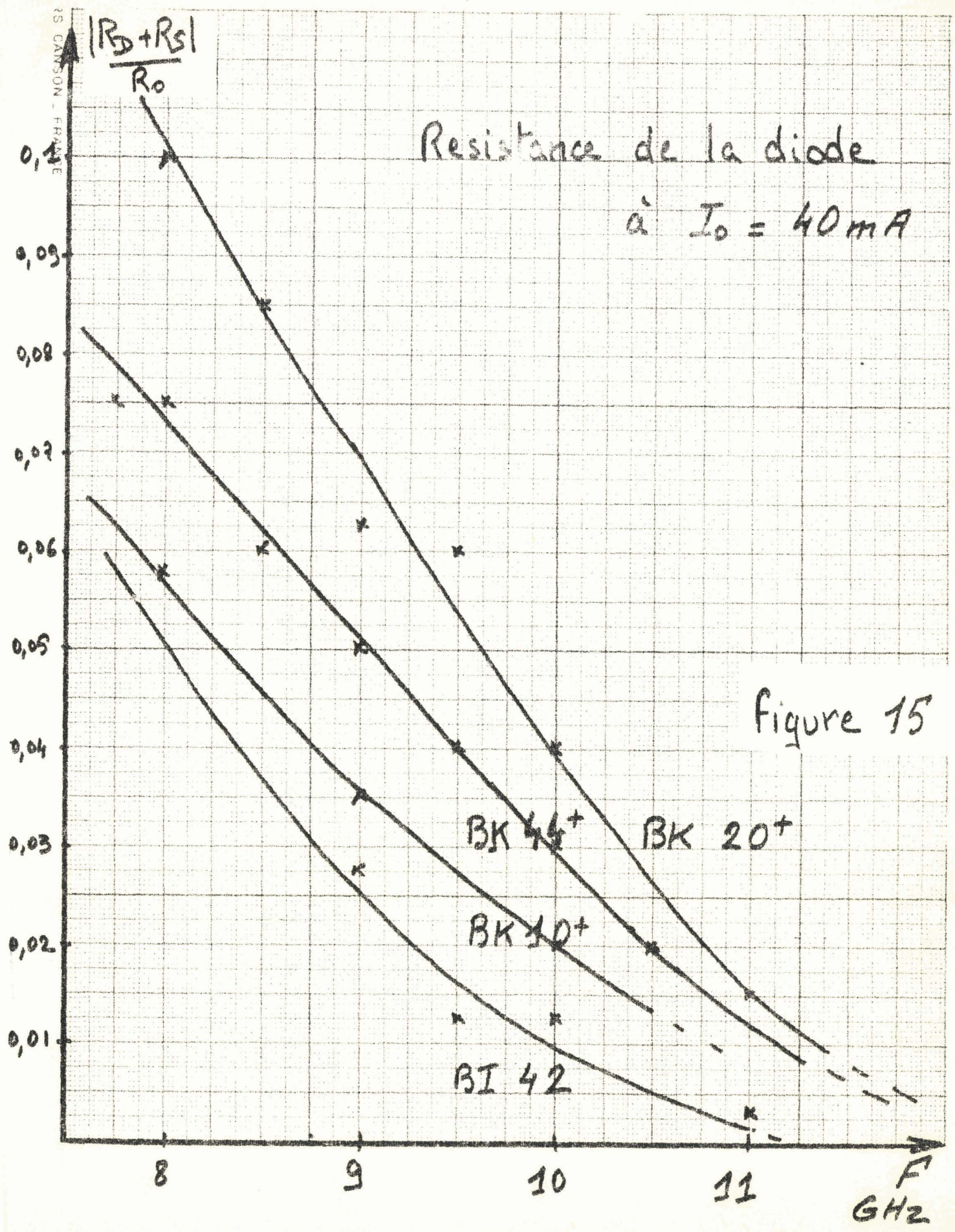
Fig. 13

Réactance de la diode.

à $I_0 = 40 \text{ mA}$

Figure 14





Resistance de la diode BK 20th

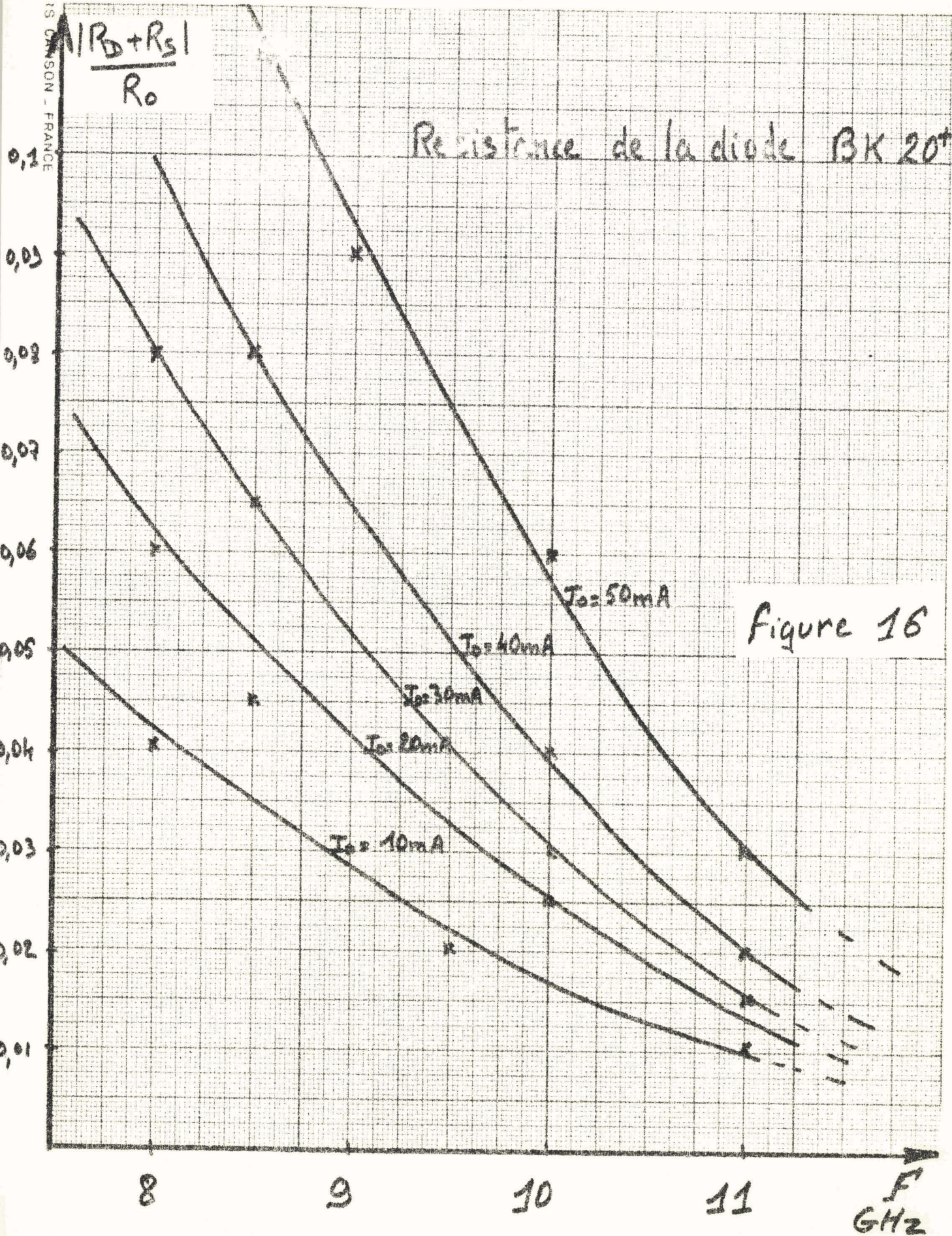


Figure 16

devront donc pouvoir varier entre 0,5 et 7 Ω , les réactances entre 0 et 30 Ω . De plus les variations en fonction de la fréquence devront se faire dans le même sens pour les parties réelles et imaginaires.

III. ETUDE DE L'IMPEDANCE RAMENEE PAR UN SYSTEME DE SLUGS. POSSIBILITES D'OSCILLATION.

Dans la structure Iglesias, un slug agit comme un transformateur d'impédance. Il devra ramener dans le plan de la diode des impédances à faible partie réelle pour qu'il puisse y avoir des oscillations : la longueur des slugs devra donc être voisine de $\lambda/4$ pour les fréquences moyennes d'oscillation (nous utiliserons des slugs de ce type).

Cette étude est menée, d'une part d'un point de vue théorique, en calculant systématiquement sur l'abaque de Smith les valeurs des impédances ramenées et, d'autre part, d'un point de vue expérimental, en mesurant à l'aide de l'analyseur de réseau ces mêmes valeurs. Remarquons que pour ces mesures, nous utilisons la même cellule qu'en oscillation, les slugs étant placés dans les mêmes positions.

Il nous semble fondamental de relier notre étude aux résultats des essais en oscillations et d'établir le maximum de corrélations entre les diverses propriétés. Pour cela nous admettons que l'oscillation n'existe que si $R_p \leq |R_D|$ et qu'elle produit une puissance constante dans la mesure où R_p et $|R_D|$ évoluent sensiblement de la même façon.

Nous avons entrepris cette étude pour divers dispositifs :

- slug unique basse impédance mobile
- ensemble de deux slugs mobiles
- équipage constitué de deux slugs mobiles placés à une distance constante.

III.1. Slug unique mobile

En calculant, par l'abaque de Smith, la valeur de l'impédance ramenée, on peut constater que la valeur de la résistance R_p est liée à l'impédance Z_0 du slug et celle de la réactance X_p à la distance d entre le slug

et la diode. Pour un slug unique d'impédance caractéristique Z_c donnée et de longueur égale à 5 mm ($\lambda/4$ à 15 GHz) on étudie la variation de la résistance R_p en fonction de la fréquence, pour une distance à la diode d qui donne $X_p = 0$ (fig. 17). Ce procédé est justifié car R_p varie peu quand X_p varie. Sur le même graphique nous avons tracé les variations théoriques correspondantes : on peut remarquer que le comportement en fonction de la fréquence est assez différent. Il peut y avoir à cela plusieurs raisons :

- discontinuités à l'entrée et sortie du slug
- influence de l'isolant qui entoure le slug
- influence du centrage du conducteur central.

Ceci nous conduit à déterminer systématiquement, de façon expérimentale les valeurs des impédances ramenées par les slugs, l'étude théorique ne servant que de guide.

En rapprochant ces courbes de celles de l'impédance totale de la diode précédemment tracées (fig.15) on peut vérifier que la diode n'oscille que si $R_p \leq |R_D|$, comme le montre le tableau suivant :

Diode N°	Impédance théorique maximum du slug ($\lambda/4$ à 15 GHz) pour oscillation à 50 mA	Conditions expérimentales d'expérimentation et résultats $I_0 = 50 \text{ mA}$	
BK 34 ⁺	10 Ω	Slug 5,5 Ω Oscillation sur 6,8 - 11,2 GHz Slug 7,5 Ω Oscillation sur 7,6 - 8,4 GHz Slug 13 Ω Pas d'oscillation	
BK 44 ⁺	9 Ω	Slug 5,5 Ω Oscillation sur 6,6 - 12,4 GHz Slug 7,5 Ω Oscillation sur 6,5 - 6,8 GHz Slug 13 Ω Pas d'oscillation	
BK 20 ⁺	15 Ω	Oscillation avec slug 13 Ω Pas d'oscillation avec slug 16 Ω	
BK 10 ⁺	10 Ω	Slug 7,5 Ω Oscillation sur 7,6 - 8,2 GHz Slug 13,5 Ω Pas d'oscillation	

Resistance ramene'e

par un slug pour $X_p=0$

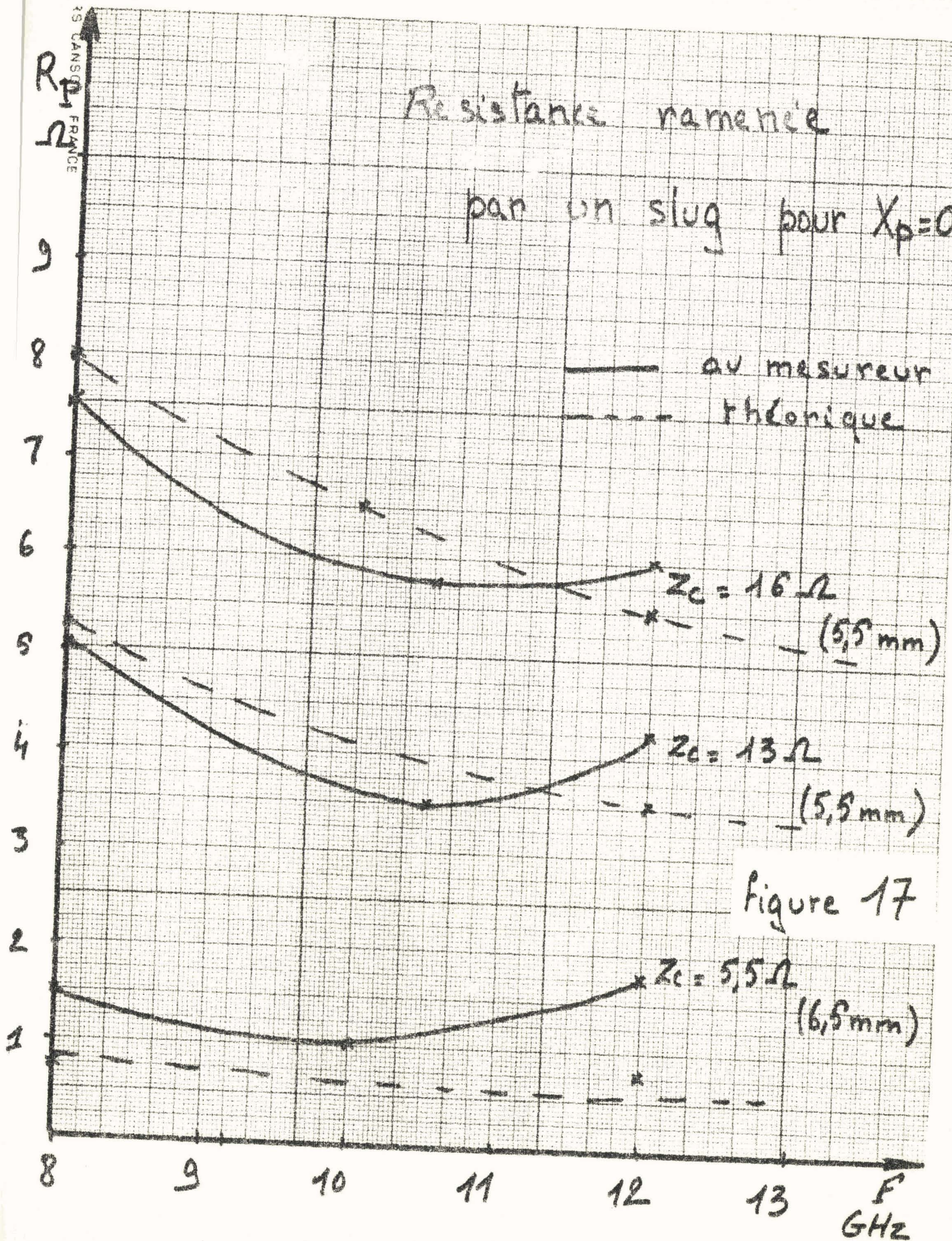


figure 17

Ces courbes permettent également en les comparant à celles de la fig. 16 de prévoir la valeur du courant de seuil pour une résistance R_p ou une fréquence donnée. On vérifie ainsi que le courant de seuil augmente avec la valeur de la résistance ramenée R_p .

Nous pouvons donc connaître la bande d'oscillation pour une variation particulière de la position des slugs. Notamment, il semble intéressant de décrire continuellement la bande d'utilisation en partant d'une distance nulle de la diode.

Dans ce but, nous traçons la courbe représentant $X_p = f(F)$ pour $d = 0$, courbe limite entre la zone de réglage possible ($d > 0$) et la zone de réglage impossible (fig. 18). Le point d'intersection avec $|X_D| = f(F)$ nous donne la fréquence limite maximum F_0 correspondant à ce mode de réglage : elle croît avec l'impédance caractéristique du slug, mais ce résultat est peu intéressant, car la bande d'oscillation diminue corrélativement. Les variations de F_0 ont pu être étudiées ; en fait il faut constater que l'influence de la résistance ramenée qui devient supérieure à R_D masque le phénomène, comme on le voit dans le tableau ci-dessous. Il devient au contraire très visible pour des courants élevés, en impulsion par exemple.

Diodes	courant	F_0 avec un slug $5,5 \Omega$ (GHz)	
		Mesuré	Calculé
BK 34 ⁺	30 mA	8,2	9,4 limité par R_p
	40 mA	8,7	9,45 limité par R_p
	50 mA	9,5	9,5
BK 44 ⁺	30 mA	8,06	9,5 limité par R_p
	40 mA	8,7	9,55 limité par R_p
	50 mA	9,6	9,6

X_P/R_0

Détermination de la fréquence limite d'oscillation F_0 à $d=0$

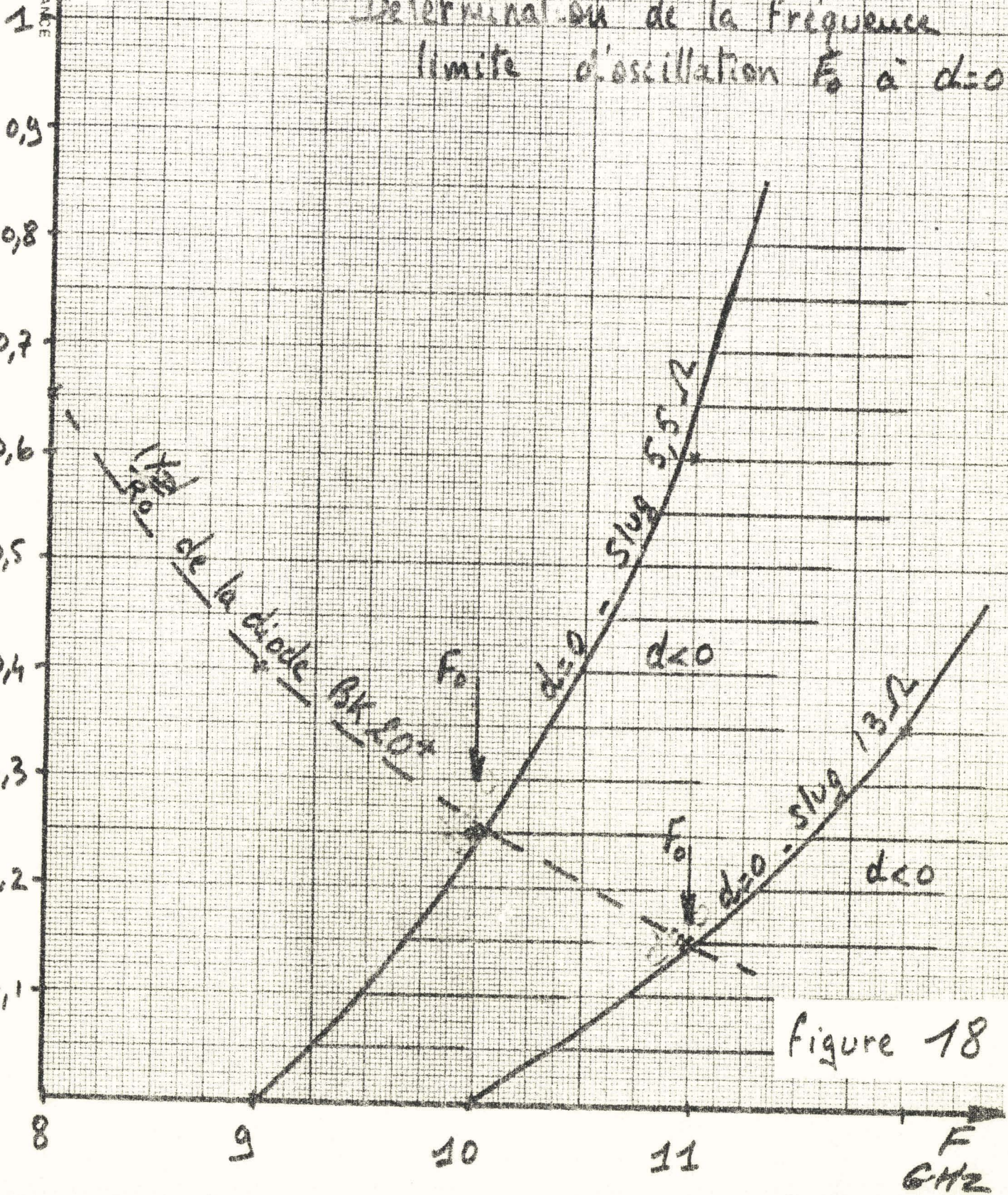


Figure 18

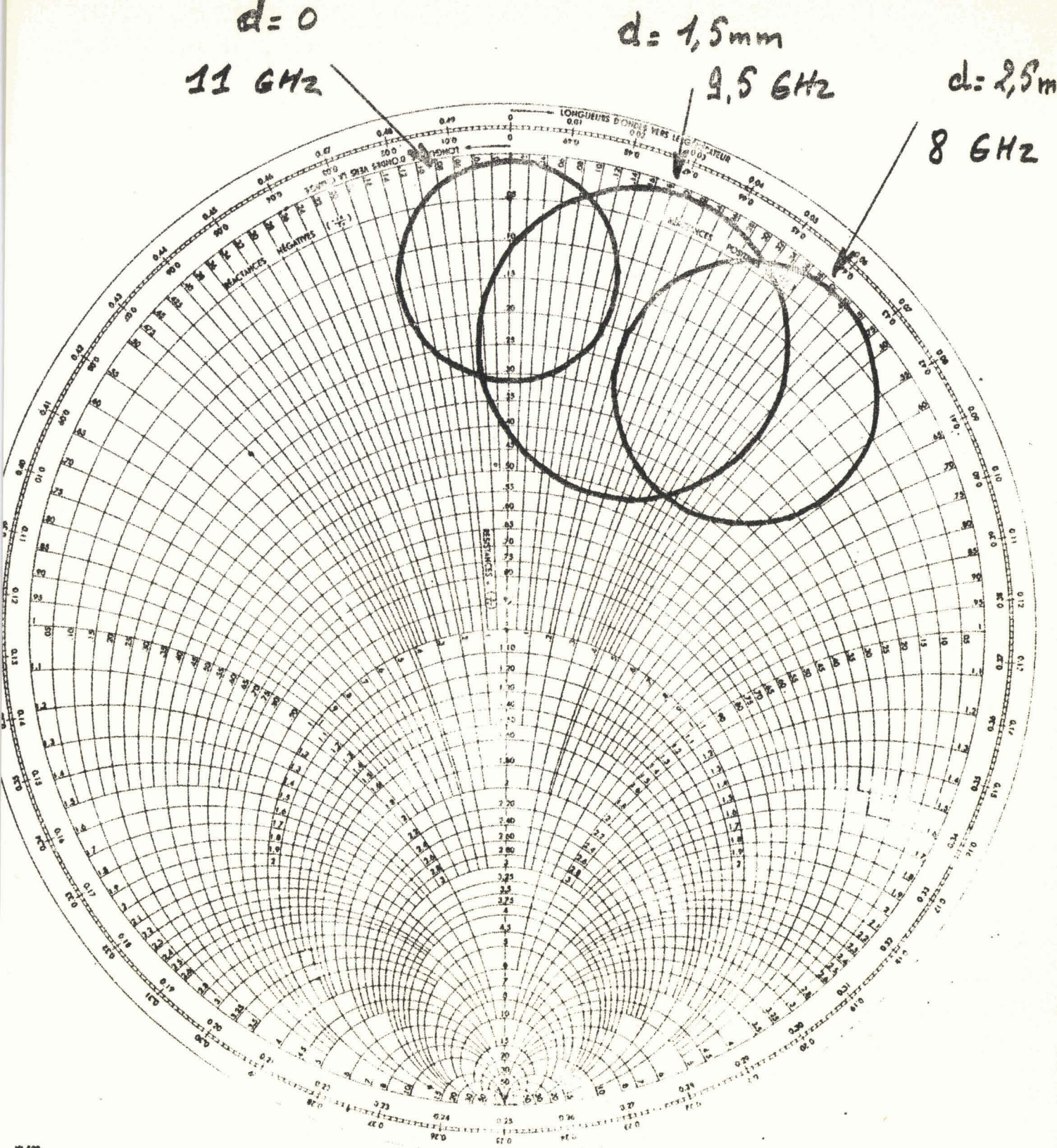
Pour obtenir une oscillation dans une large bande de fréquence on cherche donc à ramener une résistance de valeur faible sur toute la bande. La figure 15 montre que ceci n'est possible que si l'on utilise des slugs de faible impédance caractéristique (5,5 ohms par exemple). De plus la variation fréquentielle de la résistance ramenée n'a pas la même allure que celle de $|R_D|$. Cette solution conviendra si l'on se limite à des bandes de fréquence relativement réduites (1 à 2 GHz). Par ailleurs, l'obtention de slugs de très basses impédances caractéristiques pose des problèmes mécaniques complexes.

III.2. Ensemble de deux slugs mobiles

Pour ramener des impédances très faibles on peut mettre en cascade deux dispositifs équivalents au précédent, donc utiliser 2 slugs. On choisit par exemple, deux slugs de même longueur 5 mm ($\lambda/4$ à 15 GHz) et d'impédance caractéristique voisine de 10 ohms. On peut alors obtenir toutes les impédances souhaitées en déplaçant ces 2 slugs par rapport à la diode.

Une étude de l'impédance ramenée par ces slugs, effectuée à l'admittance automate automatique, montre le principe de fonctionnement du dispositif (fig. 19). Pour une fréquence donnée, on voit qu'il est possible de choisir la distance d du premier slug pour que la variation de position du second entraîne une variation de l'impédance dans une zone où elle reste la conjuguée de Z_D . Ces résultats ont été obtenus avec un slug d'impédance 7 ohms près de la diode et un autre d'impédance 13,5 ohms, tous deux ont une longueur de 5 mm ($\lambda/4$ à 15 GHz).

Pour éviter d'avoir deux réglages pour chaque fréquence d'oscillation, on a pensé laisser fixe le premier slug et rendre mobile le second. La figure 13 montre que dans ce cas il reste toujours possible d'avoir l'impédance optimale pour une fréquence, d'où l'utilisation de ce dispositif pour caractériser les diodes ; malheureusement ce système est inutilisable pour obtenir une oscillation à large bande de fréquence, car les impédances ramenées ne sont favorables que dans une bande étroite.



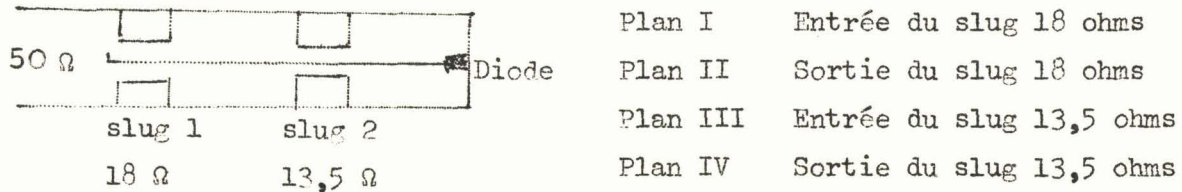
Impédance ramenée par un système de 2 slugs

- Slug $7\ \Omega$ à une distance d de la diode
- Slug $13,5\ \Omega$ mobile.

Fig. 19

III.3. Equipage mobile à deux slugs liés

Nous nous sommes orientés alors vers une combinaison de deux slugs séparés par une distance fixe d' , appelée "équipage à slugs". On comprend aisément le principe d'un tel dispositif en traçant la variation de l'impédance en fonction de la fréquence sur l'abaque de Smith (fig. 20) pour des réactances du même ordre que celles de la diode.



D'un point de vue théorique, nous avons étudié l'influence des différents paramètres d'un slug équipage et en particulier la distance d' entre slugs. On peut dire que l'on déplace la bande de fréquence pour laquelle $X_p = -X_D$ en faisant varier la distance d' .

Distance d'	Bande de fréquence
5 mm	8,5 - 12 GHz
6 mm	8 - 12 GHz
7 mm	7,5 - 11 GHz
9 mm	7 - 9,5 GHz

Nous avons étudié expérimentalement l'équipage constitué de deux slugs de longueur 5 mm, d'impédances caractéristiques 13,5 ohms et 18 ohms, distants de 6 mm que nous utilisons systématiquement dans nos oscillateurs. La mesure de la résistance ramenée R_p au mesureur automatique s'est révélée assez difficile en raison de sa faible valeur, les erreurs de directivité des coupleurs de l'appareil prenant une importance notable (fig. 21). Cette résistance R_p évolue sensiblement de la même façon que R_D en fonction de la fréquence ; Ceci nous conduit à penser que de tels dispositifs seront assez satisfaisants pour être utilisés dans des oscillateurs à large bande de fréquence.

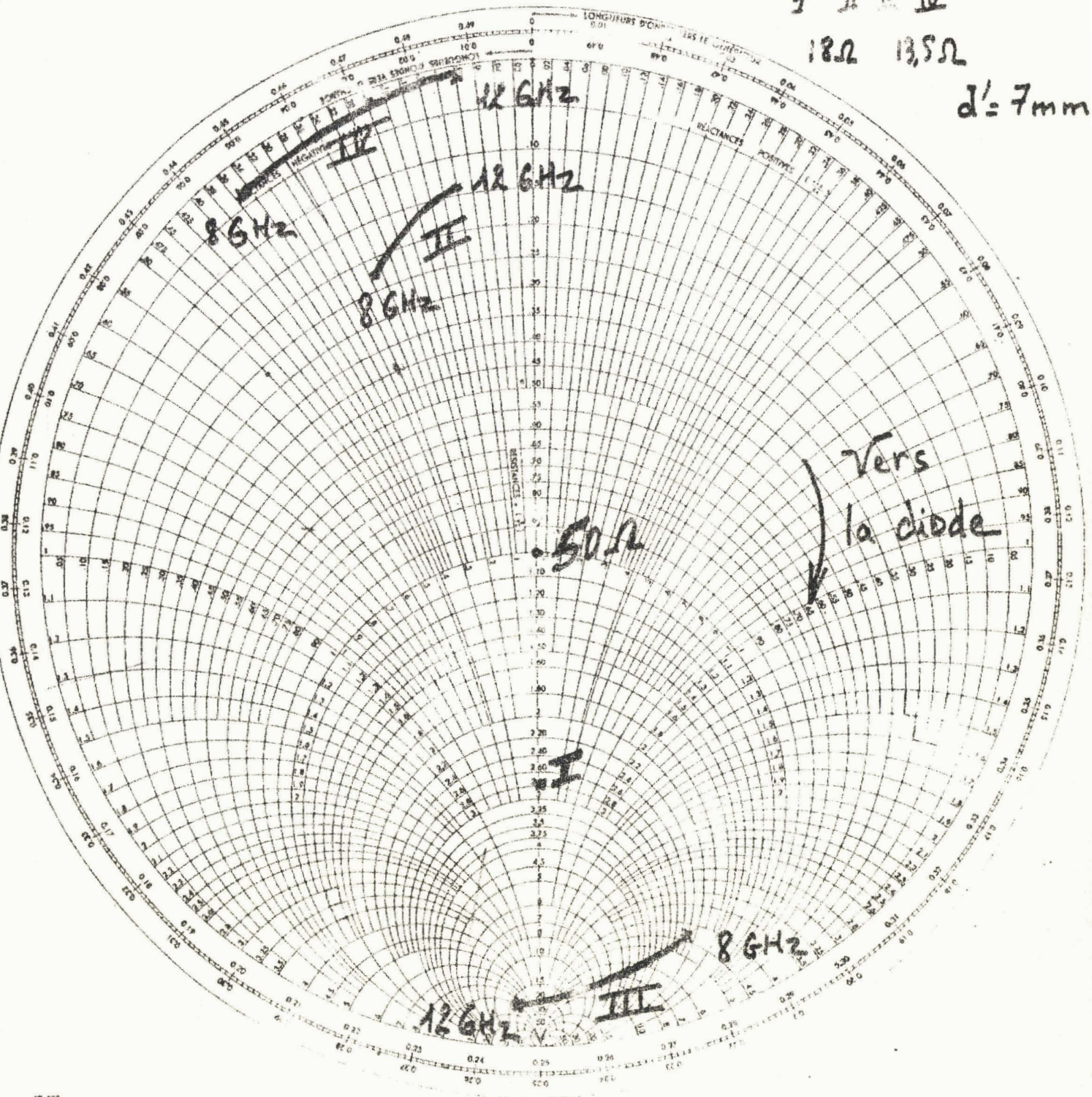
60 Ω

18 Ω 13,5 Ω

I II III IV

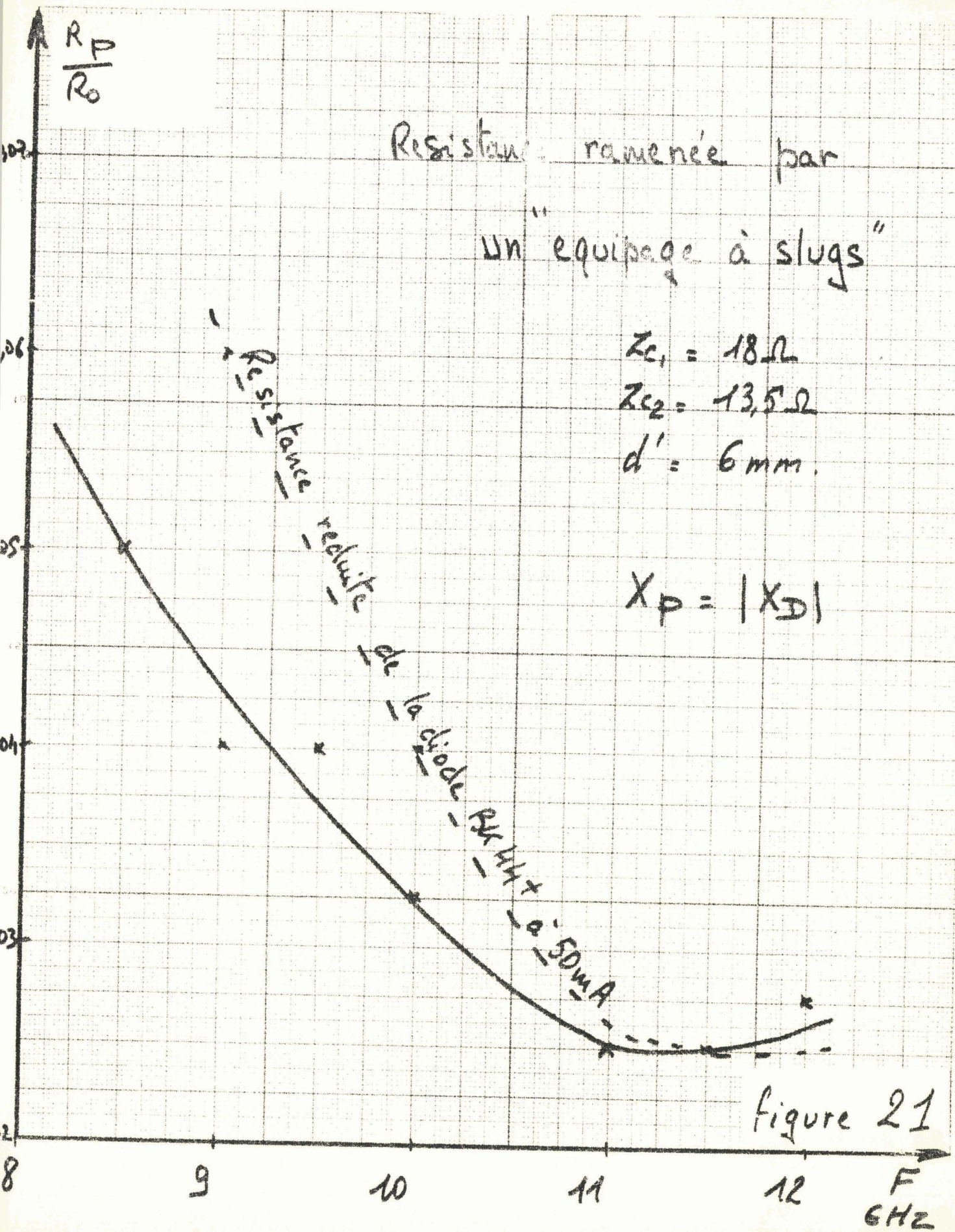
18 Ω 13,5 Ω

d' = 7 mm



Impédance ramenée par un "Equipage à Slugs"

Figure 20



IV. REALISATION D'UN OSCILLATEUR A BANDE ETROITE DE FREQUENCE (1 à 2 GHz).

Dans cette partie de notre étude, l'objectif est de produire une puissance de l'ordre de 200 mW dans une bande de 2 GHz avec un rendement de l'ordre de 4 %.

A partir des résultats précédents, on voit qu'il existe un grand nombre de combinaisons de slugs qui permettent d'obtenir une puissance acceptable dans une bande de fréquence relativement faible. Cela explique donc que notre étude se présente sous la forme d'une énumération de dispositifs possibles chacun d'entre eux ne différenciant des autres que par l'une ou l'autre de ses performances.

- a) On utilise un slug unique mobile de basse impédance (5,5 ohms), de longueur $l = 6 \text{ mm}$ ($\lambda/4$ à 13 GHz). Pour des distances d variant de 0 à 1,5 mm, la fréquence varie de 7,5 à 9 GHz et la puissance reste supérieure à 200 mW, le courant de polarisation est égal à 50 mA. Le fonctionnement de ce dispositif s'explique très facilement à partir de l'étude précédente (fig. 15).
- b) On utilise un équipage constitué de deux slugs d'impédances 13,5 et 18 ohms, de longueur $l = 5 \text{ mm}$ ($\lambda/4$ à 15 GHz) et distants de 7 mm. Avec ce dispositif la diode BK 34⁺ a permis d'obtenir plus de 200 mW sur la bande 7,7 - 9,7 GHz à $I_0 = 50 \text{ mA}$ (fig. 22).
- c) Si l'on emploie le même dispositif que précédemment, en faisant varier uniquement la distance d' ($d' = 6 \text{ mm}$) la gamme de fréquence intéressante peut s'étendre de 9 à 11 GHz.
- d) Enfin pour la zone de fréquence située autour de 11 GHz, on ne peut obtenir des puissances aussi importantes car les diodes que nous possédons ne sont pas optimisées dans cette bande. Avec un slug basse impédance (5,5 ohms) la puissance obtenue est supérieure à 100 mW entre 10 et 12 GHz.

On peut donc dire que tant que l'on se contente d'une bande de fréquence de 1 à 2 GHz, beaucoup de possibilités s'offrent à nous si l'on veut

Oscillations sur une bande étroite.

$I_0 = 50 \text{ mA}$

a - slug $5,5 \Omega$

b - Equipage $d' = 5 \text{ mm}$

c - Equipage $d' = 6 \text{ mm}$

d - slug $5,5 \Omega$

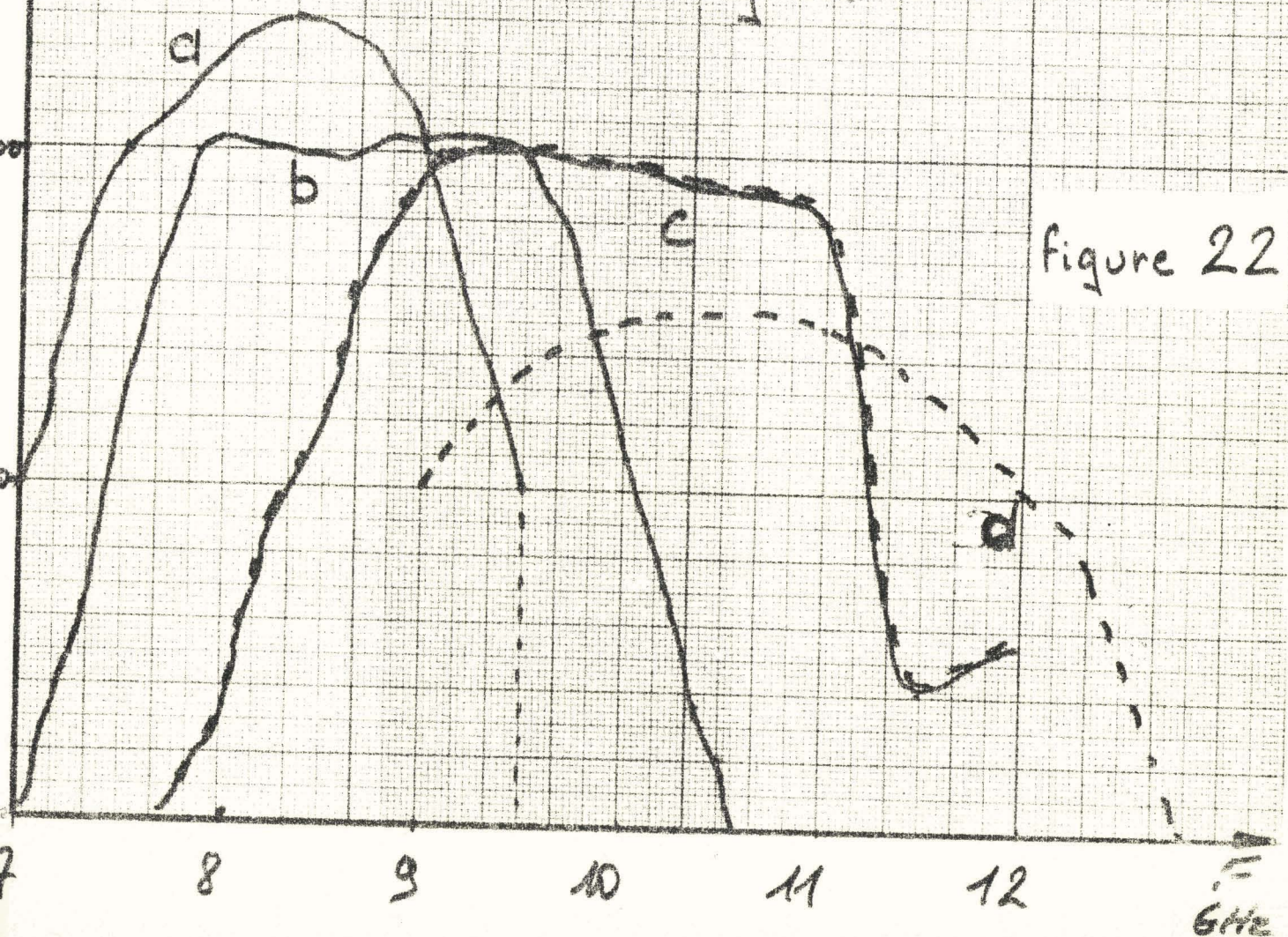


figure 22

obtenir des performances intéressantes. Nous allons voir qu'il n'en est pas ainsi si l'on recherche des bandes de fonctionnement plus importantes.

V. REALISATION D'UN OSCILLATEUR A LARGE BANDE (4 à 5 GHz)

La possibilité d'obtenir des oscillations sur une large bande de fréquence est liée à celle de ramener des résistances faibles pour des réactances voisines de zéro évoluant sensiblement de la même façon. L'étude de l'impédance ramenée par un slug unique de basse impédance (5 ohms) montre qu'il n'est pas utilisable ; en effet nous constatons qu'il ne permet pas de décrire la gamme de fréquence de façon continue. Comme le montre la fig. 23 on obtient une partie de cette gamme au voisinage de la diode et le reste à $\lambda/2$. Les puissances produites sont convenables et le rendement supérieur à 2 %. Cet inconvénient nous amène à chercher d'autres solutions.

L'étude systématique du dispositif à slugs nous conduit à utiliser des équipages constitués de deux slugs dont nous avons donné précédemment les caractéristiques. Parmi les nombreux essais réalisés, deux résultats nous semblent particulièrement intéressants :

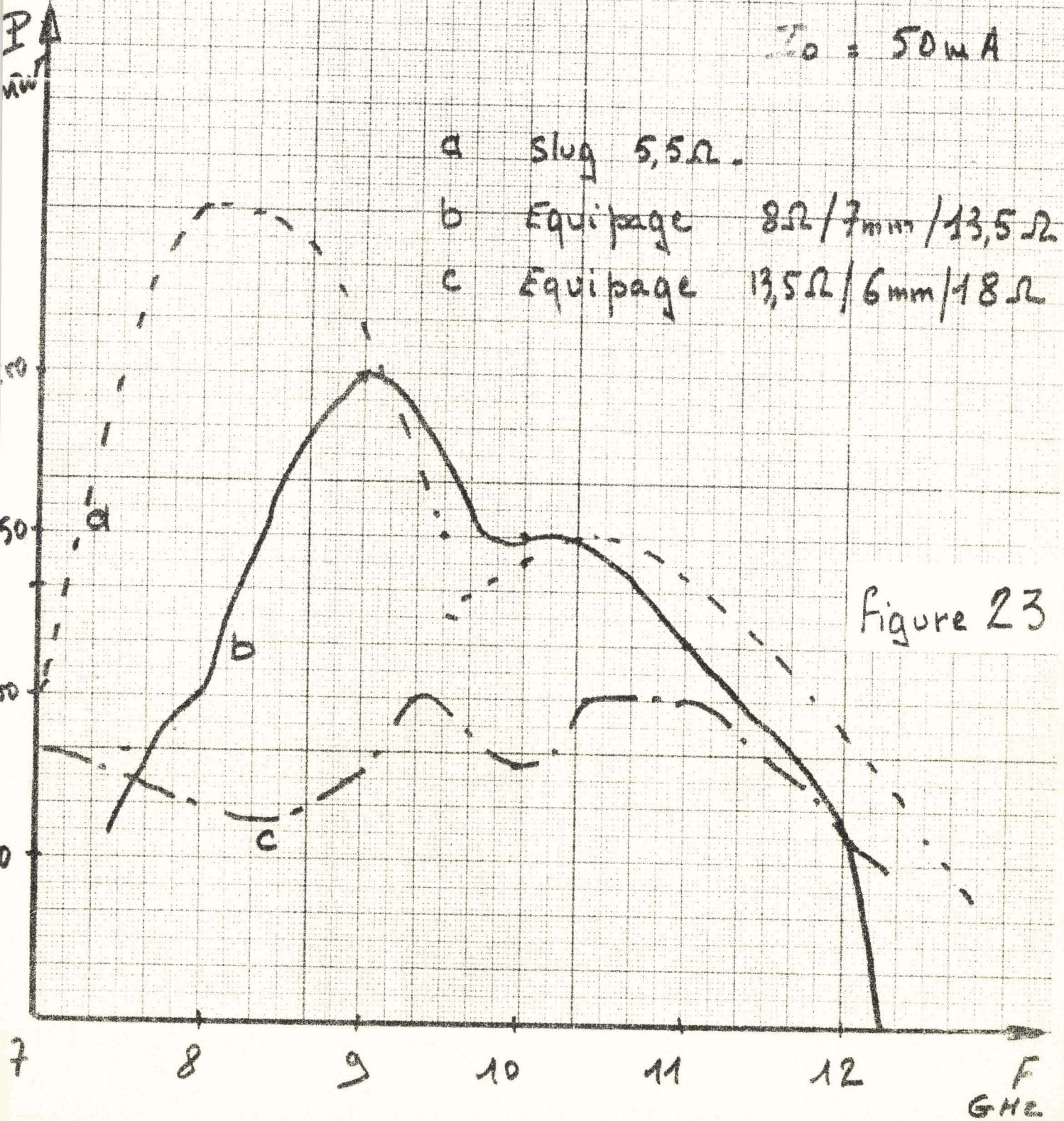
- avec un équipage constitué de 2 slugs d'impédances caractéristiques 8 et 13,5 ohms et séparés par 7 millimètres, on obtient une puissance relativement modeste (> 50 mW) sur une très large bande (plus de 5 GHz).
- Avec le dispositif dont nous donnons les caractéristiques au paragraphe III.3, la puissance obtenue reste supérieure à 100 mW pour la bande de fréquence comprise entre 8 et 11,3 GHz.

Pour ce dispositif, qui nous semble intéressant, nous allons vérifier un certain nombre d'éléments théoriques et mesurer certaines caractéristiques, telles que le bruit de modulation de fréquence.

Nous avons déjà montré qu'aux erreurs d'expérience près, la résistance ramenée R_p reste inférieure à $|R_D|$ pour les fréquences d'oscillations. On le voit en comparant les valeurs de l'impédance de la diode (BK 34⁺ ou 44⁺ par exemple) à celles de la résistance ramenées (fig. 21).

Oscillations sur une large bande.

$I_0 = 50 \text{ mA}$



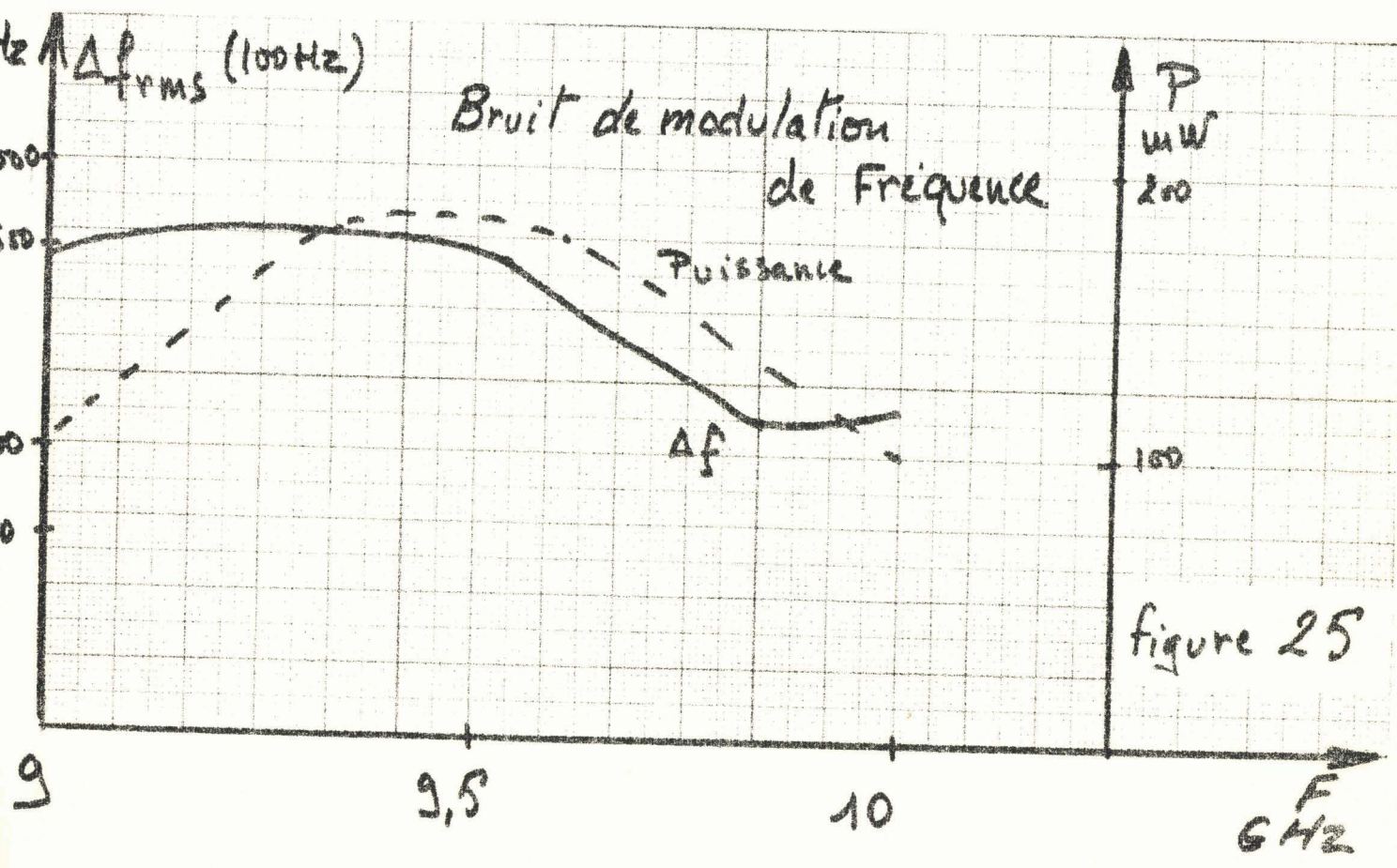
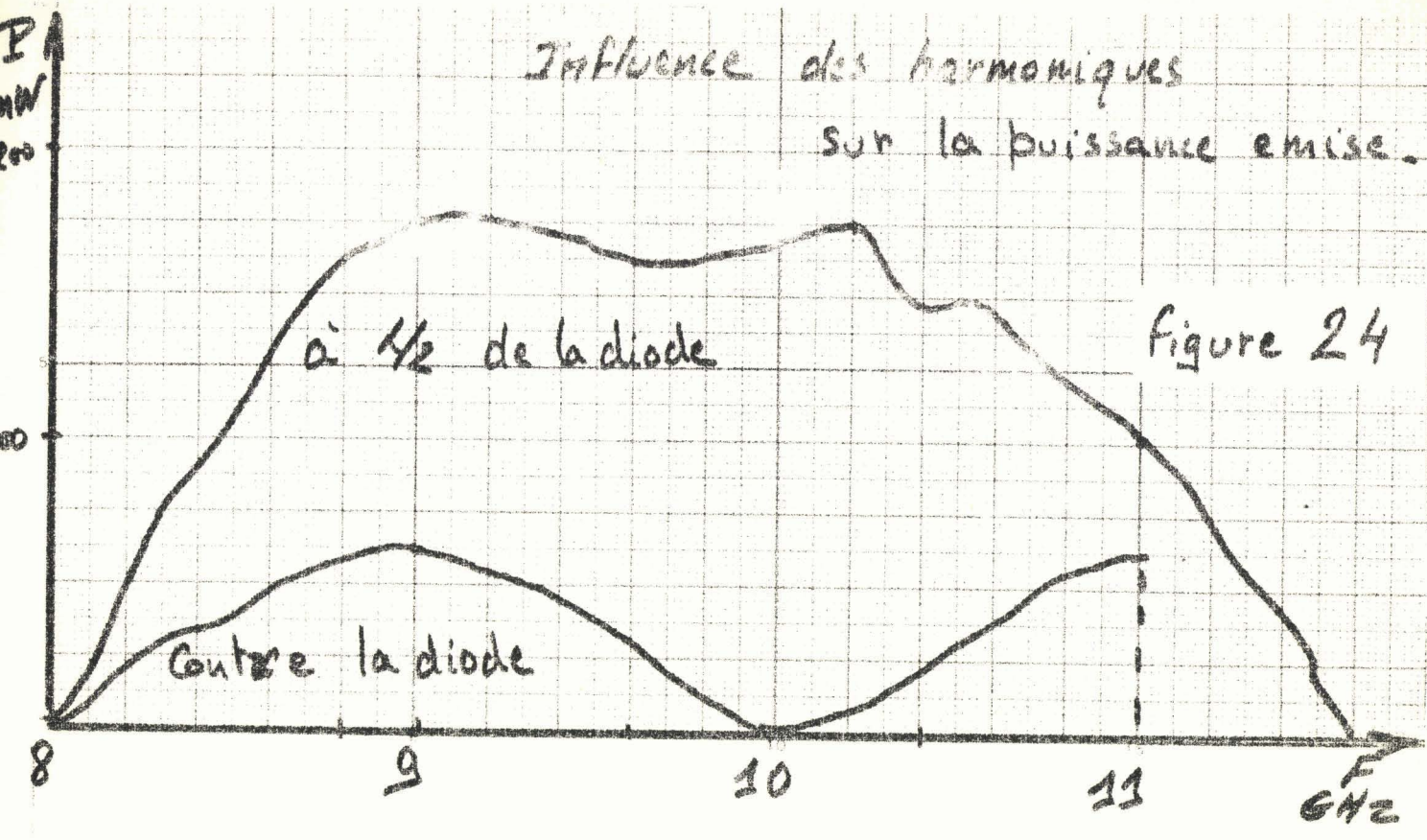
Par ailleurs, nous vérifions que la relation $X_D + X_p = 0$ est valable. Pour ce faire, nous réglons les slugs pour que la réactance ramenée X_p , mesurée à l'analyseur de réseau soit égale et opposée à X_D , à une fréquence donnée : avec ce réglage, on constate que l'oscillation se produit à la même fréquence.

L'étude systématique de cet oscillateur nous permet d'obtenir des bandes de fréquences comprises entre la fréquence d'avalanche 4,5 et 13 GHz, suivant le type de diodes utilisé. Par ailleurs, elle met en évidence l'influence de l'impédance vue par la diode à la fréquence moitié ⁽³⁾, en comparant les puissances produites lorsque les slugs sont situés au voisinage de la diode et à $\lambda/2$ (fig. 24). Il n'en est pas de même pour l'harmonique 2, car le système ramène les mêmes impédances dans les deux cas (on se déplace de λ). Comme le montre la fig. 24, la puissance est plus grande quand les slugs se trouvent à $\lambda/2$ de la diode ce qui rend cet effet indépendant des pertes dans le coaxial (elles existent cependant, mais sont très faibles).

Enfin nous mesurons pour cet oscillateur à large bande la variation du bruit de modulation de fréquence Δf_{rms} en fonction de la fréquence d'oscillation (fig. 25). La méthode de mesure est celle décrite par PERICHON et MICHEL ⁽⁷⁾. On constate que le bruit de modulation de fréquence présente un minimum lorsque la résistance ramenée par le système de slugs est proche de la résistance négative en régime linéaire, et que ce bruit augmente de 25 % environ lorsque l'oscillateur donne son maximum de puissance et que l'impédance ramenée s'écarte de cette valeur optimale. Une étude plus systématique devrait nous permettre de faire une analyse plus approfondie de ce bruit de modulation de fréquence.

^{**} Déviation de fréquence r.m.s. mesurée à une distance ω_n de la porteuse et dans une bande de 100 Hz (pour une diode A.T.T. le f_{rms} est indépendant de ω_n).

Influence des harmoniques sur la puissance émise.



CONCLUSION

Dans le cadre de ce travail nous avons mis au point un oscillateur à large bande de fréquence fonctionnant avec une diode A.T.T.

Cette recherche a été pour nous, l'occasion d'une étude plus précise sur les variations de l'impédance de la diode avec la fréquence. Elle nous a permis également, de connaître les impédances ramenées par un système de slugs : slug unique, 2 slugs mobiles, équipage à slugs.

Tous ces résultats nous seront précieux pour envisager la réalisation d'oscillateurs à wobulation électronique. Nous pourrons choisir ainsi plus sûrement les éléments et les structures susceptibles de permettre une telle wobulation dans une gamme de fréquence étendue.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Acta Electronica, vol. 12, pp. 211-283, (1969)
- (2) Acta Electronica, vol. 12, p. 222, (1969)
- (3) Acta Electronica, vol. 12, p. 251, (1969)
- (4) Acta Electronica, vol. 12, p. 235, (1969)
- (5) Acta Electronica, vol. 12, p. 165, (1969)
- (6) Acta Electronica, vol. 12, p. 231, (1969)
- (7) R. PERICHON, J. MICHEL, I.E.E.E. Trans. M.T.T., (à paraître)

