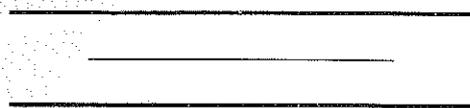


**BE 90 II G**

BANC DIDACTIQUE HYPERFREQUENCE

NOTICE TECHNIQUE



**ORITEL**

TABLE DES MATIERESCHAPITRE I - INTRODUCTIONCHAPITRE II - DESCRIPTION

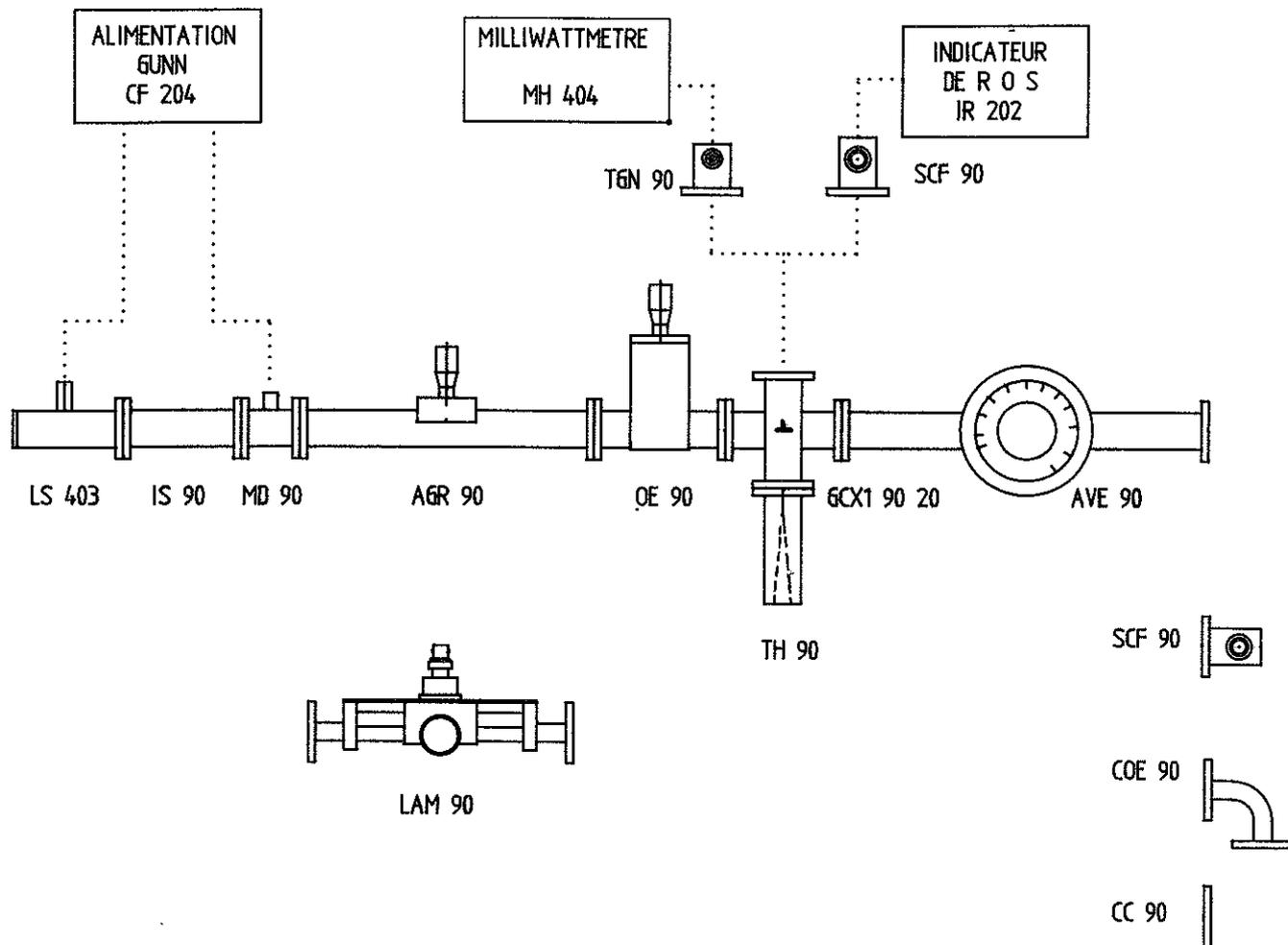
- 2-1- Oscillateur GUNN: LS 403
- 2-2- Isolateur: IS 90
- 2-3- Modulateur à Diode: MD 90
- 2-4- Atténuateur Variable: AVE 90
- 2-5- Atténuateur de précision: AGR 90
- 2-6- Ondemètre: OE 90
- 2-7- Coupleur en Croix: GCX1-90-20
- 2-8- Support de Cristal: SCF 90
- 2-9- Charge adaptée: TH 90
- 2-10- Coude plan E: COE 90
- 2-11- LAM 90
- 2-12- CC 90
- 2-13- Eléments complémentaires

CHAPITRE III - MISE EN FONCTIONNEMENT

- 3-1- Montage
- 3-2- Branchement de l'Oscillateur GUNN
- 3-3- Mise sous tension

**CHAPITRE IV - MANIPULATIONS**

- 4-1- Etude de l'Oscillateur à effet GUNN**
  - 4-1-1- Rappels théoriques: Effet GUNN
  - 4-1-2- Relevé de la caractéristique Courant-Tension de la diode à effet GUNN
  - 4-1-3- Relevé de la caractéristique Déplacement-Fréquence de l'Oscillateur à effet GUNN
  - 4-1-4- Relevé de la caractéristique Puissance-Fréquence de l'Oscillateur à effet GUNN
- 4-2- Mesure de la Fréquence**
  - 4-2-1- Généralités
  - 4-2-2- Recherche de la fréquence
- 4-3- Mesure de Puissance**
  - 4-3-1- Généralités
  - 4-3-2- Mesure d'une puissance
- 4-4- Mesure d'Atténuation**
  - 4-4-1- Généralités
  - 4-4-2- Mesure par comparaison
  - 4-4-3- Mesure par substitution
  - 4-4-4- Mesure d'atténuation par calibration
- 4-5- Relevé de la caractéristique d'un Détecteur: SCF 90**
- 4-6- Coupleur Directif**
  - 4-6-1- Généralités
  - 4-6-2- Mesure du couplage
  - 4-6-3- Mesure de la directivité
- 4-7- Mesure du rapport d'onde stationnaire**
  - 4-7-1- Définition
  - 4-7-2- Utilisation d'une ligne à fente pour la mesure du rapport d'onde stationnaire
  - 4-7-3- Mesure de rapport d'onde stationnaire élevés
  - 4-7-4- Puissance perdue dans l'onde réfléchie
- 4-8- Mesure de longueur d'onde**
  - 4-8-1- Définition
  - 4-8-2- Mesure à la ligne
- 4-9- Mesure d'impédance**
  - 4-9-1- Définition
  - 4-9-2- Utilisation du diagramme de Smith
  - 4-9-3- Mesure d'une impédance
  - 4-9-4- Mesure d'atténuations faibles
  - 4-9-5- Utilisation d'un coupleur directif pour la mesure du rapport d'onde stationnaire



CHAPITRE I

INTRODUCTION

L'enseignement ayant à faire face à l'évolution des techniques micro-ondes, la Société ORITEL a jugé nécessaire de développer des équipements de mesure spécialement conçus dans un but pédagogique.

Spécialisée depuis plusieurs années dans les fabrications hyperfréquences, la Société ORITEL a eu le souci de simplifier les différents composants hyperfréquences entrant dans ces bancs de mesures. Ceci, afin de les mettre à la portée d'un grand nombre d'intéressés, tant par son prix modique, que par sa robustesse, tout en conservant des performances électriques très bonnes.

Le banc de mesure ORITEL est un ensemble très complet, permettant les mesures les plus diverses et les plus précises.

La bande de fréquence: 8,5GHz à 9,6GHz ( $\lambda = 3$  cm) a été choisie d'une part en raison des développements importants dans cette gamme de fréquences et, d'autre part, en raison des dimensions des éléments.

D'autres éléments existant au catalogue de la Société ORITEL peuvent être fournis sur demande.

Cette notice n'a pas pour but de présenter un cours de mesure en hyperfréquences, mais d'illustrer par quelques exemples les possibilités de l'équipement BE 90 II G.

L'ensemble de mesure didactique, BE 90 II G, permet de procéder aux études ou mesures suivantes:

- Mesures de ROS
- Mesures de longueur d'onde
- Mesures d'impédance
- Mesure de puissance
- Mesure d'atténuation

Les différentes manipulations présentées dans ce fascicule, permettent seulement d'illustrer, par quelques exemples, certaines possibilités du banc didactique BE 90 II G.

CHAPITRE IIDESCRIPTION

Le montage de base du Banc Ecole, BE 90 II G est composé des éléments suivants:

- Un Oscillateur à effet GUNN: LS 403
- Un Isolateur: IS 90
- Un Modulateur à diode PIN: MD 90
- Une Alimentation: CF 204A
- Un Atténuateur Variable: AVE 90
- Un Atténuateur de Précision: AGR 90
- Un Ondemètre: OE 90
- Un Coupleur en croix: GCX1-90-20
- Un Support cristal: SCF 90
- Un Indicateur de ROS: IR 202 ou IR 205
- Un Milliwattmètre: MH 404
- Une Charge adaptatée: TH 90
- Un Coude plan E: COE 90
- Une Ligne de mesure: LAM 90 → 10 408<sup>F</sup> HT (09/05/96) ~ 2 semaines
- Un Court-circuit fixe: CC 90

-5%  
3887<sup>F</sup> HT  
H. KELLER

**2-1- OSCILLATEUR GUNN: LS 403**

L'Oscillateur GUNN est la source d'énergie hyperfréquence de l'équipement. C'est cette énergie qui sera mesurée de différentes façons.

Cet oscillateur est composé d'un tronçon de guide d'onde, dont l'une des extrémités est fermée par un court-circuit. L'élément actif de cet oscillateur est une diode à effet GUNN, placée dans le guide d'onde.

Lorsque la diode est alimentée, à partir d'une alimentation CF 204A, la fréquence d'oscillation est fixée par la cavité résonante, constituée par le tronçon de guide d'onde.

Afin de régler la fréquence de résonance de la cavité, son court-circuit peut être déplacé à l'intérieur du tronçon de guide d'onde. Ce déplacement est provoqué par un micromètre de précision qui permet de le contrôler, et, éventuellement, de relever la courbe de réponse: Déplacement-Fréquence.

La puissance de sortie est au minimum de +17dBm entre 8,5GHz et 9,6GHz.

**2-2- ISOLATEUR: IS 90**

Il est nécessaire de protéger l'oscillateur à diode GUNN, LS 403, contre les variations d'impédance de charge, et contre la désadaptation provoquée par le modulateur à diode PIN, MD 90. En effet, toute variation d'impédance de charge provoque une désadaptation de l'oscillateur, donc un changement de la fréquence et de la puissance fournie.

Cette protection est assurée par l'isolateur IS 90, qui laisse passer l'énergie hyperfréquence, sans atténuation, dans le sens Oscillateur-Charge alors qu'il l'atténue fortement dans le sens contraire.

La perte d'insertion de l'Isolateur IS 90 est inférieure à 1dB, et l'isolation supérieure à 25dB, entre 8,5GHz et 9,6GHz.

**2-3- MODULATEUR A DIODE PIN: MD 90**

L'onde hyperfréquence produite par l'oscillateur à effet GUNN, LS 403, peut être modulée en signaux carrés de fréquence 1kHz, par le modulateur à diode PIN, MD 90.

Ce modulateur est composé d'un tronçon de guide d'onde, dans lequel est montée une diode PIN en parallèle.

La diode PIN se comporte comme une résistance variable, qui vient désadapter la transmission dans le guide d'onde.

Lorsque le modulateur est commandé par l'alimentation CF 204A, la diode PIN est contrôlée par la tension d'alimentation.

Le courant positif traversant la diode PIN, permet de faire varier sa résistance équivalente, et une partie de l'énergie hyperfréquence est réfléchiée, proportionnellement à la valeur de la résistance équivalente, vers l'oscillateur, provoquant ainsi, une atténuation ou une modulation de l'onde hyperfréquence.

La perte d'insertion du modulateur MD 90 est inférieure à 1dB et sa profondeur de modulation, supérieure à 20dB.

**2-4- ATTENUATEUR VARIABLE: AVE 90**

L'atténuateur variable est destiné à doser l'énergie provenant du montage oscillateur. Il est constitué par un élément de guide d'onde rectangulaire dans lequel s'incurvent deux lames résistives souples.

Le système mécanique permettant cette déformation est solidaire d'un cadran gradué directement en décibels de 0dB à 30dB. Ces valeurs d'atténuation sont indépendantes de la fréquence à  $\pm 3\%$ . La perte d'insertion, à la position d'atténuation minimale, est de 0,2dB. Le ROS est d'environ 1,10.

**2-5- ATTENUATEUR DE PRECISION: AGR 90**

L'atténuateur variable étalonné permet, outre le dosage de l'énergie transmise, la mesure comparative (en dB) de différents niveaux de cette énergie.

Dans cet atténuateur, l'atténuation est produite par le déplacement d'une lame résistive, parallèlement au petit côté du guide.

La commande d'atténuation est assurée par un micromètre de précision, qui permet d'obtenir une bonne répétitivité des réglages, et, éventuellement, l'établissement de la courbe d'étalonnage de l'atténuateur.

L'atténuation maximale est de 20dB.

**2-6- ONDEMETRE: OE 90**

L'ondemètre permet de mesurer la longueur d'onde et en conséquence la fréquence de l'énergie issue du montage oscillateur.

L'ondemètre du type à absorption est composé:

- d'un élément droit de guide d'ondes rectangulaire
- d'une cavité cylindrique accolée à ce guide d'onde, et couplée par un iris.

A l'intérieur de cette cavité se déplace un piston commandé par un micromètre gradué en centièmes de millimètres. L'absorption est mise en évidence par la ligne de mesure ou par le support cristal disposé au bout de l'équipement. Une courbe d'étalonnage permet de déterminer la fréquence d'accord en fonction des graduations en millimètres. La précision de lecture est d'environ 5MHz et la précision absolue de  $10^{-3}$ .

**2-7- COUPLEUR EN CROIX: GCX1-90-20**

Le coupleur directif permet de prélever de l'énergie dans une direction privilégiée. Il est constitué par deux éléments de guide accolés à angle droit sur leur grand côté. Le couplage est obtenu par des croix disposées sur la partie commune. La direction privilégiée est repérée par une flèche. L'inversion du guide principal permet d'inverser le sens du couplage.

Le couplage, c'est à dire le rapport entre les niveaux des énergies disponibles à l'entrée du bras principal et à la sortie couplée du bras secondaire est de 20dB. La directivité, définie par le rapport entre les niveaux des énergies disponibles au niveau des deux sorties de bras secondaire est supérieure à 20dB. Dans la branche principale, le taux d'onde stationnaire n'est jamais supérieur à 1,05 dans la gamme de fréquence.

**2-8- SUPPORT DE CRISTAL: SCF 90**

Le support de cristal permet de détecter l'énergie hyperfréquence et de la convertir en signaux BF ou à fréquence nulle. Il est constitué par un élément de guide rectangulaire fermé à l'une de ses extrémités par un court-circuit. Un cristal détecteur (type 1 N 23) est disposé en travers du guide. Une fiche coaxiale BNC permet le branchement de l'appareil de mesure du courant détecté. Le taux d'onde stationnaire est de 1,70 dans la gamme de fréquence.

**2-9- CHARGE ADAPTEE: TH 90**

La charge adaptée permet de fermer la ligne sur son impédance caractéristique, et, en conséquence, d'obtenir une réflexion négligeable.

La charge est constituée par un élément droit de guide d'onde dans lequel est disposé un élément dissipatif.

Le taux d'onde stationnaire est dans la gamme de fréquence toujours inférieur à 1,05.

**2-10- LIGNE DE MESURE: LAM 90**

La ligne de mesure permet de mesurer l'amplitude et la phase des ondes stationnaires, et, par conséquent, d'effectuer les mesures d'impédance. La partie principale de la ligne est constituée par un élément de guide, fendu sur le grand côté, terminé à ses deux extrémités par des brides de raccordement. Une sonde montée sur un chariot plonge dans le guide au travers de la fente. La sonde prélève une partie de l'énergie, qui est transmise à un détecteur type 1N 23. Le chariot permet de déplacer la sonde sur toute la longueur de la fente.

**2-11- ELEMENTS COMPLEMENTAIRES:**

Quelques éléments complémentaires sont associés aux éléments hyperfréquences de l'équipement:

- un lot de visserie destiné au raccordement des éléments entre eux
- un lot d'outillage: tournevis, clé plate, clé à tube
- quatre supports de guide SG 90
- un lot de 3 cordons de liaison coaxiaux BNC-BNC
- une alimentation pour diode à effet GUNN: CF 204A
- un milliwattmètre: MH 404
- un indicateur de ROS: IR 202 ou IR 205.

(Les informations concernant les trois appareils sont données dans les notices techniques correspondantes).

CHAPITRE III

MISE EN FONCTIONNEMENT

3-1- MONTAGE

Comme il sera vu au cours des manipulations décrites dans le présent fascicule, l'ordre de montage des différents éléments est variable suivant les mesures envisagées.

En règle générale, et quelle que soit la mesure, il est recommandé de placer l'Isolateur IS 90 aussitôt après l'Oscillateur GUNN, LS 403.

Ainsi, les stabilités en fréquence et en puissance de l'oscillateur ne seront pas ou peu affectées par une impédance quelconque placée après l'isolateur.

3-2- BRANCHEMENT DE L'OSCILLATEUR GUNN

Avant de relier l'oscillateur à effet GUNN, "LS 403", à son alimentation:

- 1) Vérifier que l'alimentation, CF 204A, n'est pas sous tension (voyant réseau éteint).
- 2) Tourner le bouton de commande de la tension "OSC. GUNN" de l'alimentation, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, et l'amener en butée (tension de sortie minimale  $\approx 0V$ )
- 3) A l'aide d'un cordon coaxial BNC-BNC, relier l'entrée alimentation de l'Oscillateur GUNN, "LS 403", à la sortie "OSC. GUNN" de l'alimentation CF 204A.

3-3- MISE SOUS TENSION

Pour alimenter l'Oscillateur GUNN, "LS 403":

1) Appuyer sur le bouton poussoir "RESEAU" de l'Alimentation, le témoin lumineux doit s'allumer.

2) A l'aide du bouton de commande de Tension, régler la tension d'alimentation de l'Oscillateur GUNN à 10V. Cette valeur est directement et continuellement indiquée sur le cadran du voltmètre de l'Alimentation; de même, le courant consommé est indiqué sur le cadran de l'ampèremètre de l'Alimentation.

CHAPITRE IVMANIPULATIONS4-1- ETUDE DE L'OSCILLATEUR A EFFET GUNN4-1-1- RAPPELS THEORIQUES: EFFET GUNN

En étudiant l'effet des champs électriques élevés dans les semi conducteurs, J.B.GUNN, chercheur britannique, découvrit, que, dans certaines conditions d'alimentation de l'Arsénium de Gallium, il se produisaient des oscillations "Très Haute Fréquence". Le champ électrique utilisé était alors de l'ordre de 1000V/cm à 2000V/cm.

Après une longue expérimentation, J.B.GUNN montra que ce phénomène était un effet de volume, qui se produisait dans toute l'étendue d'un région du cristal.

Il put observer que des échantillons de faibles dimensions donnaient naissance à des oscillations périodiques.

Il réussit aussi à prouver, qu'une perturbation produite au niveau de la cathode du semi conducteur provoquait une augmentation localisée, du champ électrique, et que cette région à champ élevé, se déplaçait ensuite vers l'Anode où il disparaissait, puis un autre domaine se formait alors à la Cathode, et ainsi de suite.

Le temps de TRANSIT de la Cathode vers l'Anode détermine la fréquence d'oscillation; cette fréquence est donc inversement proportionnelle à la fréquence du cristal.

La diode à effet GUNN, dont la caractéristique courant-tension est donnée ci-dessous (Figure N° 4-1-1), est utilisée comme élément actif pour produire des oscillations en hyperfréquence. Elle est pour cela montée dans une cavité résonante dont le volume détermine la fréquence d'oscillation.

La diode ne fonctionne alors plus en mode dit de "Temps de Transit"

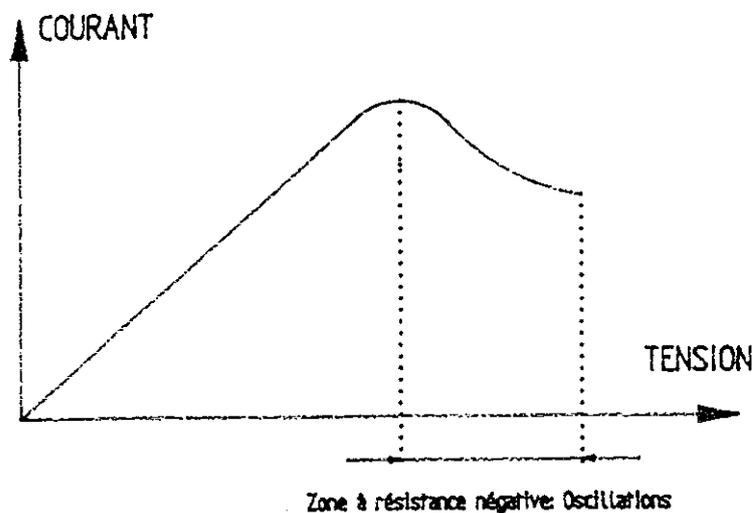
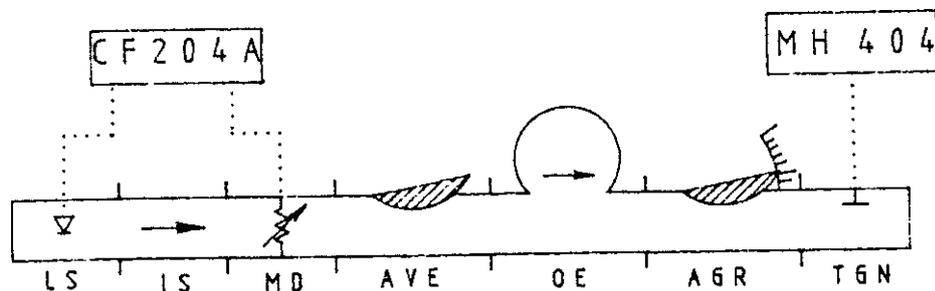


Figure N° 4-1-1: Courbe de réponse: Courant = f(tension)

4-1-2- RELEVÉ DE LA CARACTÉRISTIQUE COURANT-TENSION DE LA DIODE A EFFET GUNN

- réaliser le montage correspondant à la figure N° 4-1-2
- Tourner le bouton de commande de la tension "OSC GUNN" de l'alimentation CF 204A, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, et l'amener en butée ( Tension d'alimentation  $\approx 0V$  ).
- augmenter progressivement la tension par pas de 0,5V, sans jamais dépasser 11V, et relever le courant correspondant (lectures directes sur les galvanomètres de l'alimentation CF 204A).
- tracer la caractéristique Courant-Tension de la diode à effet GUNN et la comparer avec celle de la figure N° 4-1-1.

Figure N° 4-1-2

4-1-3- RELEVÉ DE LA CARACTÉRISTIQUE DÉPLACEMENT-FRÉQUENCE DE L'OSCILLATEUR À EFFET GUNN

Pour régler l'Oscillateur HF à une fréquence déterminée, procéder de la façon suivante:

- 1) Consulter la courbe d'étalonnage de l'Ondemètre OE 90 et positionner son micromètre à la valeur correspondant à la fréquence désirée.
- 2) Tourner le micromètre de commande de l'Oscillateur GUNN dans le sens des aiguilles d'une montre si la fréquence est trop faible par rapport à la fréquence désirée, ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans le cas contraire.
- 3) Lorsque la fréquence est proche de la valeur désirée, il convient de tourner lentement le micromètre, jusqu'à obtention de la résonance correspondant à la fréquence recherchée.

Il est possible, à partir de ces mesures de fréquence, de relever la caractéristique Déplacement-Fréquence (position du court-circuit) de l'Oscillateur à effet GUNN, LS 403.

4-1-4- RELEVÉ DE LA CARACTÉRISTIQUE PUISSANCE-FRÉQUENCE DE L'OSCILLATEUR À EFFET GUNN

- effectuer le montage de la figure N° 4-1-4.
- placer l'Atténuateur AVE 90 sur l'atténuation maximale.
- positionner l'Atténuateur AGR 90 sur 20dB.
- choisir la gamme de mesure 1mW sur le MH 400 ( voir § 4-3).
- sur l'Alimentation CF 204A, enlever la modulation en signaux carrés, et supprimer l'atténuation à l'aide du bouton de commande de Niveau.
- mettre l'Alimentation CF 204A sous tension.
- supprimer progressivement et totalement l'atténuation introduite par l'Atténuateur Variable AVE 90.
- lire la puissance indiquée par le MH 400.

- multiplier cette valeur par 100 pour obtenir la puissance réellement fournie par l'Oscillateur GUNN afin de tenir compte de l'atténuation de 20dB introduite par l'Atténuateur AGR 90.
- à l'aide de l'Ondemètre OE 90, mesurer la fréquence fournie par l'Oscillateur GUNN.
- reporter sur un graphe la puissance mesurée en fonction de la fréquence.
- relever plusieurs points entre 8,5GHz et 9,6GHz.

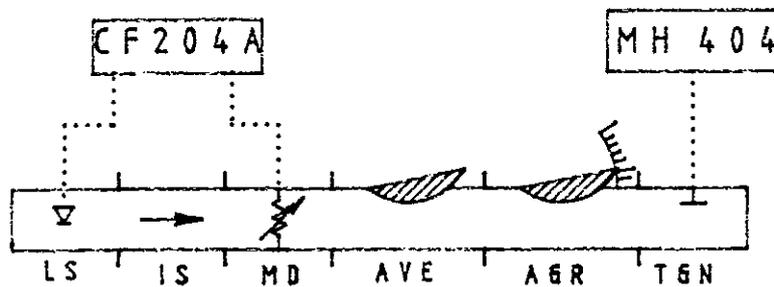


Figure N° 4-1-4

## 4-2- MESURE DE LA FREQUENCE

### 4-2-1- GENERALITES

Cette mesure est faite en utilisant l'Ondemètre OE 90.

Cet élément est un ondemètre à absorption, composé:

- d'un tronçon droit de guide d'onde rectangulaire
- d'une cavité résonante cylindrique couplée en dérivation sur le tronçon de guide d'onde.

Le volume de la cavité résonante est changé par déplacement d'un court-circuit, et toute variation de volume provoque un changement de la fréquence de résonance.

A la résonance, l'énergie hyperfréquence transmise par le tronçon de guide d'onde droit, est absorbée par la cavité résonante, et la mesure de fréquence se fait grâce à un micromètre gradué en centièmes de millimètres.

Une courbe d'étalonnage permet de déterminer une fréquence en fonction du déplacement indiqué par le micromètre.

### 4-2-2- RECHERCHE DE LA FREQUENCE

Pour faire une mesure de fréquence, il suffit d'insérer en cascade, dans le montage de mesure, un ondemètre OE 90 (Figure N° 4-1-2)

- 1) Tourner la vis micrométrique de l'ondemètre jusqu'à obtenir une absorption de l'énergie HF. Cette absorption se caractérise par une brusque déviation vers zéro de l'indication du galvanomètre. Lire la position indiquée par la vis micrométrique, l'indication du galvanomètre étant le plus proche possible du zéro.
- 2) La position repérée, se reporter à la courbe fournie avec l'ondemètre afin de déterminer la fréquence.
- 3) La mesure effectuée, ne pas laisser l'ondemètre sur sa résonance.

### 4-3- MESURE DE PUISSANCE

#### 4-3-1- GENERALITES

La mesure de puissance est une mesure très importante en hyperfréquence, car elle permet de déterminer les valeurs des énergies mises en jeu.

Ces mesures précises sont réalisées aisément avec un Milliwattmètre Hyperfréquence MH 400 ORITEL, équipé de sa sonde ST 404.

Le principe de cette mesure est basé sur l'emploi de thermistances hyperfréquences montées dans un pont de Wheatstone, dont on mesure le déséquilibre.

L'énergie hyperfréquence à mesurer provoque un échauffement de la thermistance, qui déséquilibre le pont. La tension de déséquilibre est proportionnelle à la puissance mesurée. (voir notice technique du Milliwattmètre MH 400).

Pour la mise en fonctionnement, le tarage du MH 400, et les précautions d'emploi, consulter la documentation technique de l'appareil.

#### 4-3-2- MESURE D'UNE PUISSANCE

Lorsqu'on ignore l'ordre de grandeur de la puissance à mesurer, il est impératif de prendre certaines précautions, notamment, pour ne pas appliquer à la sonde de mesure une puissance supérieure à 10mW.

Les réglages du zéro étant effectués, pour mesurer une puissance, il faut procéder de la façon suivante:

- réaliser le montage donné par la figure N° 4-3-2.
- positionner le MH 400 sur la gamme 10mW (voir notice technique pour utilisation).
- positionner l'Atténuateur AVE 90 sur l'atténuation maximale.
- mettre l'Alimentation CF 204A en fonctionnement (voir § 3-3).

- diminuer progressivement l'atténuation introduite par l'Atténuateur Variable AVE 90, jusqu'à ce que l'aiguille du Milliwattmètre MH 400 donne une indication comprise entre 1mW et 10mW.
- lire directement sur le galvanomètre du MH 400 la puissance mesurée en mW.

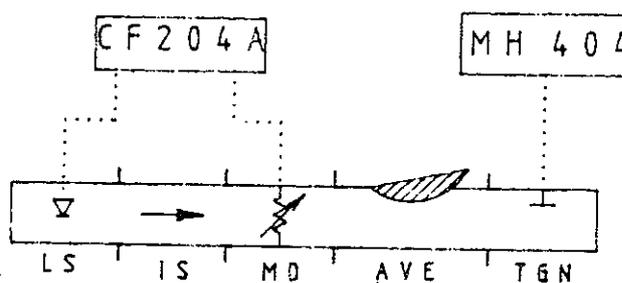


Figure N° 4-3-2

**4-4- MESURE D'ATTENUATION****4-4-1- GENERALITES**

D'une manière générale, l'atténuation exprime une réduction d'amplitude, tension ou courant, donc de puissance, provoquées par l'introduction dans le circuit d'un élément atténuateur.

Il y aura lieu de distinguer deux sortes d'atténuations:

**a) la perte d'insertion L**

C'est le cas où l'atténuation est placée dans une ligne de transmission dont les impédances d'entrée et de sortie sont différentes. La perte d'insertion:

$$L \text{ (dB)} = 10 \log_{10} P_1/P_2$$

sera une fonction:

- des caractéristiques de l'atténuateur
- de l'impédance du générateur
- de l'impédance de charge

**b) l'atténuation A**

C'est le cas où l'atténuateur est placé dans une ligne de transmission d'impédance réelle et connue, et refermée à ses deux extrémités par un générateur et une charge adaptée à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission.

Avec ces spécifications complémentaires, la perte d'insertion devient l'atténuation et se définit d'une façon équivalente:

$$A \text{ (dB)} = 10 \log_{10} P_1/P_2$$

A = atténuation en dB

P1 = puissance dissipée dans la charge sans l'atténuateur

P2 = puissance dissipée dans la charge avec l'atténuateur

En hyperfréquence, étant donné que les impédances et le mode de propagation des lignes de transmission sont rigoureusement définis par leurs dimensions transversales et que ces lignes sont terminées sur leurs impédances caractéristiques, il ne s'agit que de l'atténuation.

Toutefois, les lignes de transmission à constantes réparties, tels les guides d'ondes, sont caractérisées par leur constante de propagation définie par:

$$\lambda = \alpha + j\beta$$

$\beta$  : exprime la variation de phase en radians le long de la ligne, c'est la constante de phase.

$\alpha$  : exprime l'atténuation en népers par unité de longueur. C'est la constante d'atténuation du guide d'onde.

Dans toutes les mesures qui seront maintenant décrites, la constante d'atténuation  $\alpha$ , propre au guide d'onde, sera considérée comme nulle.

Les mesures d'atténuation peuvent être faites de nombreuses façons nous retiendrons les mesures de base suivantes:

1°) Mesure directe:

Mesure de la puissance P1

Mesure de la puissance P2

Calculer le rapport:

$$A \text{ (dB)} = 10 \log_{10} P1/P2$$

2°) Mesure par substitution ou par comparaison à un atténuateur étalonné.

3°) Par calibration

- de la loi de détection d'un détecteur

- ou de la variation de résistance d'une thermistance ou d'un bolomètre en fonction de la puissance HF indiquée.

Les différentes manipulations décrites ci-dessous, les repères servant à la mesure seront donnés par un indicateur de ROS: IR 202 (ou IR 205).

Il convient donc:

1) de se reporter à la notice technique pour la mise en oeuvre de l'appareil.

2) de moduler l'onde hyperfréquence en signaux carrés de 1kHz, à l'aide du Modulateur MD 90 et en agissant sur l'Alimentation CF 204A (voir documentation technique).

4-4-2- MESURE PAR COMPARAISON

A l'aide des différents éléments constituant cet équipement, il est possible de faire une mesure d'atténuation par comparaison en procédant de la façon suivante:

- effectuer le montage indiqué figure N° 4-4-2.
- placer l'Atténuateur de précision AGR 90 à 0dB.
- placer l'Atténuateur Variable AVE 90 à une certaine atténuation et repérer l'indication du galvanomètre de l'IR 202 ou l'IR 205 (par exemple  $I_1$ )
- placer maintenant l'Atténuateur Variable AVE 90 à 0dB et atténuer à l'aide de l'Atténuateur de précision AGR 90, jusqu'à obtenir sur le galvanomètre de l'IR 202 (ou IR 205) la même déviation que précédemment ( $I_1$ ).
- lire directement l'atténuation en dB sur l'Atténuateur de précision AGR 90.

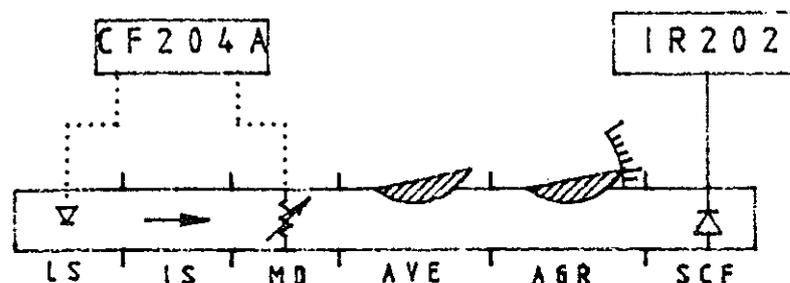
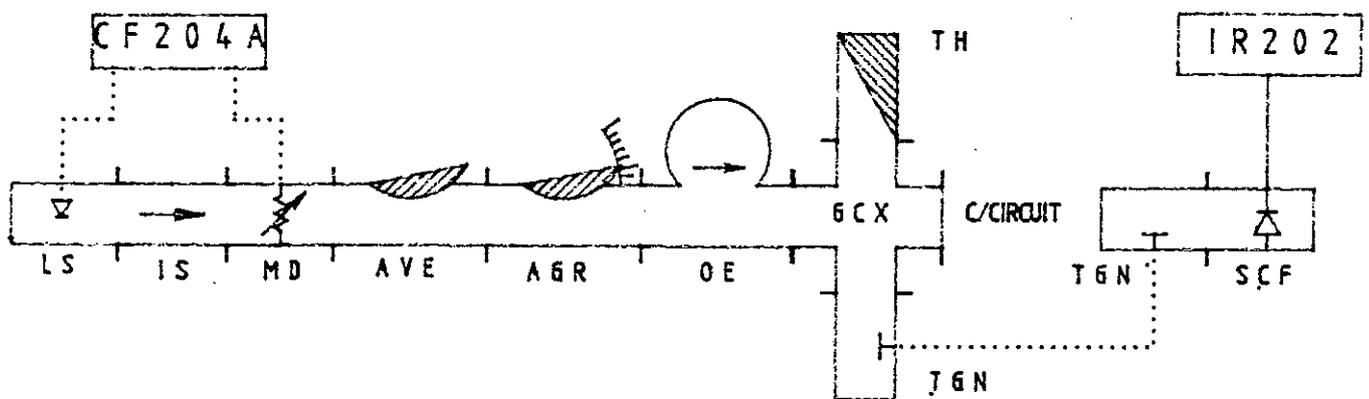


Figure N° 4-4-2

Cette manipulation pourra être réalisée pour différentes atténuations introduites par l'Atténuateur de tarage AVE, ce qui permettra d'avoir un étalonnage de cet atténuateur variable.

4-4-3- MESURE PAR SUBSTITUTION

- effectuer le montage indiqué figure N° 4-4-31.
- placer l'Atténuateur de précision AGR à 0dB.
- placer l'Atténuateur Variable AVE 90 à une atténuation permettant une lecture correcte sur le galvanomètre de l'IR 202 (ou IR 205), repérer cette indication ( $I_1$  par exemple).

Figure N° 4-4-31

- placer ensuite le montage cristal SCF 90 directement après l'Ondemètre OE 90 suivant le montage de la figure N° 4-4-32.
- atténuer à l'aide de l'Atténuateur AGR 90, jusqu'à obtenir le repère précédent ( $I_1$ ).

- lire directement en dB sur l'Atténuateur de précision AGR 90 , pour connaître l'atténuation introduite par le coupleur, les transitions et le câble.

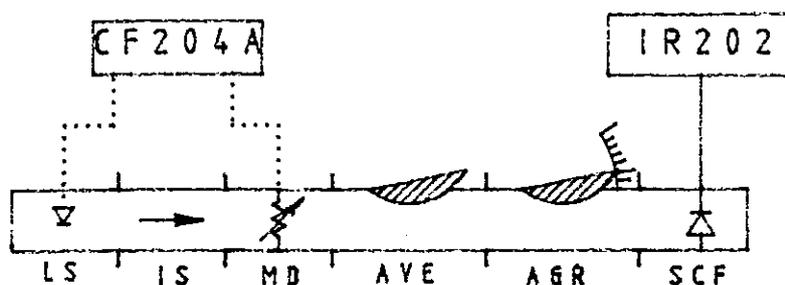


Figure N° 4-4-32

Cette même manipulation pourra être faite:

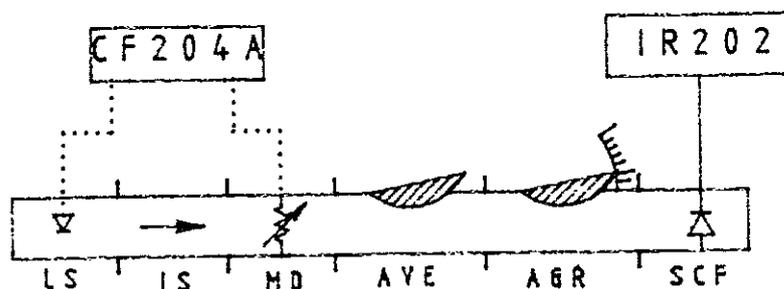
- soit avec le coupleur seul
- soit avec les transitions et le câble

Il est intéressant de faire ces mesures d'atténuations en plusieurs points de fréquences.

Par cette méthode, on pourra également mesurer l'atténuation résiduelle de l'atténuateur variable non calibré.

Pertes d'Insertion de l'Atténuateur AVE 90

- réaliser pour cela le montage indiqué figure N° 4-4-33
- placer l'Atténuateur Variable AVE 90 à 0dB
- agir sur l'Atténuateur de précision AGR 90 pour avoir une déviation correcte sur l'indicateur de l'IR 202 (ou IR 205).
- repérer la position et l'atténuation correspondante de l'Atténuateur de précision AGR 90
- enlever ensuite l'Atténuateur AVE 90

Figure N° 4-4-33

- brancher directement l'Atténuateur calibré après l'Oscillateur GUNN (montage indique figure N° 4-4-34)
- atténuer, à l'aide de l'Atténuateur AGR 90, jusqu'à obtenir la même déviation que précédemment.
- la différence d'atténuation obtenue sur l'AGR 90 donnera une indication sur l'atténuation résiduelle introduite par l'Atténuateur Variable AVE 90.(Pertes d'insertion).

Au cours de cette manipulation, veiller à ne pas dérégler l'Oscillateur GUNN, ce qui ferait varier le niveau HF et la fréquence, et fausserait la mesure.

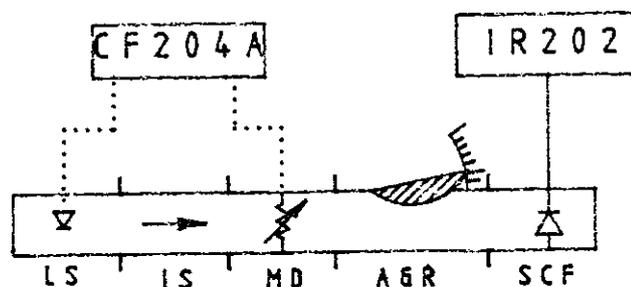


Figure N° 4-4-34

4-4-4- MESURE D'ATTENUATION PAR CALIBRATION

Voir § 4-5

4-5- RELEVÉ DE LA CARACTÉRISTIQUE D'UN DÉTECTEUR: SFC 90

Le procédé consiste à relever le courant cristal détecté en fonction du niveau HF appliqué.

Effectuer le montage indiqué figure N° 4-5

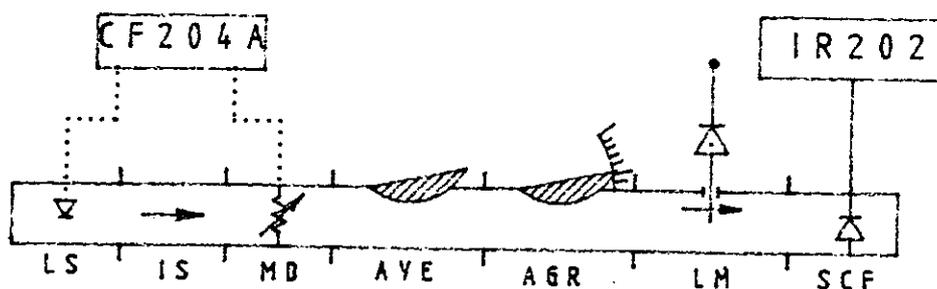


Figure N° 4-5

- placer l'Atténuateur de précision AGR 90 à 0dB
- régler l'AVE 90 jusqu'à obtenir une déviation correcte de l'Indicateur de ROS: IR 202 (ou IR 205).
- pour la position 0 de l'Atténuateur AGR 90, lire l'indication A1 donnée par l'IR 202 (ou IR 205).
- pour la position 3dB de l'Atténuateur AGR 90, lire l'indication A2.
- pour la position 6dB de l'Atténuateur AGR 90, lire l'indication A3.
- etc...
- continuer ainsi pour obtenir le maximum de points, et tracer la courbe: Atténuation en dB en fonction de la tension détectée.

En utilisant le détecteur ainsi étalonné, l'atténuation correspondant à une variation de niveau enregistrée sur le galvanomètre pourra être déterminée.

#### 4-6- COUPLEUR DIRECTIF

##### 4-6-1- GENERALITES

Il est très fréquemment nécessaire d'évaluer la puissance microonde transmise dans une ligne de transmission reliant, par exemple, un émetteur à un aérien. Cette mesure doit, le plus souvent, être faite à l'aide d'un appareillage simple, peu encombrant et n'apportant pas un poids supplémentaire à l'installation déjà existante.

Le coupleur directif, associé à un ensemble détecteur et à un indicateur, permet d'effectuer cette mesure en prélevant une partie de l'énergie incidente, tout en laissant passer l'énergie qui pourrait être réfléchiée par l'impédance de charge de la ligne de transmission.

Il est constitué d'un tronçon de guide d'onde, appelé bras principal, qui est placé en série dans la ligne de transmission de l'énergie à mesurer et d'un tronçon de guide d'onde auxiliaire accolé au bras principal, servant au transport de l'énergie couplée. L'une des extrémités du guide auxiliaire est terminée par une bride pour permettre le raccordement d'un système détecteur, l'autre extrémité est fermée par une charge adaptée, afin d'absorber l'énergie résiduelle transmise, due à la directivité du coupleur.

Ces deux guides sont couplés par des trous, des fentes, des croix, etc..., suivant le type du coupleur.

Les deux caractéristiques essentielles d'un coupleur sont:

- le couplage
- la directivité

### a) Couplage

Le couplage est exprimé en dB et correspond au rapport de la puissance  $P_1$  recueillie sur la sortie couplée à la puissance incidente  $P$  (figure N° 4-6-11)

$$C_{(dB)} = 10 \log_{10} P/P_1$$

Le couplage peut être de 10, 20, 30, 40 dB etc..., suivant l'utilisation.

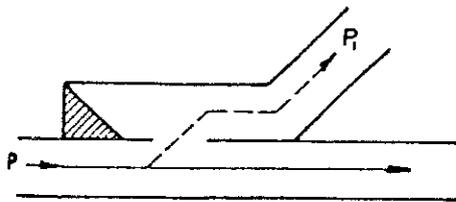


Figure N° 4-6-11

Il existe des types de coupleurs à faible couplage, dont l'emploi est plus particulièrement destiné aux têtes HF mélangeuses utilisées dans les radars. Leur but n'est plus de prélever une partie de l'énergie reçue, mais plutôt de répartir l'énergie: tels les coupleurs hybrides 3dB partageant en deux l'énergie reçue, cette énergie HF est transmise sur des cristaux mélangeurs.

## b) Directivité

La directivité est également exprimée en dB.

Elle peut être considérée comme une mesure de la qualité du couplage. En effet, plus la directivité sera grande en dB, plus la qualité du couplage sera bonne. (figure N° 4-6-12)

$$D_{(dB)} = 10 \log_{10} P_1/P_2$$

Il apparait donc qu'un coupleur ayant une directivité élevée ne sera pas ou peu sensible à l'énergie réfléchie provenant de l'impédance de charge de la ligne de transmission.

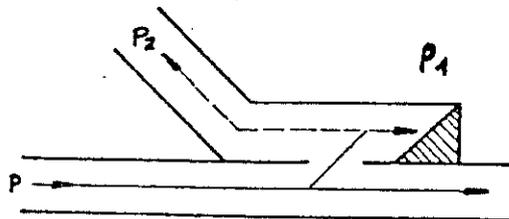


Figure N° 4-6-12

Dans le cas d'un couplage électromagnétique, par exemple, cas d'un trou dans l'axe du grand côté d'un guide, la répartition du champ électrique dans le guide auxiliaire, au voisinage du trou, est semblable à celle que produirait un dipôle électrique oscillant dont le Moment serait parallèle au champ électrique du guide principal et de même sens (figure N° 4-6-13)

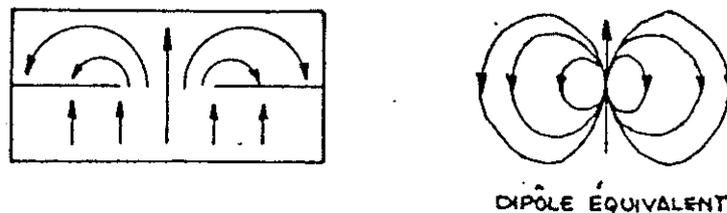


Figure N° 4-6-13

De même, le champ magnétique dans le guide auxiliaire se comporte comme si le trou rayonnait comme un dipôle magnétique, dont le Moment serait parallèle au champ magnétique transverse du guide principal, mais cette fois en sens inverse (figure N° 4-6-14)

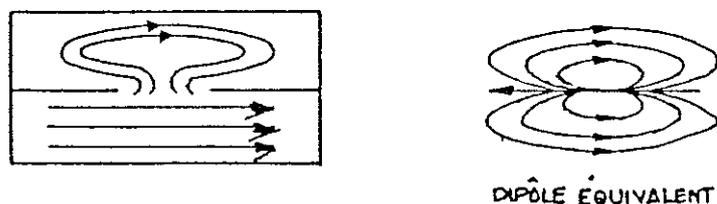


Figure N° 4-6-14

C'est ce changement de sens qui produit l'annulation de l'onde dans une des directions de la branche auxiliaire du coupleur, créant ainsi la directivité du coupleur.

4-6-2- MESURE DU COUPLAGE

- effectuer le montage indiqué figure N°4-6-21 (brancher le coupleur directif en respectant le sens indiqué par la flèche)
  - a) montage du détecteur sur la sortie couplée en 2
  - b) charges en 3 et 4
- placer l'Atténuateur Calibré AGR 90 à 0dB et agir sur l'Atténuateur Variable AVE 90, de façon à obtenir une déviation correcte sur le galvanomètre de l'IR 202 (ou IR 205).
- relever l'indication donnée par l'IR 202 (ou IR 205).
- réaliser, ensuite, le montage donné sur la figure N° 4-6-22.
  - a) détecteur sur la sortie directe en 3
  - b) charges en 2 et 4
- agir sur l'Atténuateur Calibré AGR 90 de façon à ramener l'indication du galvanomètre de l'IR 202 ou (IR 205) au repère obtenu avec le montage précédent
- lire sur le cadran de l'Atténuateur AGR 90 l'atténuation correspondant à la valeur du couplage mesuré.

Ces manipulations pourront être effectuées en plusieurs points de fréquence afin de déterminer la constance du couplage en fonction de la fréquence

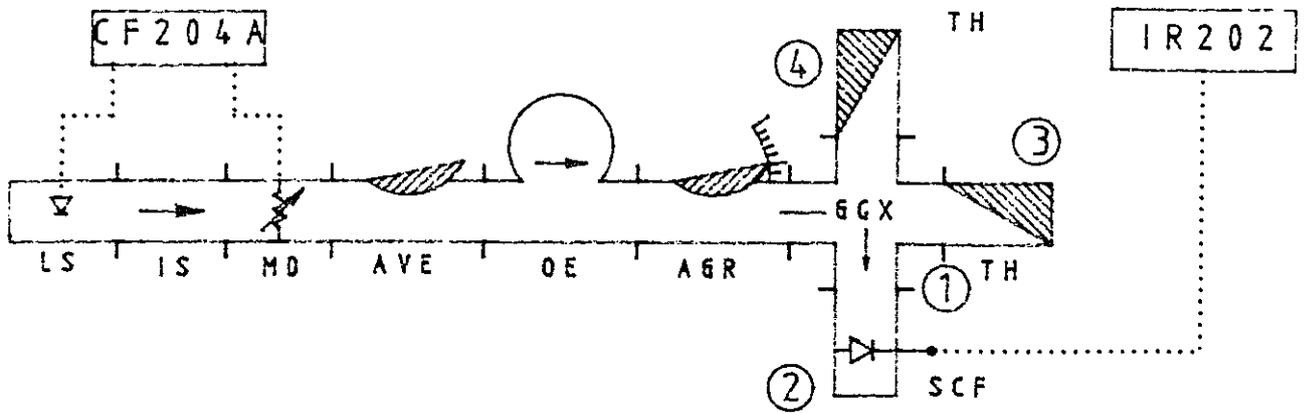


Figure N° 4-6-21

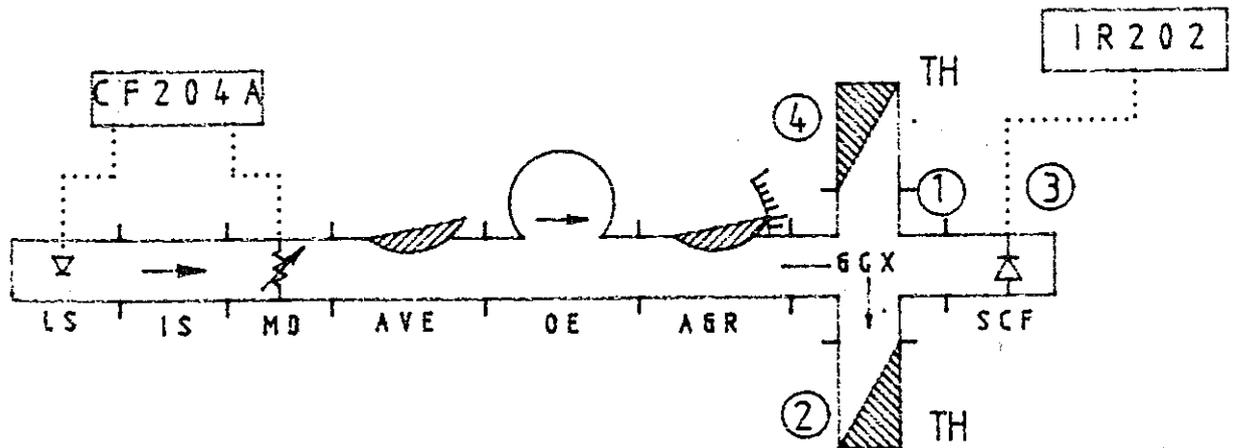


Figure N° 4-6-22

4-6-3- MESURE DE LA DIRECTIVITE

- effectuer un montage identique à celui indiqué figure N° 4-6-21 mais en inversant le détecteur et la charge:
  - a) montage détecteur sur la sortie directive en 4
  - b) charges en 2 et 3
- placer l'Atténuateur Calibré AGR 90 à 0dB et lire l'indication du galvanomètre de l'IR 202 (ou IR 205).
- repérer la déviation obtenue sur le galvanomètre avec le montage de la figure N° 4-6-21
- effectuer ensuite, le montage indiqué figure N° 4-6-22:
  - a) montage détecteur sur la sortie directe en 3
  - b) charges en 2 et 4
- agir sur l'Atténuateur Calibré AGR 90 de façon à ramener l'indication du galvanomètre au repère obtenu avec le montage précédent, et lire directement l'atténuation correspondant à la directivité recherchée.

Ces manipulations pourront être faites en plusieurs points de fréquence, afin de déterminer la constance de la directivité en fonction de la fréquence. Il sera très certainement nécessaire d'utiliser une gamme de mesure sensible de l'IR 202 (ou IR 205) afin d'obtenir un niveau lisible sur le galvanomètre.

4-7- MESURES DU RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE4-7-1- DEFINITION

Taux d'onde stationnaire (figure N° 4-7-1)

La tension  $E$  en n'importe quel point d'une ligne de transmission peut être considérée comme la somme  $E_i + E_r$  des tensions des ondes incidente et réfléchie, en ce point. Il en résulte une distribution de tension sur la ligne que l'on appelle répartition d'onde stationnaire.

En effet, en certains points de la ligne, les tensions des deux ondes sont en phase et elles s'ajoutent, produisant ainsi, des maxima de tension; en d'autres points, elles sont en opposition de phase et elles se retranchent, produisant alors des minima.

La différence entre les maxima et les minima sera d'autant plus prononcée que la valeur de l'impédance de charge s'éloigne de la valeur de l'impédance caractéristique de la ligne.

Par contre, il n'y a pas d'onde stationnaire lorsque:

$$Z_C = Z_0$$

$Z_C$  = impédance de charge

$Z_0$  = impédance caractéristique de la ligne

La distance entre deux minima ou deux maxima consécutifs est égale à une demi-longueur d'onde dans la ligne:  $\lambda g/2$

Durant le trajet  $\lambda g/2$ , une onde unique subit un déphasage égal à  $\pi$  radians.

Le rapport entre la valeur d'un maximum et d'un minimum de tension (ou courant) est appelé "Rapport d'onde stationnaire" (R.O.S.), c'est à dire:

$$\text{ROS} = S = \frac{E \text{ max}}{E \text{ min}}$$

or:

$$E \text{ max} = | E_i | + | E_r |$$

$$E \text{ min} = | E_i | - | E_r |$$

d'où:

$$S = \frac{E \text{ max}}{E \text{ min}} = \frac{| E_i | + | E_r |}{| E_i | - | E_r |} = \frac{1 + | E_r/E_i |}{1 - | E_r/E_i |}$$

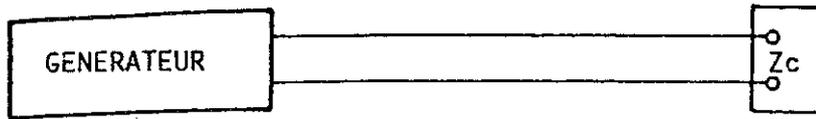
Le rapport vectoriel de l'onde réfléchie à l'onde incidente est appelé coefficient de réflexion et est représenté par le symbole  $\rho$ .

$$\rho = \frac{E_r}{E_i}$$

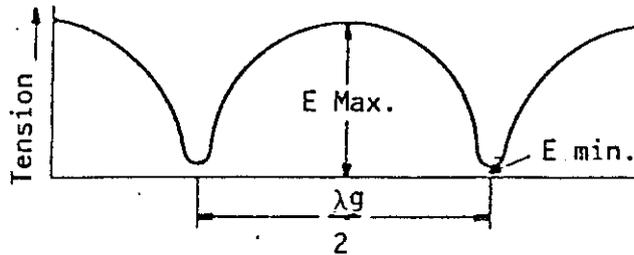
La relation entre la valeur du coefficient de réflexion et du rapport d'onde stationnaire  $S$  est donné par:

$$\rho = \frac{S - 1}{S + 1} \qquad S = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

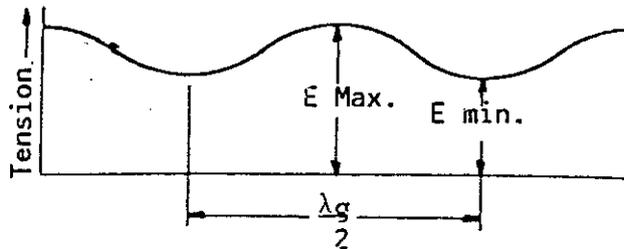
Si la ligne n'a pas d'atténuation, le rapport d'onde stationnaire est partout le même et a une valeur déterminée par le coefficient de réflexion de l'impédance de charge. Cependant, si la ligne a des pertes, le rapport d'onde stationnaire diminue au fur et à mesure que l'on se déplace vers la charge.



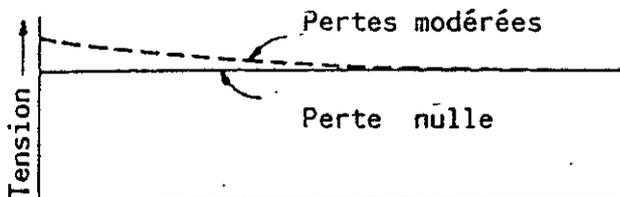
(a) Ligne avec générateur et charge



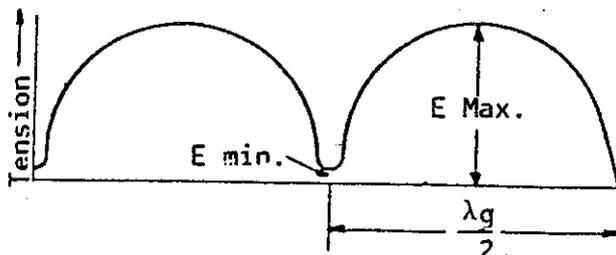
(b) Charge circuit ouvert (  $Z_c = \infty$  )



(c) Impédance de charge modérément élevée (  $\infty < Z_c < Z_0$  )



(d) Impédance de charge égale à l'impédance caractéristique (  $Z_c = Z_0$  )



(e) Impédance de charge court-circuitée

**FIGURE N° 4-7-1: DISTRIBUTION D'ONDES STATIONNAIRES CORRESPONDANT AUX DIFFERENTES CONDITIONS DE CHARGE**

4-7-2- UTILISATION D'UNE LIGNE A FENTE POUR LA MESURE DU RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE

La valeur du rapport d'onde stationnaire existant sur une ligne de transmission est mesurée généralement par un détecteur d'ondes stationnaires.

Celui-ci est constitué d'une section de guide ayant une fente axiale sur le grand côté.

Le long de la ligne un chariot mobile permet de déplacer une sonde dans la fente.

La distribution de l'onde stationnaire est obtenue en déplaçant la sonde le long de la fente et en observant la variation résultante du courant détecté. L'enfoncement de la sonde dans le guide d'onde reste constant lorsque le chariot se déplace le long de la ligne.

Une échelle graduée sur la ligne permet de déterminer avec précision la position de la sonde par rapport à l'extrémité de la ligne où l'impédance inconnue est connectée.

Le rôle de la sonde est de prélever la tension (ou courant) le long de la ligne. Elle se compose:

- d'un élément de ligne coaxiale
- d'une antenne

L'antenne constitue la terminaison du conducteur central de la ligne coaxiale de la sonde. Elle pénètre dans le guide à travers la fente. L'antenne ainsi placée, parallèlement au champ électrique, l'énergie HF captée est transmise dans l'élément coaxial de la sonde.

L'élément de ligne coaxiale transmet l'énergie HF à un cristal détecteur; une section de ligne coaxiale parallèle, munie d'un court-circuit mobile, permet d'obtenir le maximum d'énergie HF détectée et de présenter une très forte impédance vue de la ligne de transmission, et par suite, de perturber au minimum le champ dans le guide.

Pour minimiser l'effet de sonde, l'enfoncement de l'antenne est réglé au minimum.

Pour éviter le rayonnement, la largeur de fente est étroite, et la paroi du guide épaisse.

Montage utilisé

Le montage utilisé est celui de la figure N°4-7-2.

- Régler l'atténuateur variable (AVE 90) pour obtenir une déviation correcte sur le galvanomètre de l'IR 202.

- Déplacer la sonde de la ligne (LM 90) et noter les valeurs Id max et Id min.

La détection peut être considérée comme quadratique si le niveau est très faible.  
On peut alors écrire:

$$ROS = S = \frac{Id \text{ max}}{Id \text{ min}} = \frac{V \text{ max}}{V \text{ min}}$$

Plusieurs manipulations peuvent être effectuées pour des enfoncements et des positions différentes du correcteur de l'adaptateur de ROS

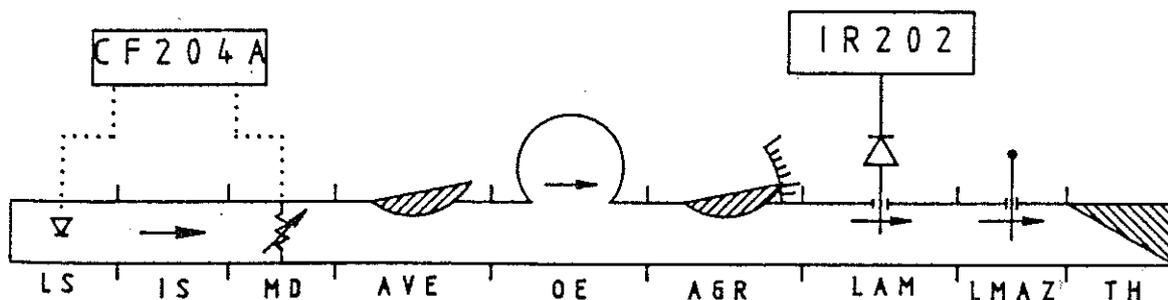


FIGURE N° 4-7-2

4-7-3- MESURE DE RAPPORTS D'ONDES STATIONNAIRES ELEVESMéthode de l'atténuateur calibré

Lorsque la valeur du rapport d'onde stationnaire à mesurer dépasse la valeur de 3, la mesure classique à la ligne qui consiste à mesurer le rapport  $V_{\max} / V_{\min}$  est entachée d'erreurs.

En effet, la loi du détecteur ne peut pas être considérée comme uniforme sur une aussi grande dynamique. La méthode consiste à mesurer ce rapport à l'aide d'un atténuateur calibré en procédant de la manière suivante.

Réaliser le montage de la figure N° 4-7-2.

- Placer la sonde sur un minimum et régler le niveau HF à l'aide d'un atténuateur pour obtenir une déviation bien lisible. Noter la valeur  $A_1$  de l'atténuateur AGR 90.

- Ensuite, placer la sonde sur un maximum, régler l'atténuation pour amener l'indicateur à la même valeur que précédemment et noter la nouvelle valeur  $A_2$  de l'atténuateur AGR 90.

- La différence d'atténuation entre ces deux positions minimum et maximum, donne la valeur du rapport d'onde stationnaire exprimé en décibels. Le rapport de tensions correspondant donne la valeur du rapport d'onde stationnaire.

$$A_1 - A_2 = 20 \log_{10} [ V_{\max} / V_{\min} ] = 20 \log_{10} S$$

Exemple: soit 12 dB la valeur d'atténuation mesurée, le rapport d'onde stationnaire correspondant est:

$$S = 3,98.$$

### Méthode de la ligne de mesure

Une autre méthode peut être utilisée pour la mesure des valeurs élevées de rapports d'ondes stationnaires.

Il s'agit d'éliminer l'erreur due au couplage de la sonde à laquelle s'ajoute une erreur due aux variations de la loi de lecture, le détecteur utilisé étant en général un cristal. La méthode se ramène à une mesure de distance entre deux points ayant une amplitude double de l'amplitude du minimum.

Réaliser le montage de la figure N° 4-7-2.

- Placer la sonde sur un minimum et régler le niveau HF à l'aide l'atténuateur AVE 90 pour obtenir une déviation bien lisible.

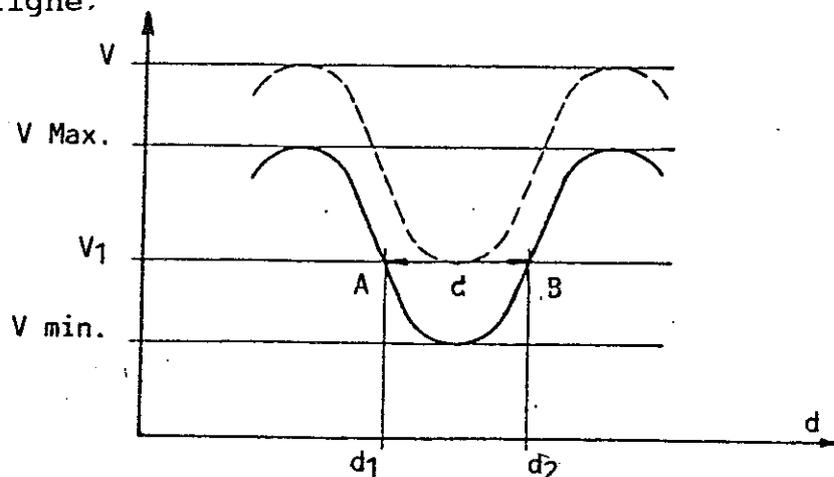
- Atténuer de 3 dB la puissance transmise dans la ligne, en réglant l'atténuateur AGR 90.

- Déplacer la sonde de part et d'autre du minimum et noter les distances  $d_1$  et  $d_2$  correspondant aux points A et B ayant même amplitude que celle du minimum précédent (figure N° 4-7-3).

- Pour obtenir la valeur du rapport d'onde stationnaire, il suffira d'introduire la distance  $d = d_1 - d_2$  dans l'équation.

$$S = 1 + \frac{1}{\sin^2 \frac{(\pi d)}{\lambda g}} \quad (4)$$

$\lambda g$  étant la longueur d'onde dans le guide, mesurée à l'aide de la ligne.



**FIGURE N° 4-7-3**

NOTA:

Supposons que:  $k = V_1 / V_m$

Connaissant  $k$ , le rapport d'onde stationnaire peut être calculé à partir de l'expression:

$$\text{ROS} = S = \frac{k^2 - \cos^2 \frac{(\pi d)}{\lambda g}}{\sin^2 \frac{(\pi d)}{\lambda g}}$$

Si  $k^2 = 2$ , l'expression se simplifie et devient:

$$S = 1 + \frac{1}{\sin^2 \frac{(\pi d)}{\lambda g}}$$

4-7-4- PUISSANCE PERDUE DANS L'ONDE REFLECHIE (FIG.N°4-7-4)

L'onde réfléchie sur la ligne de transmission peut être considérée comme une fraction de l'onde incidente qui est réfléchie par l'impédance de charge.

Cette puissance réfléchie n'étant pas absorbée par la charge peut être considérée comme perdue pour la transmission.

Il est donc intéressant de chiffrer cette puissance perdue en fonction du rapport d'onde stationnaire.

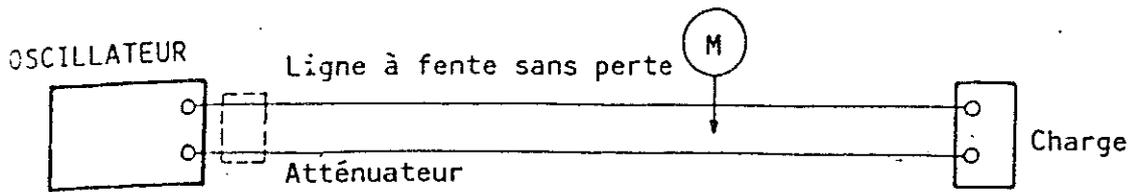
Cette perte peut s'écrire:

$$\text{pourcentage de puissance réfléchie} = 100 \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2$$

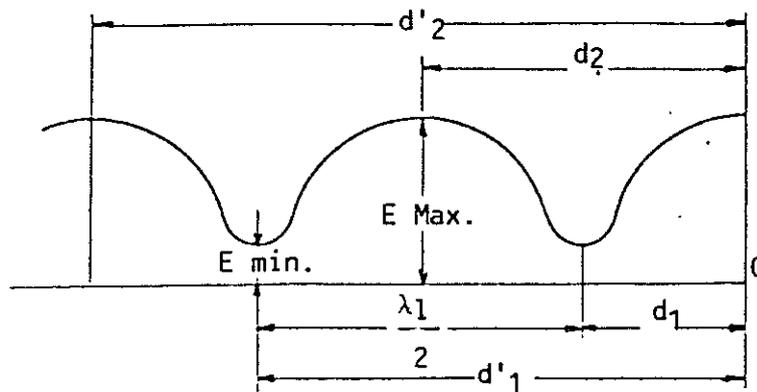
En effet, la puissance associée aux ondes incidente et réfléchie varie comme le carré de l'intensité du champ.

Il vient donc:

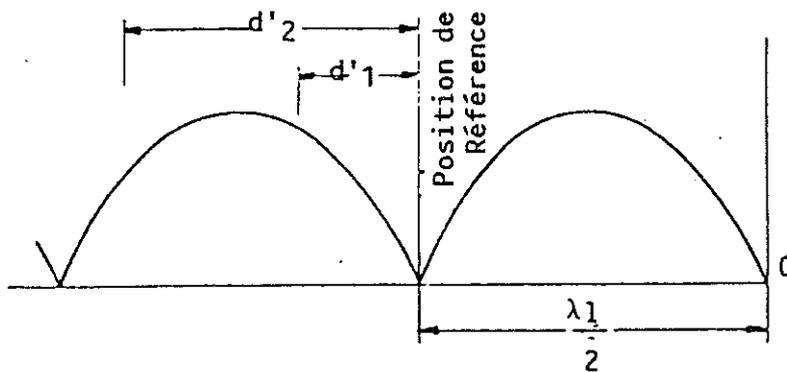
$$\text{pourcentage de puissance réfléchie} = 100 \left| \frac{S - 1}{S + 1} \right|^2 \quad (5)$$



(a) Circuit



(b) Distribution d'onde stationnaire pour  $Z$  légèrement différent de  $Z_0$



(c) Distribution d'onde stationnaire pour un court-circuit ( $Z_c = 0$ )

**FIGURE N° 4-7-4: DISTRIBUTION DU CIRCUIT SE RAPPORTANT A LA DETERMINATION DE L'IMPEDANCE A L'AIDE D'UN DETECTEUR D'ONDE STATIONNAIRE**

4-8- MESURE DE LONGUEUR D'ONDE4-8-1- DEFINITION

La fréquence et la longueur d'onde d'une onde électromagnétique sont liées à la vitesse de propagation de cette onde dans le milieu par la relation:

$$f\lambda = v$$

avec:

$f$  : fréquence

$\lambda$  : longueur d'onde

$v$  : vitesse de propagation de l'onde électromagnétique

La vitesse de propagation est variable avec le milieu et dépend de sa permittivité  $\epsilon$  et de sa perméabilité  $\mu$ .

En air libre, la vitesse de propagation est donnée par:

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

avec:  $\mu_0$  et  $\epsilon_0$  perméabilité et permittivité de l'air libre.

Pour un milieu quelconque:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

avec:

et  $\mu_r = \mu / \mu_0$  perméabilité du milieu

$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$  constante diélectrique relative

Pour la plupart des cas:

$$\mu / \mu_0 = 1$$

et

$$v = v_0 / \sqrt{\epsilon_r}$$

par suite

$$\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$$

avec:

$\lambda_0$  = longueur d'onde dans l'air libre  
 $\lambda$  = longueur d'onde dans un milieu de constante diélectrique  $\epsilon_r$

Dans l'air, la vitesse de propagation est généralement égale à  $2,99672 \cdot 10^{10}$  cm/s à 25°C et 60% d'humidité relative.

Pour une onde électromagnétique guidée, la vitesse de phase pour le mode  $TE_{10}$  dans un guide d'onde rectangulaire rempli d'air est:

$$v_p = \frac{v_0}{\sqrt{1 - \left[ \frac{v_0}{2af} \right]^2}}$$

avec:

$a$  = grande dimension intérieure du guide

De sorte que pour une fréquence déterminée, la longueur d'onde apparente dans le guide  $\lambda_g$  est supérieure à la longueur d'onde dans l'air libre  $\lambda_0$  (ou dans une ligne de transmission coaxiale).

$$(7) \quad \lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left[ \frac{v_0}{2a} \right]^2}} \quad \text{avec: } \lambda_0 = v_0 / f$$

$$\lambda_g = v_p / f$$

$$(8) \quad f = \frac{v_0 \sqrt{\lambda_g^2 + 4a^2}}{2a - \lambda_g}$$

La fréquence et la longueur d'onde sont liées par la relation précédente. Si l'une est connue, l'autre peut être calculée.

Les méthodes de mesure de fréquence font appel à des appareillages complexes: il est donc souvent utile de pouvoir mesurer la longueur d'onde d'une manière simple.

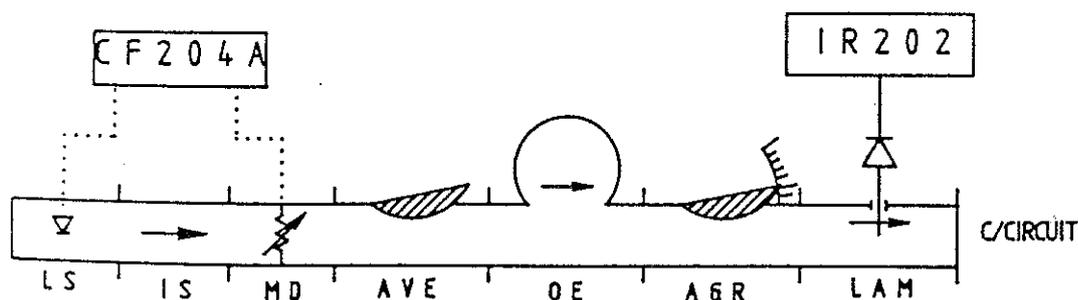
La méthode utilisée est basée sur le taux d'onde stationnaire existant dans une ligne de transmission. La précision obtenue est d'environ 0,05%.

A cet effet, une ligne de mesure est utilisée pour mesurer les écarts entre maxima et minima existants sur une ligne de transmission dans laquelle on a provoqué une répartition d'onde stationnaire.

La longueur d'onde  $\lambda_g$ , dans la ligne, correspond à la longueur physique entre deux maxima ou deux minima. La longueur d'onde dans l'air, et par suite la fréquence est déduite de l'expression (8) dans laquelle on introduit la valeur de  $\lambda_g$ .

4-8-2- MESURE A LA LIGNE

- Effectuer le montage de la figure N° 4-8-2
- Régler l'oscillateur GUNN à une fréquence
- Placer l'atténuateur de tarage AVE 90 au maximum d'atténuation, régler l'accord au maximum du courant détecté; agir sur l'atténuateur pour amener une lecture bien visible sur l'échelle du galvanomètre de l'IR 202 (ou IR 205).
- Déplacer le chariot de la sonde le long de la ligne et observer la répartition de l'onde stationnaire.
- Relever le nombre de maxima visibles, 3 par exemple.
- Noter avec précision la position du premier maximum et du troisième maximum.
- L'écart entre le premier et le troisième maximum est égal à  $\lambda_g$ . Pour relever avec précision la position d'un maximum, prendre une valeur moyenne entre 2 points d'amplitude équivalente de part et d'autre du maximum.
- Calculer  $\lambda$  et  $f$
- Comparer  $f$  trouvée à  $f$  mesurée avec l'ondemètre.

FIGURE N° 4-8-2

4-9- MESURE D'IMPEDANCE4-9-1- DEFINITION

Soit une ligne de transmission, d'impédance caractéristique  $Z_0$ , fermée sur une impédance de charge  $Z$ . Le coefficient de réflexion, rapport de l'onde réfléchie à l'onde incidente, au niveau de  $Z$  est:

$$\rho = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

D'une manière générale,  $Z$  est complexe, de la forme:

$$Z = R + jX$$

si bien que  $\rho$  est un nombre complexe de la forme:

$$\rho = | \rho | e^{j\theta}$$

L'amplitude  $| \rho |$  donne le rapport des amplitudes des ondes réfléchie et incidente, et la phase  $\theta$ , la rotation de phase lors de la réflexion.

La tension  $E$  en n'importe quel point de la ligne, peut être considérée comme la somme  $E_i + E_r$  des tensions des ondes incidente et réfléchie, en ce point. Il en résulte une distribution de tension sur la ligne que l'on appelle répartition d'onde stationnaire.

En effet, en certains points de la ligne, les tensions des deux ondes sont en phase et elles s'ajoutent, produisant ainsi des maxima de tension; en d'autres points, elles sont en opposition de phase et elles se retranchent, produisant alors des minima.

Le rapport entre la valeur d'un maximum et d'un minimum de tension (ou de courant) est appelé Rapport d'onde stationnaire  $S$ ; on peut écrire:

$$S = \frac{E \text{ max}}{E \text{ min}}$$

$$E \text{ max} = | E_i | + | E_r |$$

$$E \text{ min} = | E_i | - | E_r |$$

d'où

$$\frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{1 + \left| \frac{E_r}{E_i} \right|}{1 - \left| \frac{E_r}{E_i} \right|}$$

Or, il a été vu précédemment que le rapport vectoriel  $|E_r/E_i|$  est le coefficient de réflexion  $p$ , et la relation entre  $p$  et  $S$  est donnée par:

$$|p| = \frac{S - 1}{S + 1} \quad \text{ou} \quad S = \frac{1 + |p|}{1 - |p|}$$

ainsi,  $S$  varie entre 1 (adaptation parfaite) et  $+\infty$  (court-circuit ou circuit ouvert).

La rotation de phase  $\theta$  se traduit par un déplacement de tout l'ensemble de l'onde stationnaire, et si la distance entre l'impédance  $Z$  et le premier minimum de tension est  $d$ , on peut écrire:

$$\theta = 2\pi \frac{d}{\lambda g} \pm \pi$$

Le problème revient donc à obtenir  $Z$ , en module et en phase, à partir des éléments mesurables sur le guide. Les valeurs de  $R$  et de  $X$  sont obtenues en se reportant sur un abaque de transformation (abaque de SMITH).

4-9-2- UTILISATION DU DIAGRAMME DE SMITH (figure N° 4-9-2)

Des différents abaques utilisés pour l'étude des lignes de transmission, le plus employé est le diagramme de SMITH.

$$p = \frac{Z/Z_0 - 1}{Z/Z_0 + 1}$$

- $p$  : coefficient de réflexion
- $Z_0$  : impédance caractéristique (7)
- $Z$  : impédance de charge

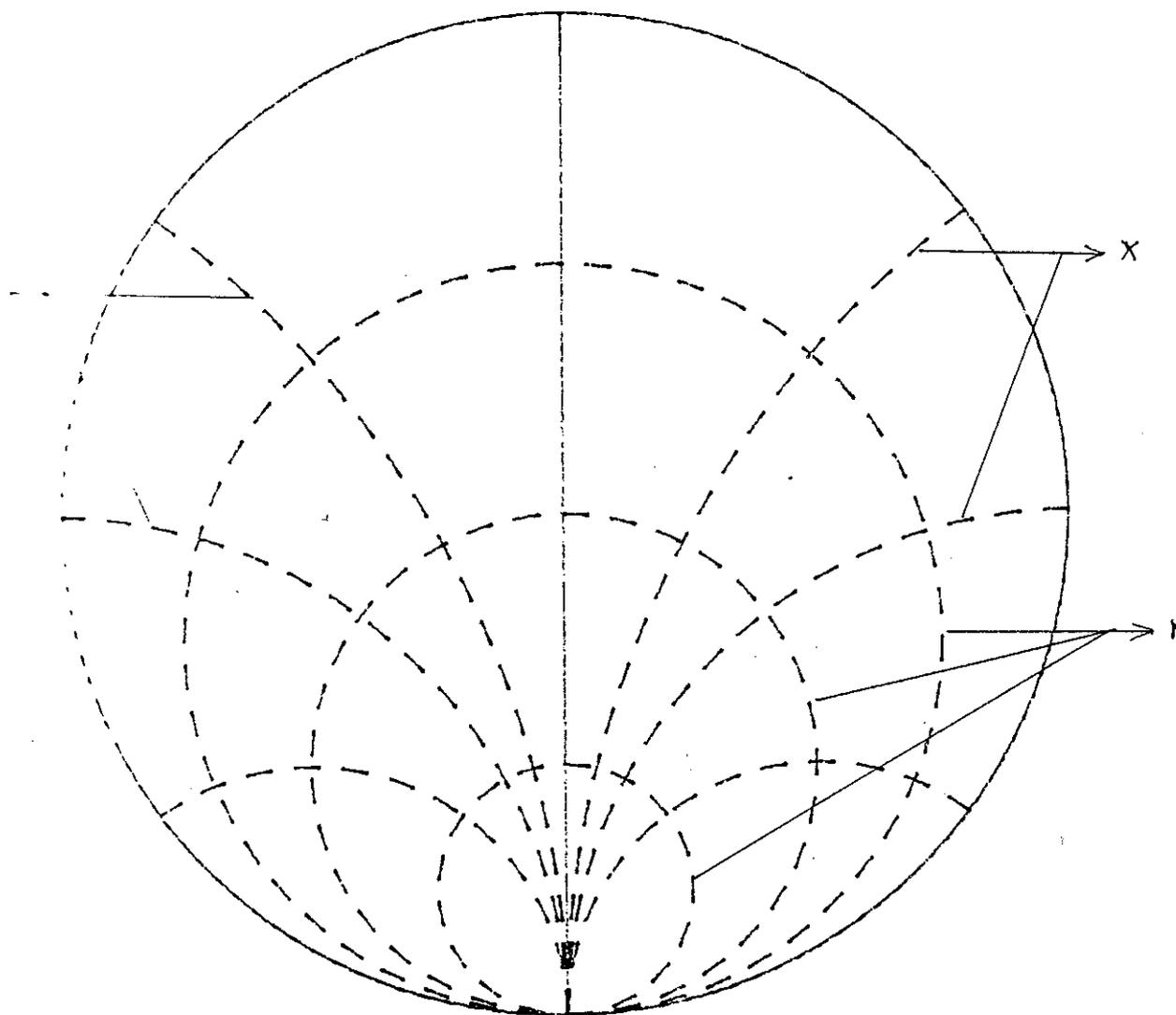
Un cercle correspondant à l'unité du coefficient de réflexion contient toutes les valeurs possibles des composantes résistives et réactives, respectivement  $r$  et  $x$  de l'impédance normalisée, qui a des éléments de résistance positifs.

$$\frac{Z}{Z_0} = r + jx$$

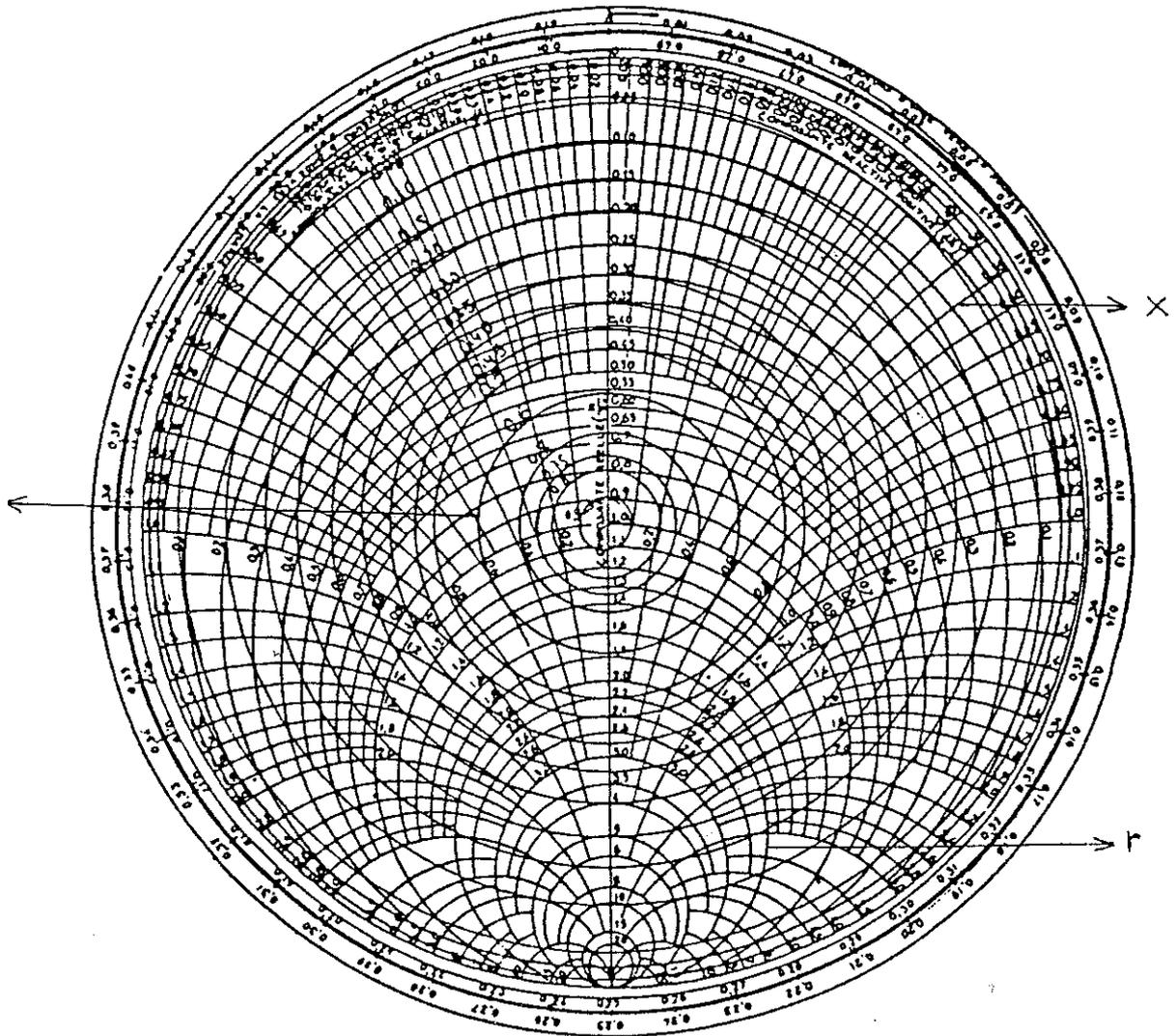
$r$  : résistance normalisée  
 $x$  : réactance normalisée

Le diagramme de SMITH, ou représentation polaire, est défini par trois familles de courbes qui sont:

- 1) les cercles à résistance constante (cercle  $r$ )
- 2) les cercles à réactance constante (cercle  $X$ )
- 3) les cercles à atténuation constante ou cercles à rapports d'onde stationnaire constants (cercle  $u$ )  
et des rayons de phase constants



**FIGURE N° 4-9-2: SCHEMA D'UN DIAGRAMME DE SMITH**



ABAQUE DE SMITH

Il est rappelé que toute ligne de transmission uniforme est caractérisée par quatre paramètres rapportés à l'unité de longueur et qui sont:

la résistance : R	] valeurs réparties
la self : L	
la capacité : C	
la conductance: G	

Il est démontré que l'impédance caractéristique  $Z_0$  est pratiquement indépendante de la fréquence et est une résistance pure de valeur:

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

L'atténuation par unité de longueur est définie à l'aide du coefficient  $\alpha$ , exprimé en général en dB/unité de longueur. La longueur d'onde dans la ligne  $\lambda_g$ , qui peut différer de la longueur d'onde dans l'air  $\lambda_0$ , est utilisée pour l'étude des impédances  $Z$ .

$Z = R + jX$  avec R : résistance  
et X : réactance (composante réactive)

Si  $X > 0$  --> la réactance est inductive (self)  
Si  $X < 0$  --> la réactance est capacitive (capacité)

L'utilisation du diagramme de SMITH nécessite la normalisation préalable des valeurs des résistances, des réactances et des déplacements.

Les résistances et réactances doivent être rapportées à l'impédance caractéristique.

$$r = R / Z_0 \quad \text{et} \quad x = X / Z_0$$

L'impédance normalisée aura pour expression:

$$Z = r + jx$$

Les déplacements doivent s'exprimer en fonction de la longueur d'onde.

$$\phi = L / \lambda_g$$

exprimé en degré:

$$\phi = \frac{L}{\lambda_g/2} \times 360^\circ$$

Le même diagramme peut être utilisé pour le calcul des admittances en remplaçant la résistance par la conductance et la réactance par la susceptance:

$$Y = 1 / Z = G \pm j\beta$$

exprimée en admittance normalisée:

$$Y_0 = 1 / Z_0$$

$$Y_r = \frac{G}{Y_0} \pm \frac{j\beta}{Y_0} = g \pm jb$$

avec  $\beta$  : susceptance  
et  $G$  : conductance

#### 4-9-3- MESURE D'UNE IMPEDANCE

Le diagramme de SMITH donne donc la possibilité de connaître une impédance en un point donné d'une ligne de transmission. En effet, les déplacements:  $L / \lambda g$ , les réactances et les résistances sont définies par des familles de courbes. Tous ces paramètres seront calculés ou déterminés dans une ligne de transmission, par l'emploi d'une ligne de mesure.

Mesure d'une impédance  $Z_u$  placée à l'extrémité d'une ligne sans perte d'impédance caractéristique  $Z_0$ :

- Effectuer le montage de la figure N° 4-9-31

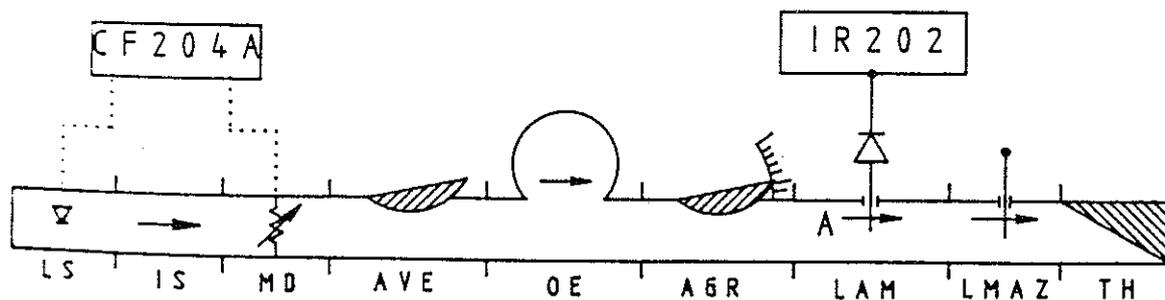


FIGURE N° 4-9-31

- 1 - Placer l'élément dont l'impédance doit être mesurée (en l'occurrence une charge précédée d'un adaptateur de ROS) en extrémité de la ligne.
  - Mesurer le rapport d'onde stationnaire.
  - Tracer le cercle sur le diagramme (valeur du rapport d'onde stationnaire sur l'axe réel du diagramme).
  - Rechercher le minimum de tension le plus proche de la charge, soit le repère A.
- 2 - Remplacer l'élément à mesurer par un court-circuit, (figure N°8), (le plan du court-circuit correspond au point A=180° du diagramme).
  - En déplaçant le chariot, rechercher le minimum le plus proche du repère A, soit B.
  - Déterminer  $L = A - B$
  - Déterminer la  $\lambda_g$  dans le guide
  - En déduire:  $L / \lambda_g$

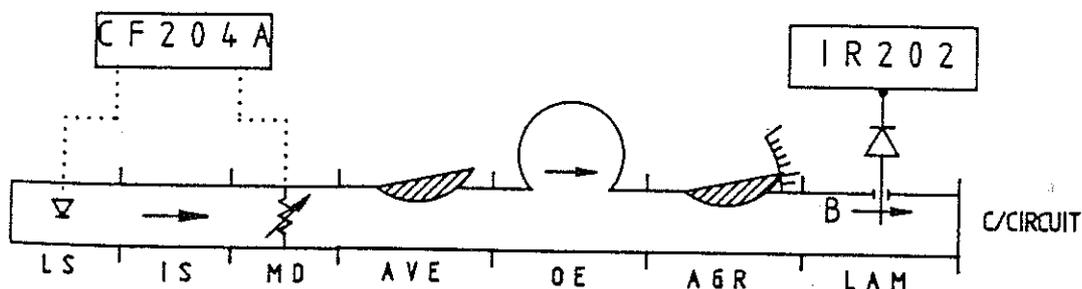


FIGURE N° 4-9-32

**REMARQUE:**

Si le diagramme porte un cercle extérieur exprimé en:

$$L / \lambda g,$$

porter directement la valeur trouvée sur le diagramme.

Sinon  $(L/\lambda g)$  sera exprimé en variation angulaire:

$$\alpha^\circ = \frac{360^\circ \times L}{\lambda g/2}$$

Si le déplacement du minimum B s'est effectué vers le générateur, tourner à partir du point A=180° dans le sens "En arrière" (vers le générateur) de la quantité  $\alpha^\circ$  ou  $(L/\lambda g)$ . Soit le point M' (figure N° 4-9-33)

- Au contraire, si le déplacement s'est effectué vers la charge, tourner sur le diagramme dans le sens "En avant" (vers la charge) de la quantité  $\alpha^\circ$  ou  $(L/\lambda g)$ . Soit le point M.
- Tracer une droite joignant le centre du diagramme à M (ou M').
- Cette droite coupe le cercle du rapport d'onde stationnaire en un point P (ou P').

Par ce point P (ou P'), il passe:

a) un cercle à réactance constante, qui donnera la valeur "-jx" de l'impédance, soit le point Q.

b) un cercle de résistance constante qui donne la valeur réelle "r" de l'impédance, soit le point R.

L'impédance réduite sera:  $S = r + jx$

Le raisonnement est le même dans le cas où  $\alpha^\circ = L/\lambda g$  s'est déplacé dans le sens en "arrière" (vers le générateur).

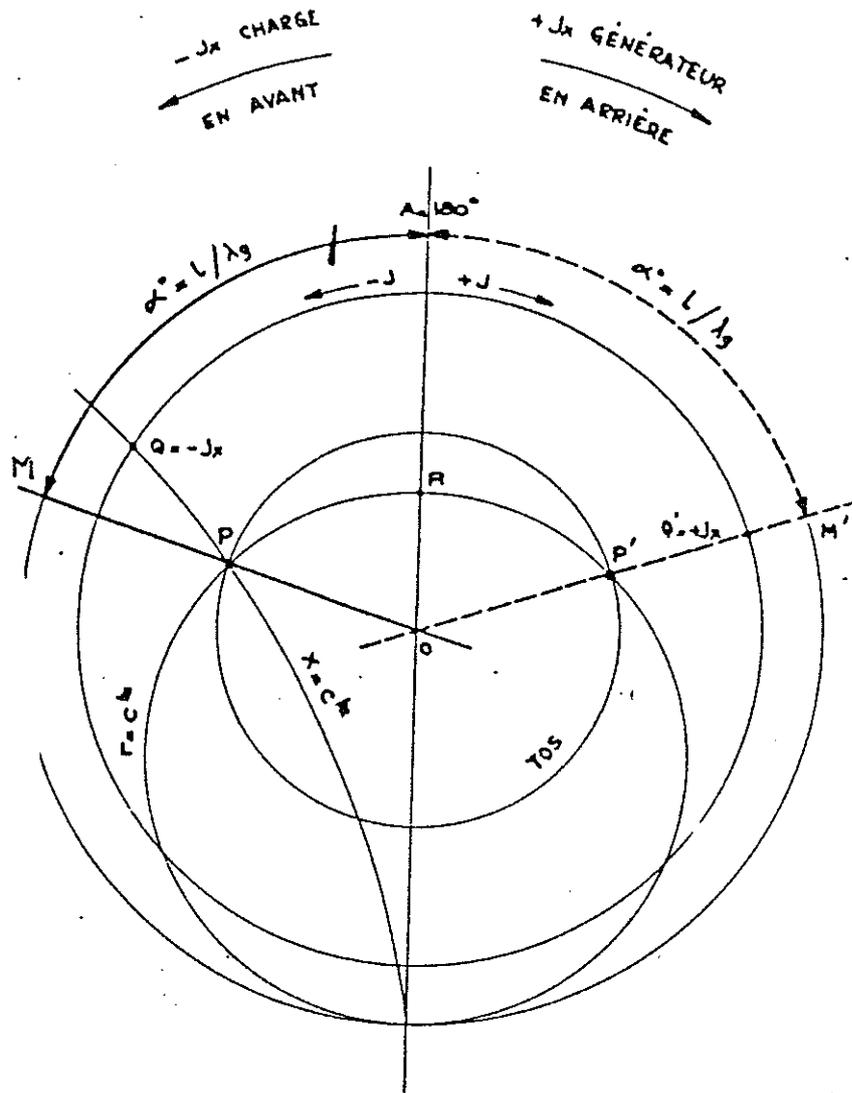


FIGURE N° 4-9-33

L'impédance réduite prend alors l'expression:

$$Z = r + jx$$

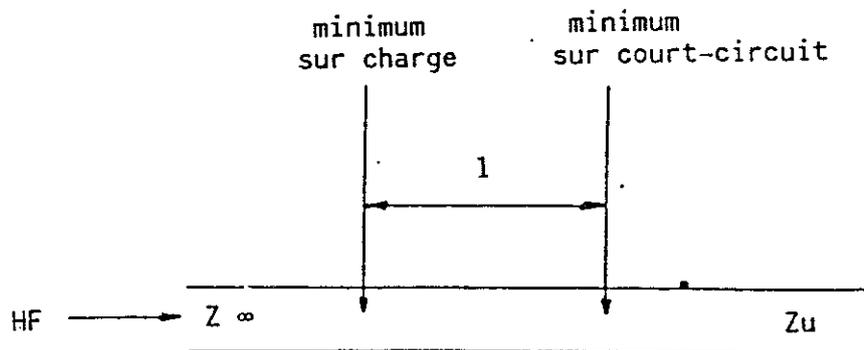
d'où:

$$Z_u = Z_0 (r + jx)$$

### EXEMPLE

Soit une ligne de transmission sur guide, d'impédance caractéristique  $Z_0$ , terminée par une impédance inconnue  $Z_u$ .

- $\lambda_g$  mesuré sur la ligne: 45,45 mm (9300 MHz)
- $L = 1,3$  mm (figure N° 4-9-34)
- ROS = 2,94°



**FIGURE N° 4-9-34**

$$L/\lambda_g = 1,3/45,45 = 0,0286$$

- A partir du point  $A=180^\circ$  sur le diagramme (figure 11), porter dans le sens en "avant", vers la charge, sur le cercle de  $(L/\lambda_g)$ , la quantité:

$$L/\lambda_g = 0,0286, \text{ soit le point M}$$

$$L/\lambda_g = \text{en degré: } \frac{720 \times 1,3}{45,45} = 20^\circ 30'$$

- Tracer le cercle de rapport d'onde stationnaire 2,94.
- Tracer une droite joignant O au point M. Cette droite coupe le cercle de rapport d'onde stationnaire en P. Le cercle de X constant passant par P donne:

$$jx = -j 0,18 = X/Z_0$$

$$r = 0,34 = R/Z_0$$

- L'impédance aura pour expression:

$$Z_u = Z_0 (0,34 - 0,18j)$$

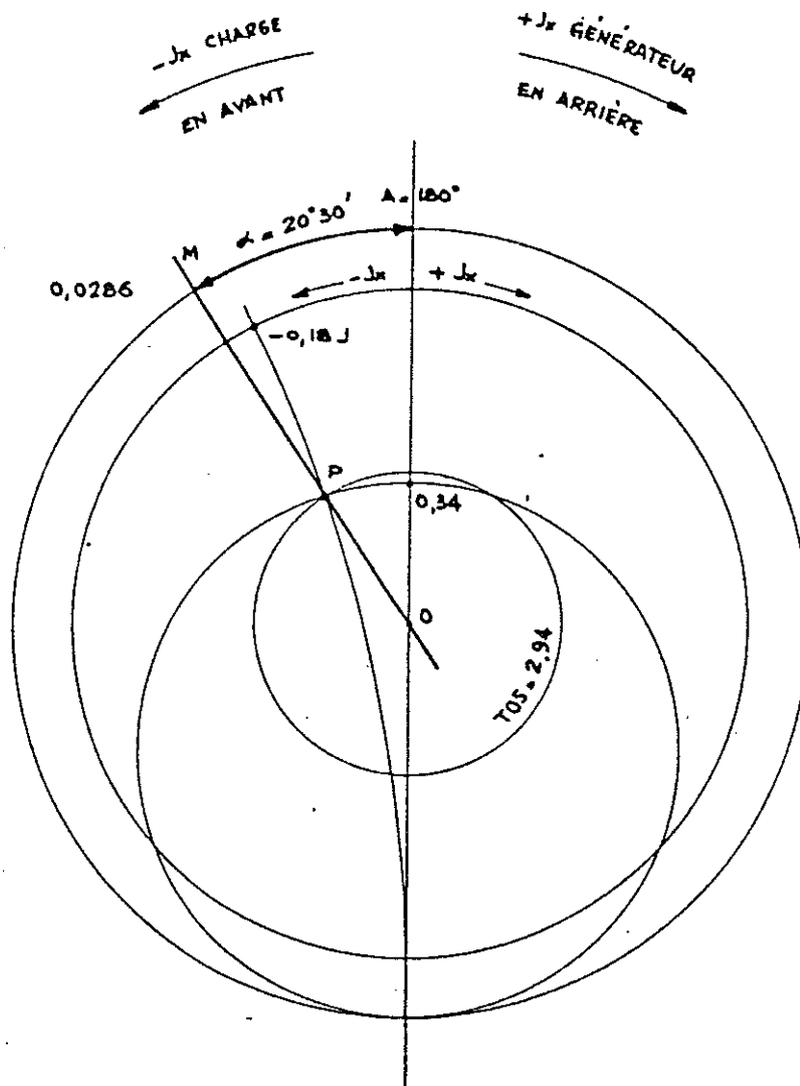


FIGURE N° 4-9-35

**REMARQUE:**

Pour le guide RG-52/U (WR 90)

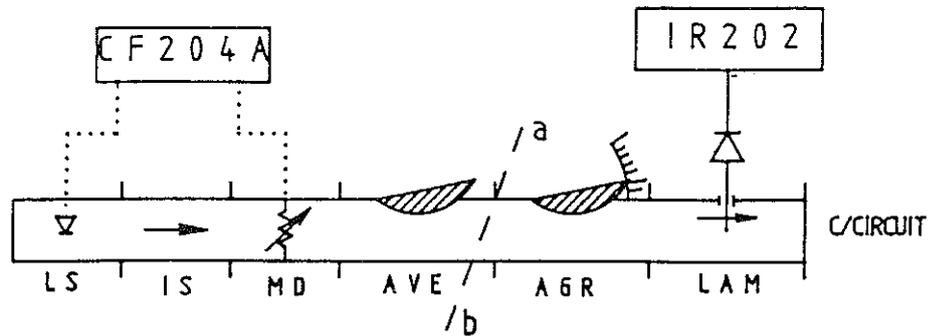
$$Z_0 = \frac{60 b \pi^2}{\sqrt{\epsilon} a} = \frac{1}{1 - \left[ \frac{\lambda_0}{\lambda c} \right]^2}$$

b = 22,86 mm  
 a = 10,16 mm  
 $\sqrt{\epsilon} = 1$  (air)

**4-9-4- MESURE D'ATTENUATIONS FAIBLES - METHODE DE LA LIGNE**

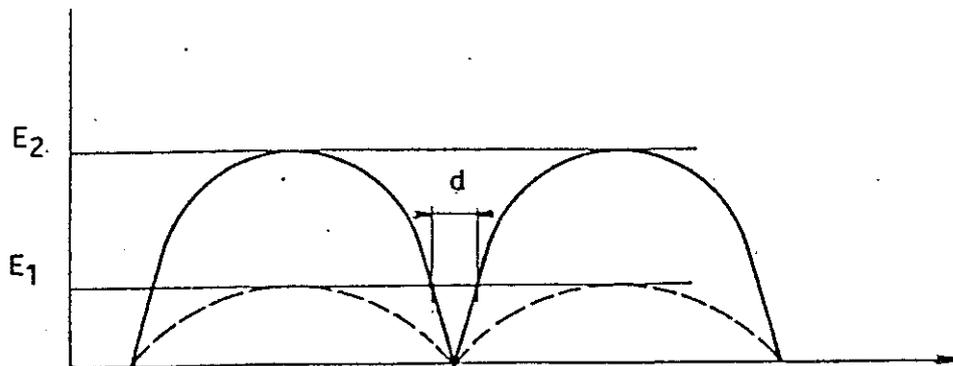
La plupart des méthodes décrites précédemment sont justifiées, mais elles ne sont pas suffisamment précises pour les mesures des faibles atténuations (inférieures à 2 dB). Il est donc indispensable d'utiliser une autre méthode ne nécessitant aucune des suppositions précédentes, et qui soit plutôt définie à partir d'une distribution théorique de tension.

- effectuer le montage indiqué figure N° 4-9-41
- placer la sonde de la ligne sur un maximum.
- atténuer à l'aide de l'AGR 90 jusqu'à obtenir une déviation correcte sur G.
- repérer la déviation sur G, soit E2
- placer en a/b l'élément dont l'atténuation doit être mesurée.
- la déviation de G passe de E2 en E1
- enlever l'élément à mesurer. Le galvanomètre indique à nouveau E2.



**FIGURE N° 4-9-41**

- déplacer la sonde de la ligne de part et d'autre de E2 jusqu'au passage par les deux valeurs de E1 (voir figure N° 4-9-42)
- d est ainsi obtenu.
- mesurer la fréquence à la ligne
- en possession de ces éléments, calculer l'atténuation.



**FIGURE N° 4-9-42**

L'atténuation est par définition:

$$A = 20 \log_{10} E2/E1$$

La tension de distribution étant sinusoidale:

$$E_2 \sin \frac{\pi d}{\lambda g} = E_1$$

où:  $\lambda g$  est la longueur d'onde dans la ligne

d'où:

$$A = 20 \log_{10} \frac{1}{\sin \frac{\pi d}{\lambda g}}$$

La courbe de l'atténuation en fonction de  $\pi d / \lambda g$  donne la représentation graphique de l'équation précédente pour de petites valeurs d'atténuation.

Le principal avantage de cette méthode est qu'il n'est pas nécessaire de connaître la loi de détection du détecteur de la sonde.

#### 4-9-5- UTILISATION D'UN COUPLEUR DIRECTIF POUR LA MESURE DU RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE

Le principe de cette mesure est basé sur le raisonnement suivant:

- Le coupleur prélève en premier lieu une puissance P1 correspondant à une faible partie de l'énergie incidente transmise dans la ligne principale.
- Après inversion du coupleur, celui-ci prélève une puissance P2 correspondant à une faible partie de l'énergie réfléchie dans la ligne principale et provenant de l'impédance de charge. La comparaison de ces deux puissances recueillies, détermine le rapport d'onde stationnaire.

En effet:

Soit  $E_r$  l'amplitude de l'onde réfléchie  
et  $E_i$  l'amplitude de l'onde incidente

$$ROS = \frac{E_i + E_r}{E_i - E_r} = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}$$

$$\text{ROS} = \frac{1 + E_r/E_i}{1 - E_r/E_i}$$

mais:

$$E_r/E_i = \sqrt{P_r/P_i}$$

donc:

$$\text{ROS} = \frac{1 + \sqrt{P_r/P_i}}{1 - \sqrt{P_r/P_i}} = \frac{2}{1 - \sqrt{P_r/P_i}} - 1$$

où  $P_r$  et  $P_i$  sont respectivement les puissances réfléchie et incidente.

Ainsi le rapport d'onde stationnaire est une fonction du rapport  $P_r/P_i$  et ce rapport peut être exprimé en dB.

Un atténuateur calibré, placé dans la ligne principale de transmission pourra être utilisé pour mesurer directement:

$$n \text{ dB} = 10 \log_{10} P_r/P_i$$

Le coupleur étant branché de façon à mesurer l'énergie réfléchie, repérer le niveau A. Puis, le coupleur étant branché de façon à mesurer l'énergie incidente, repérer le niveau B. Atténuer, avec l'atténuateur calibré A (AGR 90), de façon à ramener le niveau B au repère A.

Exprimer en dB la valeur lue sur l'atténuateur calibré AGR et reporter ces dB sur l'abaque donnant le rapport d'onde stationnaire.

La précision de la mesure du rapport d'onde stationnaire, par cette méthode, dépend de la valeur de la directivité. Il est démontré que l'erreur relative a pour expression:

$$e_r = \frac{1}{S} \left[ \frac{\pm 1/D (R + 1)^2}{2 \pm 1/D (1 + R)} \right]$$

S = Rapport d'onde stationnaire réel  
D = directivité

Calculons, à titre d'exemple, la directivité nécessaire d'un coupleur, pour avoir une erreur de 5% sur la lecture d'un rapport d'onde stationnaire de 1,5.

Dans la formule, les rapports d'onde stationnaire sont exprimés en inverse, par conséquent:

$$S = 1/1,5 = 0,66$$

l'erreur  $e_r = 0,033$

d'où

$$0,033 = \frac{1}{0,66} \times \frac{1/D (1,66)^2}{2 - 1/D (1,66)}$$

en développant:

$$0,044 D = 2,75 + 0,036$$

$$D = \frac{2,75 + 0,036}{0,044} = 65$$

$$2 \log_{10} 65 = 20 \times 1,8 = 36 \text{ dB}$$