
TP HYPERFREQUENCES

Bibliographie, notations et valeurs numériques	2
I. Éléments théoriques utiles	3
1. Introduction	3
2. Propagation dans un guide d'ondes rectangulaire	4
3 Rayonnement d'un cornet, zone de rayonnement	7
II. Études des hyperfréquences	9
1. Description du matériel, montage antenne	9
2. Description du matériel, montage guide d'onde	11
3. Étude du guide d'onde, manipulations à effectuer	12
4. Rayonnement d'une antenne, manipulations à effectuer	13

Bibliographie

- [1] P. F. Combes, “Micro-ondes 1. Lignes, guides et cavités. Cours et exercices”, (Paris : Dunod, 1996) 2
- [2] P. F. Combes, “Micro-ondes 2. Circuits passifs, propagation, antennes. Cours et exercices”, (Paris : Dunod, 1997)
- [3] H. Doubre, “Electromagnétisme 4”, (Cours photocopié de Licence et Magistère de Physique, 2002) 2
- [4] R. P. Feynman, R. B. Leighton et M. Sands, “The Feynman Lectures on Physics”, volume 2 (Reading : Addison-Wesley, 1964) 2
- [5] J. D. Jackson, “Electrodynamique classique”, (Paris : Dunod, 2001), traduction française de “Classical electrodynamics, 3rd edition” (New York : John Wiley & Sons, 1999) 2, 1
- [6] A. Ghatak et K. Thyagarajan, “Introduction to Fiber Optics” (Cambridge University Press, 1998)

Notations et valeurs numériques

- Vitesse de la lumière dans le vide
 $c_{\text{vide}} = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$;
 - Vitesse de la lumière dans l'air
 $c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \approx 299\,704\,970 \text{ m s}^{-1}$;
 - Permittivité électrique du vide
 $\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} \approx 8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$;
 - Perméabilité magnétique du vide
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$;
 - Permittivité électrique de l'air $\epsilon \approx \epsilon_0$;
 - Perméabilité magnétique de l'air $\mu \approx \mu_0$;
 - Longueur d'onde dans l'air
- $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$ où ν est la fréquence;
 - Longueur d'onde λ_g , dans le guide donnée par l'équation (I.4);
 - Largeur du guide d'ondes
 $a = (22,86 \pm 0,04) \text{ mm}$;
 - Grande dimension latérale du cornet
 $D = (78 \pm 1) \text{ mm}$;
 - Conductivité du cuivre
 $\sigma = 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$;
 - Induction magnétique dans l'air
 $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0$;

I – Éléments théoriques utiles

1 Introduction

Les ondes électromagnétiques *hyperfréquences*, ou *micro-ondes*, (fréquences ν de 300 MHz à 1 THz) ont un très large domaine d'applications : télécommunications (GSM, satellites), détection à distance (radars), horloge atomique, météorologie, astronomie, accélérateurs de particules (cyclotrons, synchrotrons), plasmas (chauffage), applications industrielles (chauffage, séchage, polymérisation, vulcanisation du caoutchouc, traitement des déchets) et domestiques (fours micro-ondes), ... Ces ondes sont aussi appelées ondes sub-millimétriques, millimétriques, centimétriques et décimétriques (suivant leur *longueur d'onde dans le vide* $\lambda_0 = c/\nu$). Les lettres désignant les bandes étaient à l'origine, pendant la Deuxième Guerre Mondiale, un code secret permettant de nommer les fréquences radar sans les divulguer.

Spectre électromagnétique des hyperfréquences			
Fréquence ν	λ_0	Dénominations	Exemples d'applications
0,3–3 GHz	10–100 cm	UHF (Ultra High Frequency)	radar, TV, GPS, GSM
1–2 GHz 2–4 GHz		bande <i>L</i> bande <i>S</i>	GPS four à micro-ondes (2,45 GHz)
3–30 GHz	1–10 cm	SHF (Super High Frequency)	radar, communications satellites
4–8 GHz 8–12 GHz 12–18 GHz 18–27 GHz		bande <i>C</i> bande <i>X</i> bande <i>K_u</i> bande <i>K</i>	
30–300 GHz	1–10 mm	EHF (Extremely High Frequency)	radar
27–40 GHz 40–60 GHz 60–80 GHz 80–100 GHz		bande <i>K_a</i> bande <i>U</i> bande <i>V</i> bande <i>W</i>	
0,3–1 THz	0,3–1 mm	sub-millimétrique	astronomie, météorologie

Il existe plusieurs sortes d'émetteurs et détecteurs suivant le domaine d'application. Nous utiliserons dans ce TP la diode Gunn qui est un émetteur de faible puissance (quelques dizaines de mW). Il existe plusieurs types de guides d'ondes pour transporter l'énergie (lignes coaxiales, microrubans, guides métalliques creux, ...). Nous utiliserons des guides métalliques rectangulaires creux qui peuvent propager divers modes. Aux fréquences de l'ordre de 10 GHz, ces guides ont des pertes (par absorption du diélectrique et effet Joule dans les conducteurs) beaucoup plus faibles que les lignes coaxiales.

Un exemple d'application des micro-ondes : les horloges atomiques

Depuis la Conférence Générale des Poids et Mesures de 1967, *la seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133*. Dans une horloge atomique à césium, un jet d'atomes de césium, produits

par un four, traverse une cavité dans laquelle règne un champ micro-onde de fréquence ajustable ν , fourni par un oscillateur électronique. Si la fréquence ν est voisine de la fréquence $\nu_0 = \frac{E_b - E_a}{h}$ correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins, des atomes absorbent un photon et passent dans le niveau supérieur b . Un système ajuste la fréquence ν du champ de sorte que le nombre d'atomes ainsi excités soit maximal. La fréquence ν est alors égale à ν_0 . L'oscillateur, après division électronique de fréquence, fournit un top toutes les secondes avec une exactitude relative pouvant atteindre 10^{-14} .

Remarque : Dans la suite on considère les champs \vec{E} et \vec{H} pour décrire le champs électromagnétique. De la même façon que dans un matériau diélectrique on définit le vecteur déplacement électrique \vec{D} , on définit dans un milieu magnétique le vecteur \vec{H} pour tenir compte des propriétés magnétiques du milieu. Ici on ne s'intéressera pas à de tel matériau si bien que $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0$

2 Propagation dans un guide d'ondes rectangulaire

Pour plus de détails, voir Combes [1], Feynman et al [4], chapitre 24, Doubre [3] ou Jackson [5] §§ 8.2-8.4.

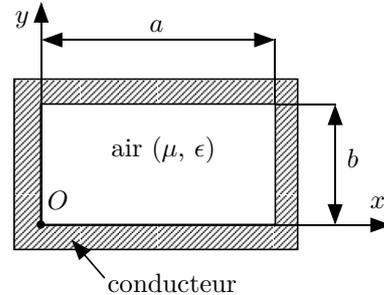
2.a Modes

Le champ électromagnétique \vec{E} , \vec{H} vérifie les équations de Maxwell et des conditions aux limites (sur la surface du conducteur, supposé parfait, \vec{E} est normal aux parois et \vec{H} est tangent aux parois). On appelle *modes* les types d'ondes monochromatiques qui peuvent se propager dans le guide. Les modes possibles sont dénommés

- \mathbf{TE}_{mn} (transversal électrique), où $m, n = 0, 1, 2, \dots$ sont des entiers positifs ou nuls, le cas $m = n = 0$ étant exclu.
- \mathbf{TM}_{mn} (transversal magnétique), où $m, n = 1, 2, 3, \dots$ sont des entiers strictement positifs.

FIGURE I.1 : Section du guide d'ondes.

Le guide d'ondes rectangulaire est une structure de guidage à un conducteur en forme de tube creux de section rectangulaire ($a > b$, $a = (22,86 \pm 0,04)$ mm pour les guides en TP). Les ondes se propagent suivant l'axe Oz perpendiculaire à la figure.



Un onde de fréquence ν peut se propager dans le mode \mathbf{TE}_{mn} ou \mathbf{TM}_{mn} si

$$\nu \geq \nu_c = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}} \quad \text{où} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}, \quad (\text{I.1})$$

avec ν_c fréquence de coupure du mode \mathbf{TE}_{mn} ou \mathbf{TM}_{mn} ;

c vitesse de la lumière dans l'air ;

$\mu \approx \mu_0$ perméabilité magnétique de l'air ;

$\epsilon \approx \epsilon_0$ permittivité électrique de l'air.

On considère une onde de fréquence ν . On note sa longueur d'onde dans l'air $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$. Vérifier graphiquement (voir Fig. I.2) que pour $a = 2b$:

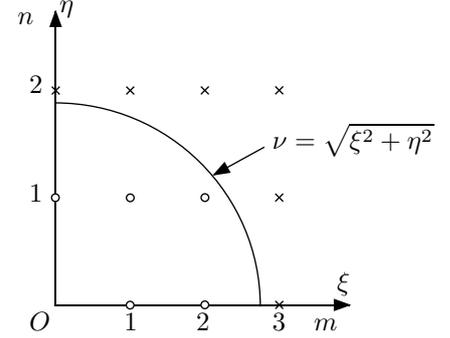
- aucune onde ne se propage dans le guide si

$$\nu < \frac{c}{2a} \quad (\text{ou } \lambda_0 > 2a); \quad (\text{I.2})$$

- seul le mode \mathbf{TE}_{10} (lire *T-E-un-zéro*) se propage dans le guide si $\frac{c}{2a} \leq \nu < \frac{c}{a}$; on est dans ce cas ($\nu \approx 9$ GHz) en TP.

FIGURE I.2 : Détermination graphique des modes se propageant à la fréquence ν .

Le mode \mathbf{TE}_{mn} ou \mathbf{TM}_{mn} est représenté par le point $\left(\frac{c}{2a}m, \frac{c}{2b}n\right)$ du plan (ξ, η) . La fréquence de coupure ν_c d'un mode est la distance de son point représentatif à O . Les points à l'intérieur (\circ) du disque centré en O de rayon ν correspondent aux modes qui se propagent. Les points à l'extérieur (\times), aux modes évanescents (pas de propagation).



Les champs du mode \mathbf{TE}_{10} se propageant vers les z croissant sont les parties réelles de

$$\begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = -i \frac{\omega a \mu}{\pi} H_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{i\omega t - ikz} \\ E_z = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} H_x = i \frac{ka}{\pi} H_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{i\omega t - ikz} \\ H_y = 0 \\ H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{i\omega t - ikz} \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

où

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_g}, \quad \boxed{\frac{1}{\lambda_g} = \frac{1}{\lambda_0} \sqrt{1 - \frac{\lambda_0^2}{4a^2}}} \quad (\text{I.4})$$

et $\omega = 2\pi\nu$; λ_g est la longueur d'onde dans le guide.

Remarques

1. On a utilisé la représentation complexe en $e^{i\omega t}$ (*convention positive*, souvent notée $e^{j\omega t}$) qui est habituelle dans l'étude des circuits électriques. Cette représentation est conjuguée de celle utilisée par Jackson [5] et Doubre [5] (*convention négative* en $e^{-i\omega t}$). On passe d'une convention à l'autre en appliquant la conjugaison complexe ($i \rightarrow -i$). Avec la convention négative, non utilisée ici, la susceptance (partie imaginaire de l'admittance) d'un condensateur serait négative ($-C\omega$).
2. Chaque composante des champs est solution de l'équation d'onde (équation de d'Alembert)

$$\square \psi = 0 \quad \text{où l'opérateur} \quad \square = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta \quad (\text{I.5})$$

est le *d'Alembertien*. Retrouver l'expression de k et de λ_g , équation (I.4), en utilisant cette propriété.

3. Pour $\lambda_0 > 2a$, l'équation (I.4) donne λ_g imaginaire (mode évanescent) : on retrouve la fréquence de coupure (comparer à l'équation (I.2)).

2.b Coefficient de réflexion et impédance

Le rapport $Z_0 = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{\omega\mu}{k}$ des composantes transversales E_y et H_x du champ (I.3) est l'*impédance caractéristique* du guide (unité : ohm).

Changer k en $-k$ dans l'équation (I.3) donne une onde se propageant en sens inverse. L'onde dans le guide est en général la superposition d'une onde incidente et d'une onde réfléchie (on omet le facteur $-i \frac{\omega a \mu}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{i\omega t}$) :

$$\begin{aligned} E_y &= \underbrace{H_0 e^{-ikz}}_{\text{onde incidente}} + \underbrace{H'_0 e^{ikz}}_{\text{onde réfléchie}} = A (e^{-ikz} + \Gamma(0) e^{ikz}) = A (e^{-ikz} + |\Gamma| e^{i(kz+\theta)}) \\ H_x &= -\frac{A}{Z_0} (e^{-ikz} - \Gamma(0) e^{ikz}). \end{aligned} \quad (\text{I.6})$$

Le nombre complexe $\Gamma(0) = |\Gamma|e^{i\theta}$ est le *coefficient de réflexion* en $z = 0$. Plus généralement, le coefficient de réflexion en z est

$$\Gamma(z) = \frac{\text{champ complexe } E_y(x, y, z) \text{ de l'onde réfléchie}}{\text{champ complexe } E_y(x, y, z) \text{ de l'onde incidente}} = \Gamma(0)e^{2ikz}. \quad (\text{I.7})$$

L'impédance en z , pour l'onde (I.6), est le rapport $-\frac{E_y}{H_x}$. On préfère utiliser l'*impédance réduite* $Z(z)$ en z obtenue en la divisant par l'impédance caractéristique Z_0 :

$$Z(z) = -\frac{E_y}{Z_0 H_x} = \frac{1 + \Gamma(z)}{1 - \Gamma(z)}. \quad (\text{I.8})$$

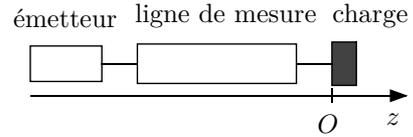
Le coefficient de réflexion en z s'exprime en fonction de l'impédance réduite en z par

$$\Gamma(z) = \frac{Z(z) - 1}{Z(z) + 1}. \quad (\text{I.9})$$

2.c Principe des mesures des coefficients de réflexion

FIGURE I.3 : *Guide d'ondes terminé par une charge.*

L'axe Oz est orienté de l'émetteur vers la charge et la charge est placée en $z = 0$. La ligne de mesure permet de déterminer les caractéristiques des ondes stationnaires dans le guide (position des nœuds et des ventres, taux d'ondes stationnaires). On en déduira le coefficient de réflexion (module et phase) de la charge.



Ondes stationnaires, mesure de λ_g et $|\Gamma|$

L'amplitude du champ électrique E_y , équation (I.6), pour z variable, est maximum aux points où les ondes incidentes et réfléchies sont en phase. Cela a lieu pour $\theta + 2kz \equiv 0 \pmod{2\pi}$ ou

$$\theta \equiv -\frac{4\pi z}{\lambda_g} \pmod{2\pi} \quad \text{soit} \quad z \equiv -\lambda_g \frac{\theta}{4\pi} \pmod{\frac{\lambda_g}{2}} \quad (\text{position des ventres}), \quad (\text{I.10})$$

et l'amplitude vaut alors $A_{\max} = A(1 + |\Gamma|)$.

L'amplitude de E_y est minimum aux points où les ondes incidentes et réfléchies sont en opposition de phase. Cela a lieu pour

$$\theta \equiv \pi - \frac{4\pi z}{\lambda_g} \pmod{2\pi} \quad \text{soit} \quad z \equiv -\lambda_g \frac{\theta}{4\pi} + \frac{\lambda_g}{4} \pmod{\frac{\lambda_g}{2}} \quad (\text{position des nœuds}), \quad (\text{I.11})$$

et l'amplitude vaut alors $A_{\min} = A(1 - |\Gamma|)$. On a supposé que $|\Gamma| \leq 1$, ce qui est le cas lorsque on n'utilise que des charges passives comme en TP.

Un isolateur placé après l'émetteur absorbe l'onde réfléchie. Sans lui, la position des nœuds et des ventres serait de plus fixée par la réflexion sur l'émetteur et l'onde dans le guide ne serait notable que pour certaines fréquences (phénomène de résonance).

- La mesure des positions des nœuds et des ventres donne λ_g , qui bien sûr ne dépend pas de la charge mais seulement de la fréquence d'émission.

- Le *taux d'ondes stationnaires* est le rapport des amplitudes maximum et minimum $\tau = \frac{A_{\max}}{A_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$. En TP, on fait l'hypothèse que le cristal détecteur fonctionne en régime quadratique. On obtient alors $\tau = \sqrt{\frac{V_{\max}}{V_{\min}}}$ en mesurant les tensions aux bornes du cristal en un ventre V_{\max} et en un nœud V_{\min} . On en déduit ensuite

$$|\Gamma| = \frac{\tau - 1}{\tau + 1}. \quad (\text{I.12})$$

Proposer une méthode de mesure de τ qui ne suppose pas que le cristal fonctionne en régime quadratique.

Court-circuit

Lorsque la charge est une plaque de métal, le champ E_y est nul en $z = 0$ (nœud) et $\Gamma(0) = -1$ ($|\Gamma| = 1$, $\theta \equiv \pi \pmod{2\pi}$). L'impédance réduite en $z = 0$ (ou plus généralement en tout nœud) est alors $Z(0) = 0$: la plaque joue le rôle d'un court-circuit. En tout ventre, en $z \equiv \frac{\lambda_g}{4} \pmod{\frac{\lambda_g}{2}}$, le coefficient de réflexion est $\Gamma = \Gamma(0)e^{i2kz} = 1$ et l'*admittance réduite* $\frac{1}{Z(z)} = 0$ (rôle d'un circuit ouvert).

Mesure de la phase θ du coefficient de réflexion

Le vernier de la ligne de mesure donne la position z à une constante K près, $s = z + K$ (ou $s = K - z$ si la graduation croît vers l'émetteur). La mesure des positions des nœuds pour la charge à mesurer et pour le court-circuit permet d'obtenir θ .

Soit s_0 la position sur le vernier d'un nœud lorsque on place le court-circuit en $z = 0$. On a $s_0 = z_0 + K$ (ou $s_0 = K - z_0$) avec $z_0 \equiv 0 \pmod{\frac{\lambda_g}{2}}$.

Soit s la position lue ($s = z + K$ ou $s = K - z$) d'un nœud lorsque on met la charge à mesurer en $z = 0$. Le déplacement du nœud est $d = z - z_0$ (d s'obtient par $d = s - s_0$ ou $d = s_0 - s$ suivant la ligne de mesure, avec $d > 0$ lorsque le nœud s'est déplacé vers la charge). Comme $d = z - z_0 \equiv z \pmod{\frac{\lambda_g}{2}}$, l'équation (I.11) donne

$$\theta \equiv \pi - \frac{4\pi d}{\lambda_g} \pmod{2\pi}. \quad (\text{I.13})$$

3 Rayonnement d'un cornet, zone de rayonnement

L'onde rayonnée par le cornet peut être considérée comme le rayonnement d'une distribution de sources ponctuelles réparties sur son embouchure (principe d'Huygens-Fresnel). Quand la distance R du point d'observation M au centre O de l'ouverture est suffisamment grande (*zone de rayonnement* ou *zone de Fraunhofer*), l'onde est sphérique de centre O et on peut définir la puissance rayonnée $\frac{dP(\vec{n})}{d\Omega}$ par unité d'angle solide dans la direction \vec{n} . Si on place en M un récepteur de surface dS infinitésimale perpendiculairement à \vec{n} , la puissance reçue par le récepteur est

$$P = \frac{dP(\vec{n})}{d\Omega} \frac{dS}{R^2}. \quad (\text{I.14})$$

La puissance P reçue varie en R^{-2} avec R pour une direction \vec{n} donnée.

On admet communément, pour un cornet de grande dimension latérale D , que la zone de rayonnement correspond aux conditions

- $R \gg \lambda_0$ (on utilisera $R \gtrsim 10\lambda_0$) : dans les champs \vec{E} et \vec{H} , les termes variant en R^{-2} (comme dans la loi de Coulomb) sont négligeables devant les termes variant en R^{-1} ;
- $R \gg D$ (on utilisera $R \gtrsim 5D$) : la source peut alors être considérée comme ponctuelle;
- $R \gtrsim R_f$ où $R_f = \frac{2D^2}{\lambda_0}$ est la distance de Fraunhofer : on peut alors considérer que le déphasage entre les ondes qui suivent les chemins OM et $S'M$ ne dépend plus de R (voir Figure I.4).

L'onde ne peut pas être considérée comme sphérique et la loi (I.14) n'est pas vérifiée dans la zone proche du cornet où ces conditions ne sont pas remplies.

FIGURE I.4 : Zone de rayonnement.

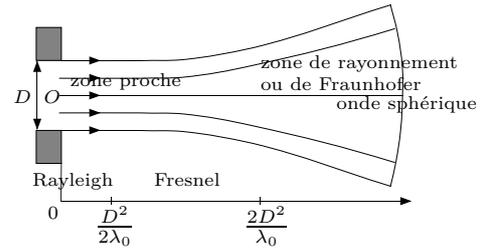
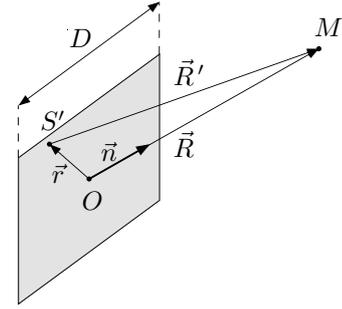
Un développement limité de $R' = ((\vec{R} - \vec{r})^2)^{1/2}$ donne ($\vec{r} = \overrightarrow{OS'}$)

$$R' - R = \underbrace{-\vec{r} \cdot \vec{n}}_{\text{indépendant de } R} + \frac{r^2 - (\vec{r} \cdot \vec{n})^2}{2R} + O\left(\frac{r^3}{R^2}\right).$$

Le deuxième terme ($r \lesssim D/2$) est de l'ordre de $\frac{D^2}{8R}$. On considère qu'il introduit une différence de phase négligeable s'il est inférieur à $\lambda_0/16$, soit $R \gtrsim R_f = \frac{2D^2}{\lambda_0}$.

Dans le cas de l'émission ou diffraction d'une onde par une ouverture équiphase (c'est approximativement le cas du cornet), on peut subdiviser la zone proche en

- zone de Rayleigh $R \lesssim R_r$ où $R_r = \frac{D^2}{2\lambda_0}$ est la distance de Rayleigh; l'onde y est sensiblement une onde plane;
- et en zone de Fresnel $R_r \lesssim R \lesssim R_f$ où se produit la transition entre onde plane et onde sphérique.

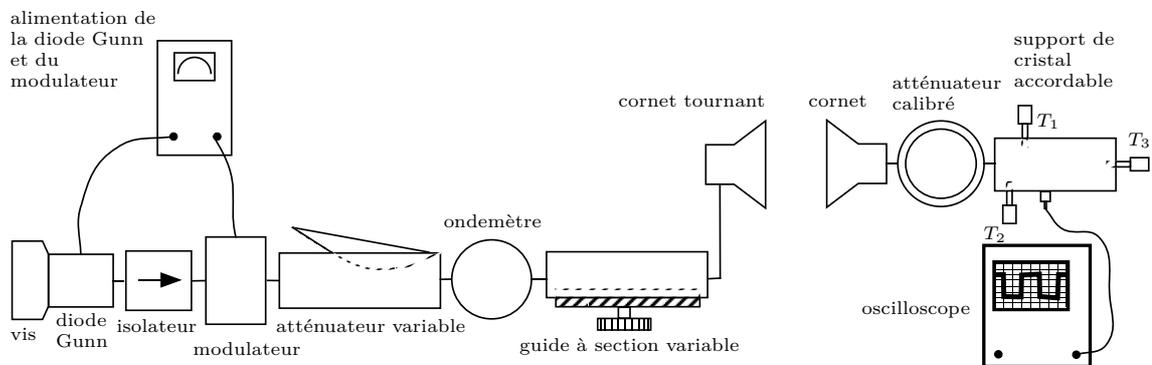


II – Études des hyperfréquences

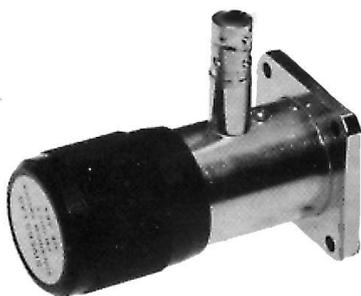
Lors de cette séance, vous utiliserez deux montages différents. Le premier vous permettra de travailler sur une antenne (cornet); le second sur un guide d'onde. L'ordre des montages sur lesquels vous travaillez n'est pas important.

1 Description du matériel, montage antenne

FIGURE II.1 : Le montage (a)



La diode Gunn



Lorsqu'on applique un champ électrique continu de plus de 3,2 kV/cm à un cristal semi-conducteur d'Arséniure de Gallium (GaAs) un effet de résistance négative apparaît. Les diodes Gunn sont des oscillateurs hyperfréquence qui utilisent cet effet. On trouve des diodes fonctionnant à des fréquences entre 5 à 100 GHz et à des puissances de quelques dizaines de mW en continu ou quelques kW en pulsé. Les diodes utilisées en TP peuvent osciller de 8,5 à 11 GHz avec une puissance 10 mW. La diode Gunn est placée dans une cavité accordée par une vis qui permet de modifier la fréquence des oscillations.

L'isolateur

L'isolateur empêche le retour d'une onde réfléchie.



Le modulateur

Le modulateur à basse fréquence (1 kHz) hache le signal pour permettre la détection électronique.



L'alimentation de la diode Gunn et du modulateur

L'alimentation regroupe la source basse tension de la diode Gunn (on utilise environ 9 V) et le générateur BF du signal à 1 kHz appliqué au modulateur.

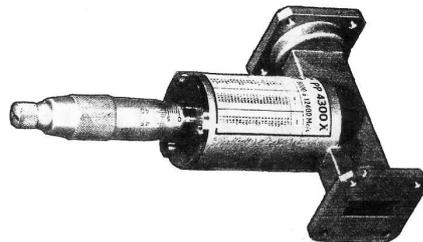


L'atténuateur variable

L'atténuateur variable permet d'atténuer la puissance circulant dans le guide d'onde. Cette atténuateur est calibré, et l'atténuation peut être lue en db sur le cadran. Cet atténuateur permet de faire des mesures à niveau constant.

L'ondemètre

L'ondemètre utilisé est une cavité résonante de forme cylindrique couplée à une section de guide d'onde rectangulaire par un iris. Il fonctionne sur le mode TE_{111} . L'ondemètre est accordable au moyen d'un système mécanique et permet de mesurer la fréquence d'oscillation.



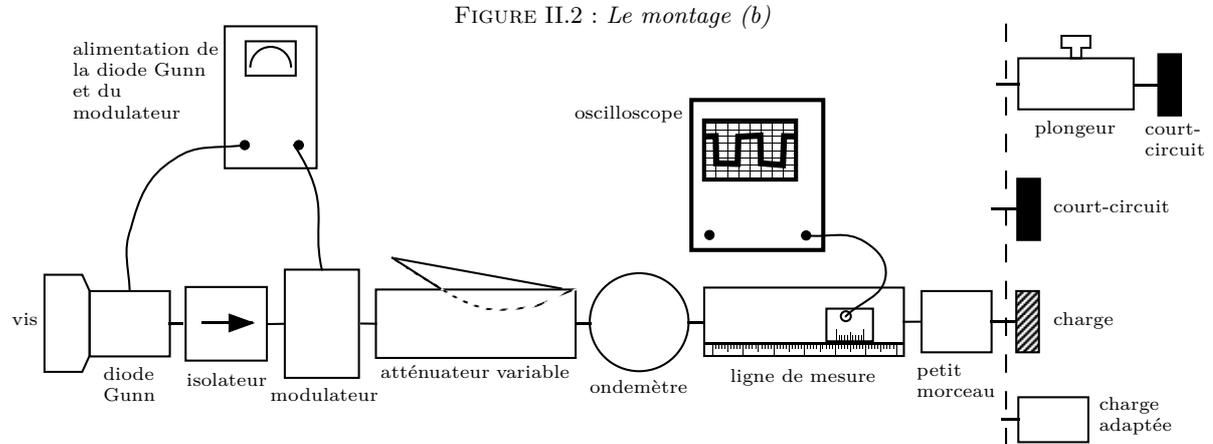
Les cornets

Le **cornet tournant** émet des ondes électromagnétiques dans l'air qui sont recueillies par le **cornet récepteur**

L'oscilloscope

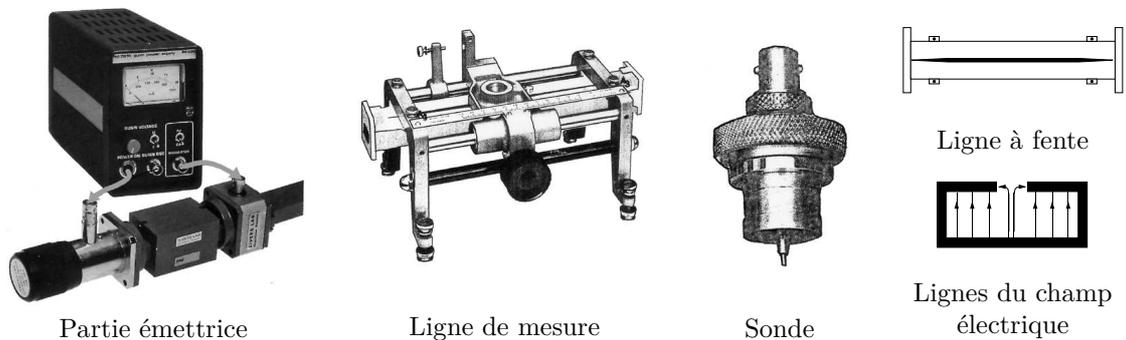
L'oscilloscope mesure le signal délivré par le cristal détecteur.

2 Description du matériel, montage guide d'onde



La partie émettrice, l'atténuateur variable et l'ondemètre

Dans le montage (b), la partie émettrice (la diode Gunn, l'isolateur, le modulateur et l'alimentation de la diode Gunn et du modulateur), l'atténuateur variable et l'ondemètre sont identiques au montage (a).



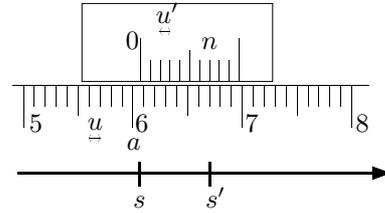
La ligne de mesure

La ligne de mesure est un système détecteur d'ondes stationnaires. Le problème consiste à connaître une grandeur proportionnelle au champ électrique régnant dans le guide. Pratiquement, dans le cas du guide d'onde, on réalise dans la paroi extérieure de la ligne une fente étroite et par cette fente est introduite une très fine et courte antenne. Cette dernière, appelée sonde recueille une très faible partie de l'énergie, proportionnelle en grandeur au carré du champ électrique qui règne à l'endroit où elle se trouve.

La fente doit être longitudinale et ne doit pas couper les lignes de courant pour ne pas trop perturber l'onde ; cela impose, pour le guide propageant le mode TE_{10} , que la fente soit rigoureusement dans l'axe du grand côté (Fig. Ligne à fente). En toute rigueur, il y a des lignes de courant coupées et génération de modes spéciaux (Fig. Lignes du champ électrique).

Le cristal détecteur, relié à l'antenne, est constitué d'un petit morceau de semi-conducteur (silicium mais aussi germanium) sur lequel est posé un fil fin de tungstène appelé moustache de chat. La tension aux bornes du cristal détecteur est, dans notre cas, proportionnelle à la puissance moyenne et donc au carré de l'amplitude du champ électrique \vec{E} . La lecture de la tension délivrée se fait sur un oscilloscope.

Vernier (mesure de la position de la sonde). Un chariot porte la sonde et une règle mobile divisée en 10 intervalles de longueur $u' = 0,9$ mm. La longueur des intervalles de la règle fixe est $u = 1$ mm. Pour mesurer l'abscisse s du point 0 du chariot, on cherche le trait n de la règle mobile aligné avec un trait de la règle fixe ($n = 7$ sur la figure). L'abscisse de ce trait est $s' = a + nu = s + nu'$ où a est l'abscisse du trait de la règle fixe juste à gauche de s . On en déduit $s = a + n(u - u') = a + n \times 0,1$ mm ($s = 60,7$ mm pour la figure).



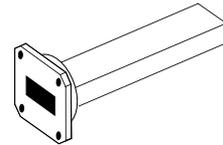
Le petit morceau et les charges

Le petit morceau sera laissé ouvert ou fermé par une **charge** (une plaque métallique, une plaque en plexiglas ou en bakélite, un fil de soudure et une charge adaptée).

La charge adaptée

Cette charge porte aussi les noms d'*itérative* ou *caractéristique*. Par définition, elle ne produit pas d'onde réfléchie. On a alors $\Gamma = 0$ et l'impédance réduite vaut 1. On dit qu'il y a *adaptation d'impédance*.

Observer l'intérieur : une lame dont le profil ressemble à celui de l'atténuateur variable y est montée. Cette pièce est taillée en forme de coin et absorbe progressivement l'énergie incidente. Le matériau qui la constitue peut être n'importe quel mauvais isolant : bois, mélange de poudre de fer avec un liant tel que la paraffine ou l'araldite.



3 Étude du guide d'onde, manipulations à effectuer

3.a Avertissements

Les puissances délivrées par la diode Gunn ne sont pas très élevées (de l'ordre de 50 mW). Néanmoins le fabricant du matériel déconseille fortement de mettre son œil directement à la sortie du guide d'onde quand il délivre sa puissance maximum. Suivez ce conseil.

3.b Étude qualitative

Installez en fin de guide la plaque métallique. Regardez le signal sur l'antenne à l'aide de l'oscilloscope, et interprétez qualitativement le signal (notamment sa fréquence). Discutez le comportement de votre signal lorsque l'antenne est déplacée le long du guide.

3.c Mesure de la vitesse de l'onde dans le guide

Déterminer la fréquence et la longueur d'onde du signal dans le guide d'onde. À partir de ces valeurs, calculez la vitesse de l'onde dans le guide.

Recommencez ces mesures à différentes fréquences, et déterminez si la loi de dispersion du guide d'onde est linéaire.

3.d Mesure de coefficients de réflexion Γ

On veut désormais étudier comment l'énergie peut quitter le guide d'onde pour se propager dans l'air.

Mesure avec l'extrémité du guide d'onde ouverte

Enlevez la plaque métallique, et déplacez l'antenne le long du guide d'onde. Que pouvez-vous en conclure ?

Mesure à niveau constant

Mettez votre antenne sur un ventre, et notez la tension mesurée par l'oscilloscope. Atténuez votre signal de 3 dB, et notez de nouveau la tension.

rappel : les décibels sont définis par $10 \log(P_2/P_1)$.

Déplacez vous sur un nœud, et notez la tension lue sur l'oscilloscope et sur l'atténuateur. Déplacez vous ensuite sur un ventre, et régler l'atténuateur de façon à retrouver la même tension lue sur l'oscilloscope. Expliquez en quoi cette mesure vous permet de calculer le coefficient de réflexion.

Mesures

Étudiez les charges suivantes :

1. **Extrémité libre** (absence d'obstacle).
2. **Plaque en bakélite** ou en plexiglas.
3. **Charge adaptée.**
4. **Cornet.**
5. **Extrémité partiellement obturée.** Placer la plaque portant le fil à l'extrémité de la ligne, en testant la configuration fil horizontal, fil vertical.

Déterminer les coefficients de réflexion pour ces différentes charges.

- Quelle est la différence entre la charge adaptée et le cornet ?
- Quelle est la différence entre le cornet et l'extrémité libre ?
- Quelle est la différence entre la configuration fil vertical, fil horizontal ?
- Les minimums sont-ils toujours à la même position ? Expliquer pourquoi.

Donner une conclusion générale pour l'ensemble des charges étudiées. Pour la charge adaptée, Γ est-il réellement nul ?

3.e Allure du champ électrique

Tracez l'allure du champ électrique dans le guide d'onde.

4 Rayonnement d'une antenne, manipulations à effectuer

Quelle extrémité doit-on fixer à la sortie du guide d'onde pour pouvoir étudier la façon dont l'énergie se propage dans l'air ?

4.a rôle de la distance émetteur-récepteur

Le but est de déterminer expérimentalement la dépendance de l'énergie reçue par une antenne à la distance émetteur-récepteur. Pour cela utilisez la méthode du niveau constant en mesurant la puissance reçue par une antenne cornet placée à distance du guide d'onde. Faites varier la distance jusqu'à environ deux mètres. Déterminez la loi qui est suivie par votre système, en sachant que les mesures à trop courtes distances suivront des lois différentes. Discutez vos résultats.

4.b Étude des cornets : diagramme de rayonnement

La source ne rayonne pas de façon isotrope, la présence du cornet a pour effet de concentrer l'énergie principalement vers l'avant. De la même façon, une antenne ne capte pas de la même façon une onde électromagnétique incidente selon la direction sous laquelle l'antenne est éclairée. On peut montrer qu'une antenne a la même directionnalité en réception et en émission.

En utilisant la méthode des niveaux constants, déterminez la dépendance angulaire de l'antenne de réception (vous veillerez à ne pas la placer ni trop près, ni trop loin de l'antenne émettrice). Représentez vos résultats sur un diagramme en coordonnées polaires. La courbe obtenue s'appelle une *indicatrice de rayonnement*.

Déterminez la largeur angulaire du lobe (en prenant pour critère les angles où la puissance est diminuée de moitié), et concluez sur la directivité de votre antenne.

4.c Étude d'une antenne inconnue

Étudiez de la même façon l'antenne plate qui est disponible sur le montage. Expliquez l'allure du diagramme de rayonnement.