

## O4 INTERFERENCE ET DIFFRACTION DES MICRO-ONDES

### I.- INTRODUCTION

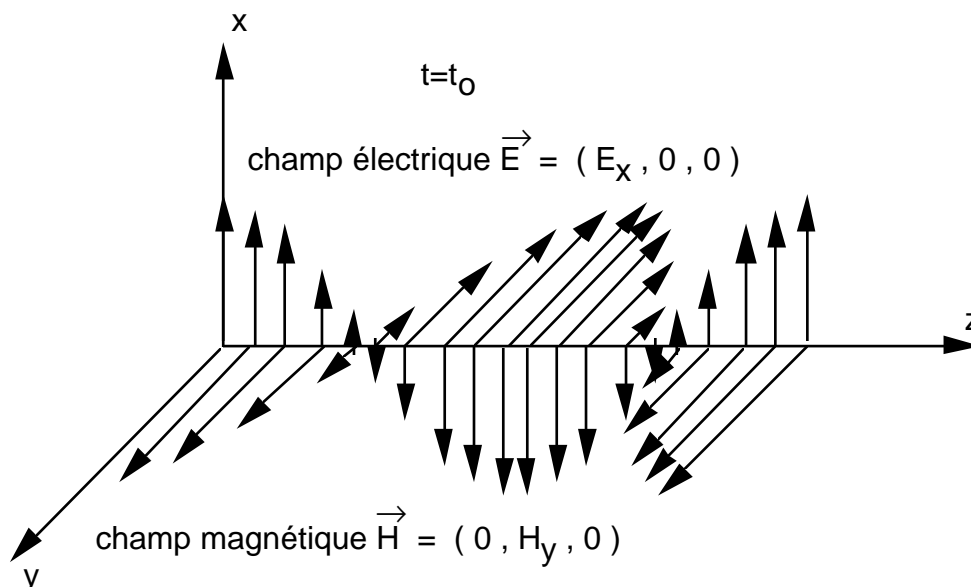
Le dispositif de cette expérience permet de réaliser des expériences d'optique en travaillant avec des micro-ondes dont la longueur d'onde est de 2.85 cm. Ainsi les phénomènes liés à l'aspect ondulatoire des ondes peuvent être mis en évidence avec des systèmes dont les dimensions caractéristiques sont de l'ordre de quelques centimètres. Cette expérience permet de mieux visualiser les phénomènes d'interférences et de diffraction et notamment l'utilisation de la diffraction pour étudier la structure cristalline d'un solide.

Les ondes centimétriques, ou micro-ondes, sont des ondes électromagnétiques dans le domaine des hyperfréquences qui s'étend de 1 GHz à plus de 100 GHz. Ces ondes suivent les lois de l'optique comme les ondes ElectroMagnétiques (EM) visibles, mais à cause de leur longueur d'onde de l'ordre du centimètre, les effets de diffraction et d'interférence apparaissent à ces dimensions .

### II.- THEORIE

#### Ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires l'un à l'autre qui oscillent dans le temps et l'espace. Ces deux champs oscillent dans le temps dans un plan perpendiculaires à la direction de propagation.



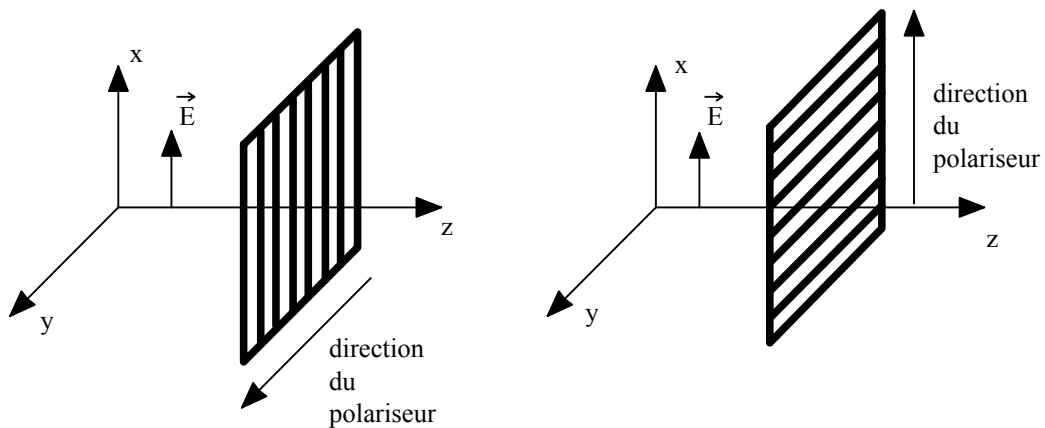
**Figure 1**

La figure 1 montre une onde électromagnétique se propageant suivant la direction z et dont on aurait "photographié" l'amplitude du champ électrique et magnétique dans l'espace.

### Polarisation d'une onde

Si le champ électrique pointe toujours dans la même direction on dit que l'onde est *polarisée linéairement*. La diode Gunn de l'émetteur des micro-ondes génère de telles ondes polarisées linéairement suivant l'axe vertical de l'émetteur.

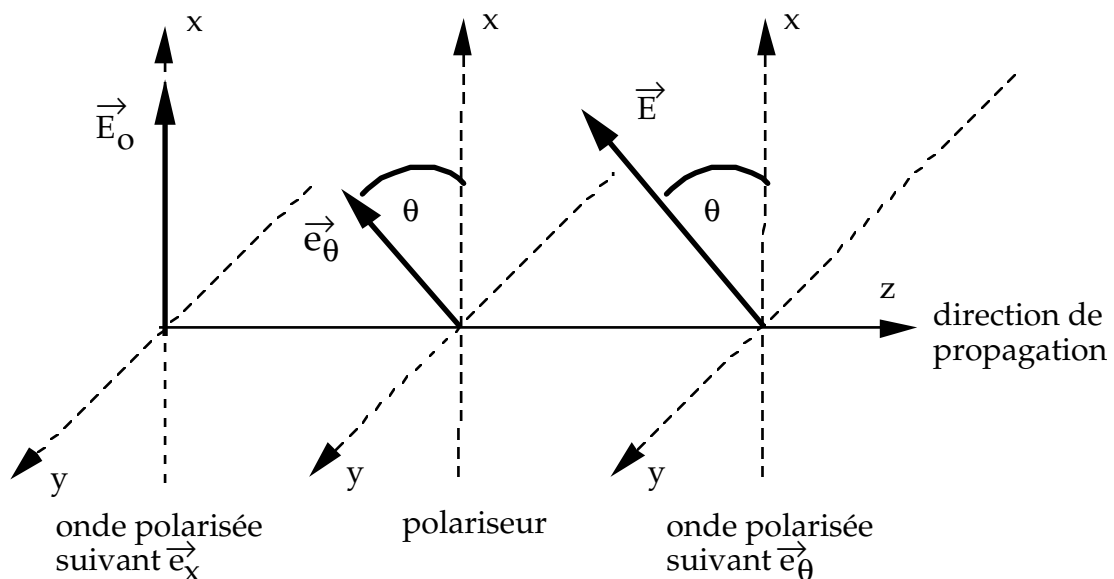
On utilise un polariseur pour changer la direction de la polarisation de l'onde en utilisant un polariseur. Pour les micro-ondes, un polariseur peut être constitué par une série de tiges métalliques qui arrêtera l'onde si les tiges sont parallèles au champ électrique de l'onde et laissera passer l'onde si elles sont perpendiculaires. **Attention la direction du polariseur n'est pas celle de la direction des tiges.**



**Figure 2**

Si l'axe du polariseur fait un angle  $\theta$  avec le champ électrique (figure 3), l'onde émergente du polariseur est polarisée suivant la direction  $\vec{e}_\theta$  du polariseur et l'amplitude du champ électrique  $\vec{E}$  est alors :

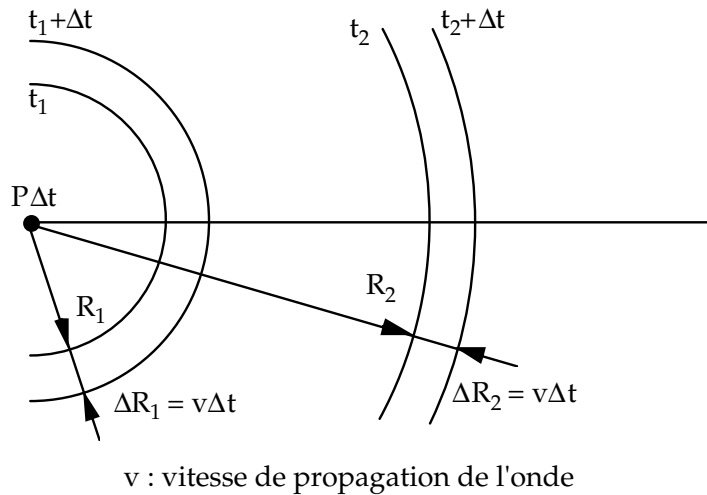
$$|\vec{E}| = |\vec{E}_0| \cos\theta$$



**Figure 3**

### Energie transportée par une onde sphérique

La diode gun peut être considérée comme une source ponctuelle qui émet des ondes sphériques avec une puissance constante  $P$  (figure 4). L'énergie émise pendant un temps  $\Delta t$  est la même indépendamment du temps. Comme la densité volumique d'énergie est proportionnelle au carré du champ électrique, on peut écrire :



**Figure 4**

$$P \cdot \Delta t \div E_1^2 \cdot 4\pi R_1^2 \cdot \Delta R_1 = E_2^2 \cdot 4\pi R_2^2 \cdot \Delta R_2 = \text{constante}$$

comme  $\Delta R_1 = \Delta R_2 = v\Delta t$ , on obtient que le produit  $E^2 R^2$  est constant et donc

$$|\vec{E}|^2 \div \frac{1}{R^2}$$

Comme l'intensité de l'onde reçue par le récepteur est proportionnelle à  $|\vec{E}|^2$ , on s'attend donc à ce que cette intensité diminue comme l'inverse du carré de la distance séparant le récepteur de l'émetteur.

### Puissance transmise au travers d'un polariseur :

A la sortie du polariseur (voir figure 3), l'amplitude du champ électrique est diminuée. L'intensité détectée par le récepteur  $I_r$  sera donnée par la loi de Malus :

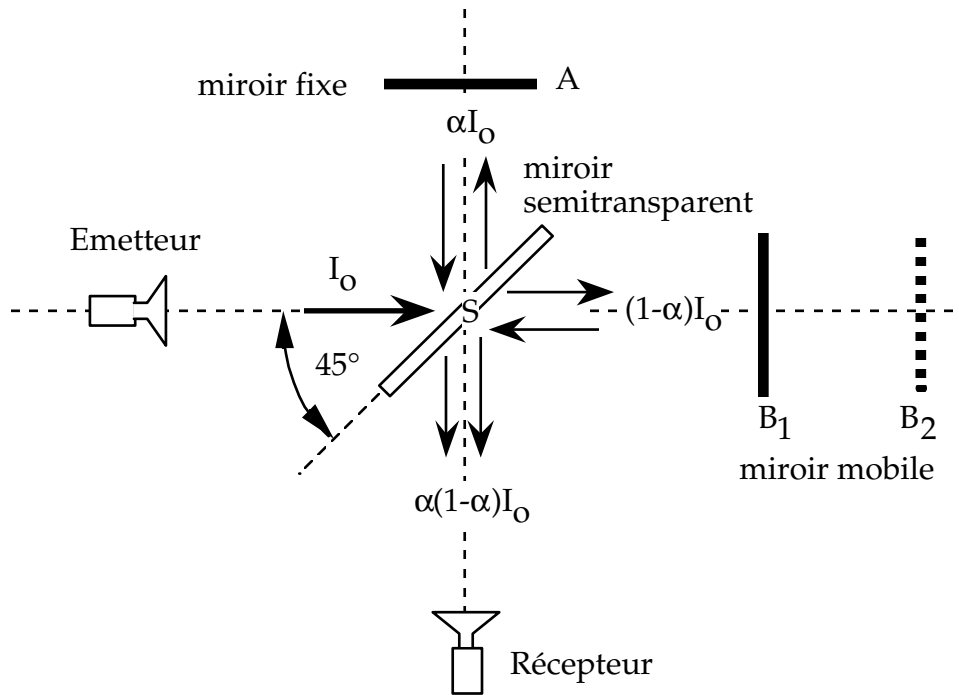
$$I_r \div |\vec{E}|^2 \div |\vec{E}_o|^2 \cos^2(\theta) \div \cos^2(\theta)$$

L'intensité de l'onde reçue par le récepteur sera proportionnelle au carré du cosinus de l'angle entre le polariseur et la direction de polarisation de l'onde incidente.

### Diffraction à une dimension : Interféromètre de Michelson

Pour que des ondes de fréquence identique puissent interférer, il faut que le déphasage entre ces ondes soit constant, c'est-à-dire qu'elles soient cohérentes. Dans l'interféromètre de

Michelson (figure 5), un miroir S semi-transparent partage le faisceau incident en une partie  $\alpha$  réfléchi et une partie  $(1-\alpha)$  transmise. Ces deux faisceaux sont réfléchis par le miroir fixe A et le miroir mobile B. Au passage du miroir semi-transparent la fraction  $\alpha$  du faisceau venant de B est réfléchi et la fraction  $(1-\alpha)$  du faisceau venant de A est transmise. Ainsi, on constate que l'intensité des deux faisceaux se propageant en direction du récepteur est égale et vaut  $\alpha(1-\alpha)I_0$ , où  $I_0$  est l'intensité du faisceau incident.



**Figure 5**

On a des ondes cohérentes, puisque émises par la même source, dont le déphasage provenant de la différence de chemin parcouru est :

$$(1) \quad \Delta = 2(\overline{SA} - \overline{SB})$$

Il y aura interférence constructive (intensité maximum dans le récepteur) si :

$$(2) \quad \Delta = n \lambda \quad n : \text{entier}$$

Si on déplace le miroir B entre deux positions  $B_1$  et  $B_2$  donnant un maximum d'intensité, on a :

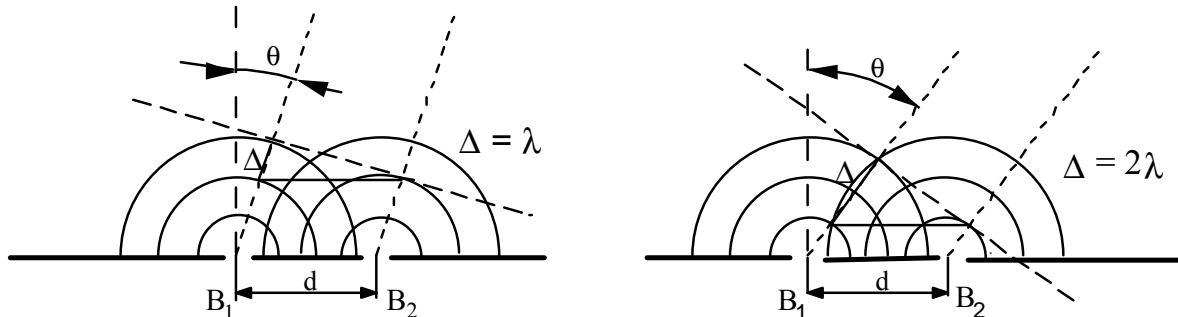
$$(3) \quad \begin{aligned} \Delta_1 &= n_1 \lambda = 2(\overline{SA} - \overline{SB_1}) & n_1 : \text{entier} \\ \Delta_2 &= n_2 \lambda = 2(\overline{SA} - \overline{SB_2}) & n_2 : \text{entier} \end{aligned}$$

donc  $\Delta_1 - \Delta_2 = (n_1 - n_2)\lambda = 2(\overline{SB_2} - \overline{SB_1})$  ce qui permet d'exprimer la longueur d'onde :

$$(4) \quad \lambda = \frac{2(\overline{SB_2} - \overline{SB_1})}{n_1 - n_2}$$

### Diffraction à deux dimensions : Diffraction par deux fentes

On considère les deux fentes comme étant ponctuelles : cette situation est réalisée lorsque l'ouverture des fentes est inférieure à la longueur d'onde.



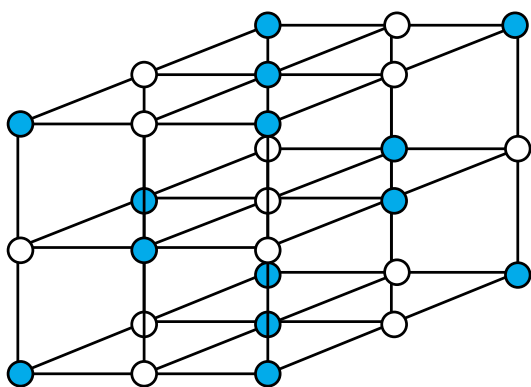
**Figures 6.** Interférences constructives produites par deux fentes séparées d'une distance d

Sur la figure 6, nous observons que les fronts d'onde émis par chacune des fentes séparées d'une distance d peuvent interférer de manière constructive, dans des directions particulières de l'espace, si la différence de chemin satisfait la relation  $\Delta = n \lambda$ . Ainsi, l'angle pour lequel nous observerons un maximum d'intensité sera donné par :

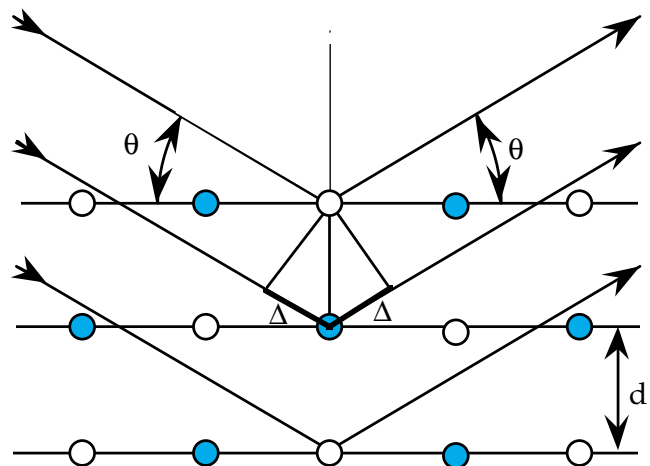
$$(5) \quad \sin \theta = \frac{n\lambda}{d} \quad \text{avec } n = 1, 2, \dots$$

### Diffraction de Bragg

Un solide cristallin, consistant en un arrangement régulier d'atomes, forme un réseau naturel à 3 dimensions (Fig. 7a).



**Figure 7a**



**Figure 7b**

Les ondes sont réfléchies par les atomes de chaque plan du cristal, et les ondes réfléchies par différents plans interfèrent (fig. 7b). La différence de chemin entre les ondes réfléchies par deux plans voisins est  $2\Delta$  où  $\Delta$  est donné par :

$$(6) \quad \Delta = d \sin \theta$$

L'interférence est constructive si la différence totale de chemin  $2\Delta$  satisfait :

$$(7) \quad 2\Delta = 2 d \sin \theta = n \lambda \quad n \text{ entier.}$$

Donc, pour un  $\lambda$  donné et en mesurant  $\theta$ , on peut connaître les distances "d" entre les plans du cristal. Les distances entre les atomes d'un cristal sont de l'ordre de 0.1 nm ( $10^{-10}$  m). Ce sont les rayons X ou les neutrons qui sont appropriés à ces mesures. Dans cette expérience, on visualise ce phénomène à l'aide de micro-ondes diffractées par un modèle de cristal constitué de boules en métal représentant les atomes. La distance entre celles-ci est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des micro-ondes (quelques cm).

### III.- EXPERIENCES

La source de micro-ondes utilisée est une diode Gunn qui est connectée à une alimentation continue. Le récepteur est doté d'un cadran permettant de lire l'intensité reçue. Pour améliorer la précision des mesures on connecte un voltmètre à la sortie du récepteur.

### IV.- MANIPULATIONS

#### Vérifier que l'intensité varie comme $R^{-2}$

- Mettre le récepteur en face de l'émetteur à une distance de l'ordre de 0.5 m (positionner le récepteur afin que l'intensité soit maximale sur l'échelle choisie)
- Mesurer l'intensité I en fonction de la distance entre 0.5 et 1.2 m. Cette mesure est délicate car il y a un phénomène d'interférence qui se traduit par une oscillation de l'amplitude avec la distance. Pour minimiser l'effet de ces interférences, effectuer la mesure pour des positions correspondant aux maxima de l'intensité.
- Porter sur un graphique I en fonction de  $R^{-2}$ .

#### Vérifier que l'intensité de l'onde transmise par un polariseur varie comme $\cos^2(\theta)$ .

- Placer le récepteur en face de l'émetteur à une distance de l'ordre 0.5 m (intensité maximale sur l'échelle de travail). Positionner la grille faisant office de polariseur avec les barres parallèles à la table.
- Mesurer l'intensité I de l'onde transmise en fonction de la polarisation incidente des ondes. Pour changer la polarisation de l'onde incidente, on tourne l'émetteur sur son axe. Réaliser ces mesures tous les  $15^\circ$  pour des angles variant entre 0 et  $180^\circ$ .

- Porter sur un graphique I en fonction de  $\cos^2(\theta)$ .

### Interféromètre de Michelson

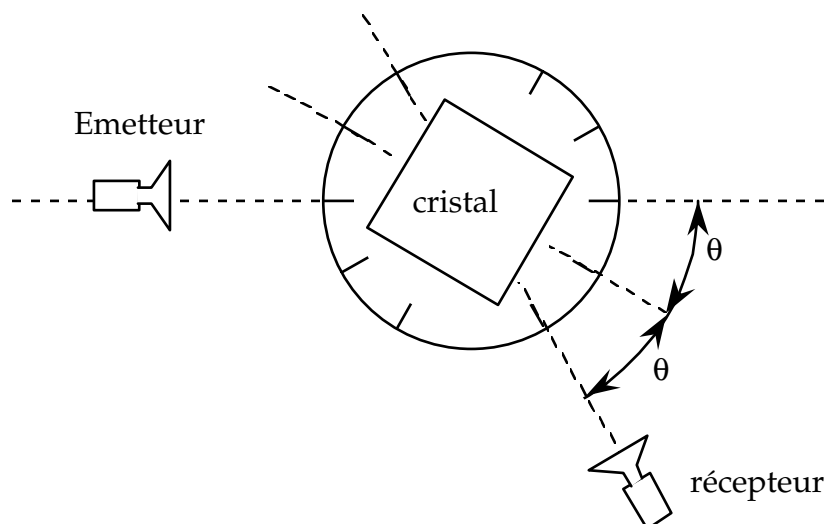
A l'aide de l'interféromètre de Michelson, on peut mesurer la longueur d'onde émise dans l'air par la diode Gunn (émetteur). Positionner le miroir B afin que l'intensité détectée par le récepteur soit maximale. Ensuite, déplacer lentement le miroir B en comptant le nombre de maximums traversés (au moins une dizaine). En mesurant la distance totale du déplacement, on en déduit la longueur d'onde.

### Diffraction par deux fentes

- Mesurer, en fonction de l'angle, l'intensité produite par l'interférence de 2 fentes (une mesure tous les  $5^\circ$ ).
- Reporter sur un graphique les valeurs de l'intensité en fonction de l'angle.
- En se servant de la longueur d'onde déterminée précédemment, calculer la distance entre les deux fentes à partir de la position des maxima.

Diffraction de Bragg (*Cette partie expérimentale est à réaliser en démonstration pour les orientations autres que la physique*)

Mesurer la constante du réseau du "cristal" en utilisant la longueur d'onde déterminée précédemment. Le montage est schématisé sur la figure 8.



**Figure 8**

L'onde incidente et l'onde réfléchie forment avec le réseau cristallin le même angle et il faut tourner le cristal de  $\theta$  et le récepteur de  $2\theta$ . En partant de  $20^\circ$ , varier l'angle  $\theta$  du cristal par pas de  $2^\circ$  et positionner ensuite le détecteur à  $2\theta$ . Chercher l'intensité maximale en variant légèrement la position du cristal autour de l'angle  $\theta$ . Porter ces valeurs sur un graphique et calculer la constante du réseau pour le premier pic d'intensité.