

**Université PARIS SUD  
IFIPS**

**CP2**

# **PHYSIQUE EXPERIMENTALE**

## **Ondes électromagnétiques**

# Table des matières

<b><i>INTERFERENCES ET DIFFRACTION EN ONDES VISIBLES</i></b> _____	- 5 -
<b><u>SECURITE LASER</u></b> _____	- 5 -
<b>Rappels théoriques</b> _____	- 5 -
<b>Objectifs :</b> _____	9
<b>Matériel disponible :</b> _____	10
<b>Manipulations</b> _____	10
<b><u>Annexe : Les lasers</u></b> _____	13
<b>INTERFERENCES ET DIFFRACTION EN ONDES CENTIMETRIQUES</b> _____	15
<b>Objectifs:</b> _____	15
<b>Matériel disponible :</b> _____	15
<b>Manipulations</b> _____	16
<b><u>Annexe : la polarisation</u></b> _____	17
<b>EFFET DOPPLER</b> _____	19
<b>Principe de l'effet Doppler</b> _____	19
<b>Matériel disponible :</b> _____	21
<b>Manipulations</b> _____	22
<b><u>Note sur l'utilisation des oscilloscopes</u></b> _____	23
<b><u>Annexe : historique du radar</u></b> _____	25



# Physique expérimentale

## S4 PM

Le programme de physique expérimentale du S4 comporte plusieurs expériences portant sur différents points des cours que vous aborderez au cours de l'année.

Il s'agit :

- Expérience 1: Interférences et diffraction en lumière visible.
- Expérience 2: Interférences et diffraction en ondes centimétriques.
- Expérience 3: Effet Doppler.

Cet enseignement de physique expérimentale sera l'occasion pour vous, de mettre en évidence et de caractériser des phénomènes permettant de mieux appréhender certains concepts relatifs aux ondes électromagnétiques.

Comme dans toutes manipulations, il vous sera demandé de porter toute votre attention sur la qualité (l'incertitude) de vos mesures, tant au niveau statistique qu'expérimentale (erreur récurrente).

Vous rendrez un compte-rendu en fin de séance, ou la semaine suivante (mais pas plus tard !) dans lequel vous aurez pris soin de préciser les objectifs de vos travaux et de faire figurer vos résultats expérimentaux (sans oublier de prendre en compte les incertitudes de mesures) et leur analyse.



# INTERFERENCES ET DIFFRACTION EN ONDES VISIBLES

## SECURITE LASER

Les lasers He-Ne que vous allez utiliser sont de classe II, c'est à dire qu'ils ont une puissance inférieure à 1 milliwatt. Ils sont donc sans danger à condition toutefois d'observer quelques règles élémentaires de sécurité :

- **Coupez le faisceau avant toute intervention sur son parcours**
- **Evitez les risques de réflexions parasites.**
- **Maintenez le faisceau dirigé vers le mur et surtout :**

**NE REGARDEZ JAMAIS LE FAISCEAU DANS L'AXE !**

**PRENDRE SOIN D' EVITER DE REGARDER LE FAISCEAU LASER REFLECHI SUR LES DIFFERENTS SUPPORTS DU MONTAGE.**

## **Rappels théoriques**

### **Interférences**

On dit qu'il y a interférence lumineuse au point M de l'espace recevant deux (ou plusieurs) ondes lumineuses si l'intensité lumineuse résultant en M est différente de la somme des intensités dues à chacune des ondes en M.

L'onde résultante de la superposition au point M de l'espace de deux ondes monochromatiques d'amplitudes  $A_1$  et  $A_2$ , de même longueur d'onde  $\lambda$  (de vecteur d'onde  $\mathbf{k}$ , avec  $k = 2\pi/\lambda$ ) a pour expression :

$$\left. \begin{array}{l} \Psi_1 = A_1 \cdot e^{-i(\omega t + \phi_1)} \\ \Psi_2 = A_2 \cdot e^{-i(\omega t + \phi_2)} \end{array} \right\} \Rightarrow \Psi = (A_1 \cdot e^{-i\phi_1} + A_2 \cdot e^{-i\phi_2}) \cdot e^{-i\omega t}$$

où  $\phi_i = \varphi_i - \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}_i$ , avec  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  phases à l'émission.

$$\begin{aligned} \text{Son intensité en M est : } I &= \Psi \cdot \overline{\Psi} = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi) \end{aligned}$$

avec  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 + k(r_1 - r_2)$ .

- ◆ Sources incohérentes : Si les deux sources  $S_1$  et  $S_2$  sont indépendantes, la phase relative  $\varphi$  des ondes varie de façon aléatoire et la moyenne temporelle du terme en  $(\cos \varphi)$  s'annule. L'éclairement de l'écran est uniforme, il n'y a pas d'interférence.
- Sources cohérentes : Si les sources  $S_1$  et  $S_2$  sont dérivées d'une source primaire unique, alors le déphasage  $\varphi = \varphi(M)$  des ondes est, pour tout point  $M$ , une valeur constante par rapport au temps. La courbe d'interférences  $I = I(\varphi)$  est représentée ci-dessus.

Dans le cas où les sources ponctuelles sont synchrones ( $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ ) et d'amplitudes égales, l'intensité devient :

$$I = 2A^2(1 + \cos(\varphi)) = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\pi\delta}{\lambda}\right) \quad \text{où } \delta = [S_2M] - [S_1M]$$

en notant  $\delta$  la différence de marche entre les 2 radiations provenant de  $S_1$  et  $S_2$ .

Lorsque l'écran d'observation est très éloigné des fentes, l'approximation  $D \gg d$  donne  $r_2 - r_1 \approx d \sin \theta$ , d'où la distribution d'intensité de la figure d'interférences :

$$I(M) = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)$$

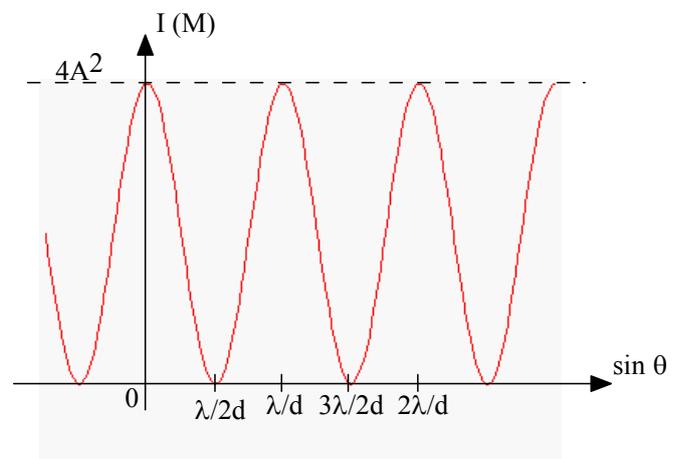
Ce qui donne une intensité maximale pour :

$$\sin \theta_{Max} = n \frac{\lambda}{d},$$

et une intensité minimale (nulle)

pour :

$$\sin \theta_{min} = (2n + 1) \frac{\lambda}{2d}.$$

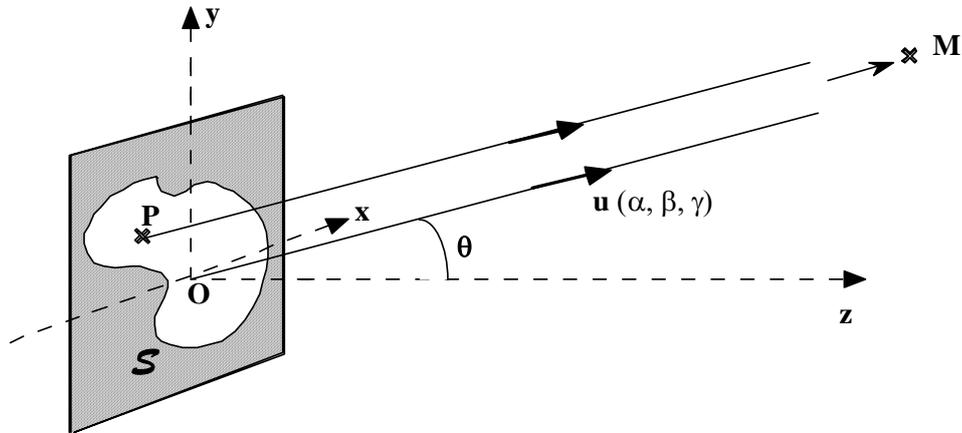


## Diffraction

Lorsqu'un faisceau lumineux rencontre un diaphragme de petites dimensions (de dimensions approchant sa longueur d'onde), cela perturbe la propagation de l'onde et il apparaît des phénomènes de diffraction : la lumière « diffractée » se propage alors dans des directions non prévues par les lois de l'optique géométrique.

Il n'y a pas de différence fondamentale entre le phénomène d'interférences où un nombre *fini* de radiations lumineuses issues de sources cohérentes discrètes se superposent, et le phénomène de diffraction où on a superposition de radiations émises par une distribution *continue* de sources cohérentes.

On se limite ici aux phénomènes de diffraction (diffraction de Fraunhofer) à l'infini d'une onde plane.



L'amplitude de l'onde résultante en un point M de l'espace ne s'exprime plus sous la forme d'une somme, mais sous la forme d'une intégrale sur la surface  $S$  de l'ouverture (i.e. un ensemble continu à deux dimensions de points sources).

$$A(M) = A(\alpha, \beta) = \frac{A_0}{S} \iint_S e^{i\varphi} dS$$

où M est repéré par le vecteur unitaire  $\mathbf{u}(\alpha, \beta, \gamma)$  et où  $\varphi$  est le déphasage entre le rayon diffracté issu du point P de coordonnées  $(x, y)$  et celui issu de l'origine du diaphragme O. Les différences de phase entre les rayons diffractés (par les points P) proviennent des différences de trajets parcourus après l'ouverture. La différence de marche entre le rayon diffracté par un point P et celui diffracté par O est  $\delta = PM - OM \approx -\mathbf{u} \cdot \mathbf{OP}$  et le déphasage s'exprime par  $\varphi = k \cdot \delta \approx -k \mathbf{u} \cdot \mathbf{OP}$ .

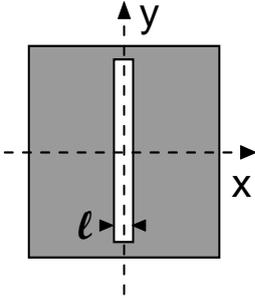
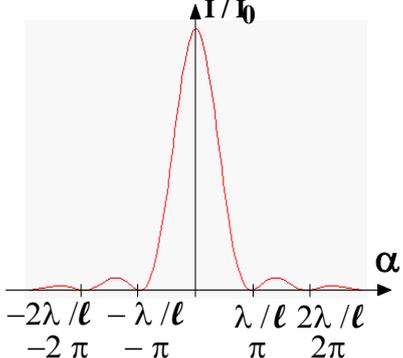
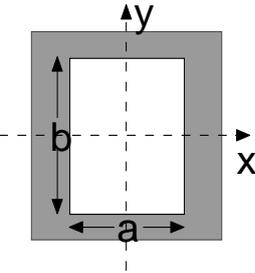
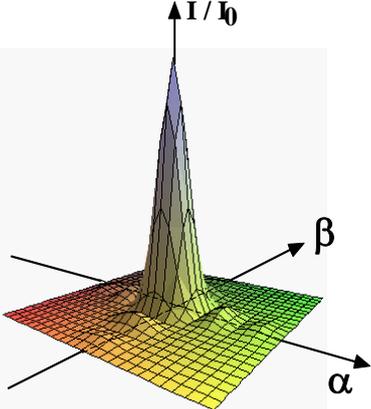
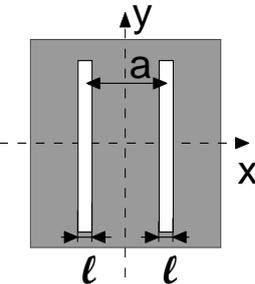
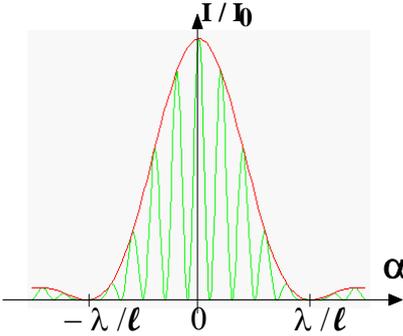
Le(s) paramètre(s) de diffraction et loi de répartition de l'intensité diffractée à l'infini sont rassemblés aux tableaux suivants pour les diaphragmes suivants :

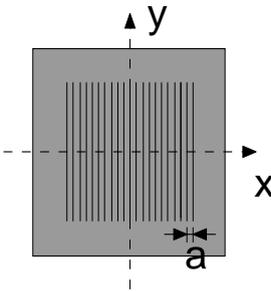
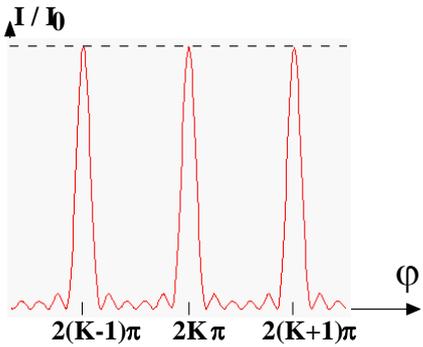
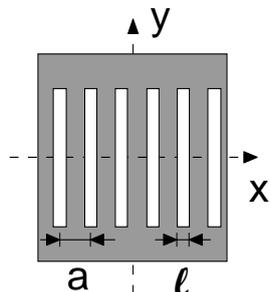
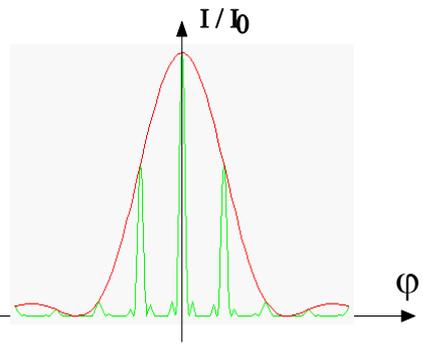
- Fente simple (1D) de largeur  $\ell$   
 Une fente verticale engendre une figure de diffraction horizontale.  
 L'intensité s'annule pour  $\alpha = \sin \theta = n \lambda / \ell$ , où n est un entier  $\neq 0$ .  
 La frange centrale a une largeur de  $2 \lambda / \ell$ .
- Diaphragme rectangulaire de largeur a et de hauteur b
- Fentes d'Young de largeur  $\ell$  et espacées de a  
 L'intensité de diffraction est égale au produit de la fonction caractérisant l'intensité diffractée par une fente seule, par la fonction traduisant les phénomènes d'interférences entre les vibrations diffractées par les deux ouvertures.
- Réseau parfait de N fentes infiniment fines espacées de a :  
 Le pas du réseau est a.  $\varphi$  est le déphasage entre les ondes diffractées issues de deux fentes successives. Les maxima principaux de la courbe sont associés à des situations où  $\varphi$  est un multiple de  $2\pi$  :  

$$\varphi = 2n\pi = (2\pi a / \lambda) \times (\sin \theta), \text{ i.e. } \alpha = \sin \theta = n \lambda / a.$$
 N, le nombre de fentes éclairées, intervient lorsqu'il s'agit des maxima secondaires.

- Réseau réel de N fentes de largeur  $\ell$  espacées de  $a$  :  
L'enveloppe de la figure de diffraction est celle d'une fente simple de largeur  $\ell$ .

**ATTENTION : les courbes sont tracées en fonction des paramètres ANGULAIRES de diffraction.**

<p>Fente simple</p> 	$u = \frac{\pi \ell}{\lambda} \alpha$ $I = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2$	
	$\begin{cases} u = \frac{\pi a}{\lambda} \alpha \\ v = \frac{\pi b}{\lambda} \beta \end{cases}$ $I = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 \left( \frac{\sin v}{v} \right)^2$	
	$\begin{cases} u = \frac{\pi \ell}{\lambda} \alpha \\ \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} a \alpha \end{cases}$ $I = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 [1 + \cos \varphi]$	

<p>Réseau parfait</p> 	$\varphi = \frac{2\pi a}{\lambda} \alpha$ $I = I_0 \left[ \frac{\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{N \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \right]^2$	
<p>Réseau réel</p> 	$\begin{cases} u = \frac{\pi \ell}{\lambda} \alpha \\ \varphi = \frac{2\pi a}{\lambda} \alpha \end{cases}$ $I = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2 \left[ \frac{\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{N \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \right]^2$	

Des animations sont disponibles sur le web à l'adresse suivante :

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/enseignement/tp/interferences/objectifs.html>

Références :

H. Lombroso, *Problèmes résolus d'optique géométrique et ondulatoire*, Dunod (1995)

J.-P. Pérez, *Optique géométrique et ondulatoire*, Masson (1994)

### Objectifs :

Lorsqu'un faisceau lumineux rencontre un objet (obstacle ou trou) de petite dimension, des phénomènes non explicables par l'optique géométrique apparaissent. La répartition de lumière derrière l'objet se présente sous la forme d'une tache centrale intense entourée de taches secondaires plus faibles. La largeur de la tache centrale est d'autant plus grande que l'objet est petit. C'est le phénomène de **diffraction**. Un point intéressant est que le complémentaire d'un objet par exemple un fil plat dans le cas d'une fente aura la même figure de diffraction que l'objet.

Ce phénomène de diffraction ne peut être séparé du phénomène d'**interférences**: quand deux ondes de même fréquence et cohérentes interfèrent, les grandeurs physiques associées à chacune des ondes s'ajoutent. Si le déphasage entre les deux ondes est un multiple de  $2\pi$ , alors l'amplitude résultante est la somme des amplitudes des deux ondes et l'intensité observée sera maximum. Par contre si le déphasage vaut  $\pi$  à un multiple de  $2\pi$  près, alors les amplitudes se soustraient et l'intensité est minimum. Les variations d'intensité sont donc alors reliées à des variations de phase entre les deux ondes.

L'objectif de ce TP est de mettre en évidence ces phénomènes en utilisant plusieurs objets diffractants.

## **Matériel disponible :**

- ◆ Un laser He-Ne (longueur d'onde 632,8 nm) polarisé ou non.
- ◆ Différents objets diffractants: des fentes simples, deux fentes parallèles ou fentes d'Young, des réseaux (assemblée de fentes parallèles et équidistantes), des diapositives à écrans complémentaires. Ces objets devront être éclairés de façon homogène.
- ◆ Une caméra CCD linéaire dont la zone utile est de l'ordre de 3 cm. Un logiciel (CALIENS) permet de visualiser les figures de diffraction et d'interférences.

### **Quelques conseils:**

Commencer toujours par une intensité de faisceau faible (polariseurs assez croisés) qui pourra être augmentée ensuite si nécessaire. Observer toujours l'image sur un écran placé devant la caméra avant d'utiliser celle-ci.

NE JAMAIS REGARDER LE FAISCEAU DIRECTEMENT.

Les objets diffractants ainsi que la caméra peuvent être déplacés finement. Pour la caméra, il s'agit d'un détecteur linéaire et sa position verticale aussi est critique.

Pour observer l'image de diffraction, allumer le boîtier de connexion entre la caméra et l'ordinateur. Utiliser le logiciel *Caliens* (notice sur la table).

Il existe deux modes: le temps réel permet de visualiser le signal instantané reçu par la caméra, l'autre mode (temps réel non choisi) est indispensable pour l'acquisition et le traitement; plusieurs courbes peuvent être stockées simultanément.

On peut aussi jouer sur la sensibilité (jusqu'à 14), mais sur certaines sensibilités (comme 2) le 50Hz est filtré.

Pour analyser, il existe des curseurs que l'on peut déplacer. On peut aussi utiliser choisissant l'analyse automatique «Interférences» qui permet de superposer à la courbe expérimentale la courbe théorique d'un faisceau de forme gaussienne, de la figure de diffraction d'une fente, de deux fentes....

Les figures de diffraction seront sauvegardées sur une disquette en format *texte* (fichier de données: intensité/pixels) ou *bitmap* (c'est-à-dire l'image de la courbe d'intensité) avec la commande *Exporter*.

## **Manipulations**

### **1- Forme du faisceau incident**

Regarder l'image du faisceau direct en prenant bien soin de croiser les deux polariseurs pour que l'intensité soit très faible et n'abîme pas les capteurs. Observer la forme du faisceau et en déduire sa largeur. Comparer à une forme gaussienne.

## 2- Diffraction par une fente

- a. Visualiser la figure de diffraction d'une fente simple de largeur  $a$  connue:  
**Fente 1:**  $49 \pm 1 \mu\text{m}$ , **Fente 3:**  $148 \pm 2 \mu\text{m}$ .
- b. Repérer la largeur  $d$  de la tache centrale (distance entre les deux premiers minima symétriques). Vérifier la relation:  $a = 2\lambda \frac{L}{d}$ , où  $L$  est la distance entre la fente et la caméra.
- c. Mesurer les intensités des maxima secondaires par rapport au maximum principal. Pour cela, il faut que la réponse de la caméra ne soit pas saturée au niveau des pics sinon le signal n'est plus proportionnel à l'intensité reçue. C'est pourquoi, on comparera d'abord l'intensité du premier pic secondaire avec l'intensité du pic principal. Puis, on comparera l'intensité des autres pics secondaires à l'intensité du premier pic secondaire en augmentant l'intensité si nécessaire.
- d. Déplacer horizontalement la fente. La figure de diffraction se déplace-t-elle?
- e. Changer  $L$  et vérifier l'évolution de la largeur de la tache en fonction de  $L$ .
- f. Prendre une fente de largeur différente pour étudier l'influence de la largeur de la fente.

## 3- Diffraction par des écrans complémentaires, théorème de Babinet

Deux écrans sont dits complémentaires si les parties opaques de l'un correspondent aux parties transparentes de l'autre. Il en est ainsi pour un fil et une fente, une ouverture circulaire et un disque.

On admet le **théorème de Babinet**: les figures de diffraction de deux écrans complémentaires éclairés de la même façon par une onde plane monochromatique sous incidence normale sont identiques en dehors du centre de la figure de diffraction.

- a. Vérifier à l'aide des diapositives à écrans complémentaires, la validité du théorème de Babinet.

**Application: Estimation de la taille d'un de vos cheveux.**

- b. Scotcher votre cheveu (tendu) sur un support de diapositive et le placer à la place de la fente.
- c. Comparer la figure de diffraction d'un de vos cheveux avec celle de la fente. Analyser notamment position des minima et des maxima.
- d. En supposant que la largeur de la tache principale est donnée par la même formule que pour la fente (ce qui est faux puisque votre cheveu a une section circulaire), estimer la taille de votre cheveu.

Conclusion.

## 4- Fentes d'Young

Ce sont deux fentes fines parallèles. Chaque fente va diffracter la lumière et va pouvoir être considérée comme une source. Comme le faisceau laser est cohérent sur la distance entre deux fentes, les deux fentes deviennent en fait deux sources cohérentes et là où les faisceaux qu'elles diffractent se rencontrent, il y a interférence. Le déphasage entre les deux ondes

issues de ces deux sources dépend de la position du point considéré et l'intensité va présenter des maxima et des minima dus à ces interférences constructives ou non. La figure obtenue sera une figure d'interférence des deux fentes modulée par une figure de diffraction d'une fente.

- Essayez de cacher une fente (sans mettre de scotch sur la zone du support où sont gravées les fentes) et réaliser la figure de diffraction de l'autre. Enregistrer cette figure. En déduire la largeur de la fente.
- Que peut-on dire de la figure de diffraction de l'autre fente?
- Les deux fentes diffractent. Qu'observe-t-on?
- Visualiser la figure d'interférences caractérisée par des franges fines et régulières dont l'interfrange (distance moyenne entre franges) est notée  $i$ . La distance entre les franges est donnée par :

$$i = \frac{\lambda L}{d}$$

où  $L$  est la distance entre les fentes et le détecteur,  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $d$  la distance entre les fentes. Comment intervient la largeur des fentes?

- Déplacer les fentes le long du banc optique. Qu'observe-t-on?

## 5- Réseau

Un ensemble de fentes fines identiques, parallèles, équidistantes et situées dans un même plan, constitue un réseau plan. Il est caractérisé par:

- $a$ , la largeur de chaque fente.
- $d$ , la distance qui sépare 2 points homologues de 2 fentes successives appelée période ou pas du réseau (réseau cassé:  $d=12.7 \mu\text{m}$ ).
- $n$ , le nombre de fentes par unité de longueur. On a  $d = 1/n$ .
- $D$  la taille du réseau ou de la zone éclairée si tout le réseau n'est pas éclairé.
- $N$ , le nombre total de fentes contenu dans le réseau, il est donné par  $N=D/a$ .

- Décrire la figure de diffraction obtenue par un réseau. Rechercher dans la figure de diffraction ce qui est dû à la largeur de chaque fente, à la distance entre les fentes, à la largeur du réseau ou de la zone éclairée.**

- Montrer que la distance  $u$  entre les pics intenses est donnée par :  $u = \frac{\lambda L}{d}$**

- Que se passe-t-il si on incline le réseau par rapport à l'axe optique ?**

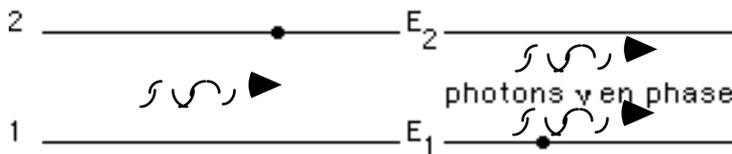
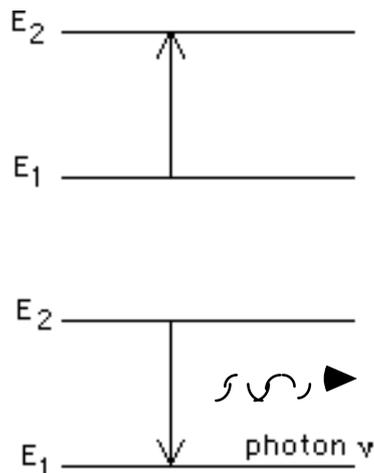
**Il est ainsi possible de séparer en utilisant un réseau les différentes longueurs d'ondes présentes dans une lumière blanche ou la lumière émise par une lampe spectrale. Connaissez-vous un autre dispositif permettant de séparer les longueurs d'onde? Sur quel principe est-il basé?**

## Annexe : Les lasers

### - Principe.

Laser : "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation".

Un système matériel microscopique (noyau, atome, molécule...) peut échanger de l'énergie lumineuse avec le milieu extérieur par trois phénomènes radiatifs distincts, à savoir :



#### **1. l'absorption :**

L'absorption d'un photon par le système augmente l'énergie de celui-ci de la valeur  $E_1$  à la valeur  $E_2$ .

#### **2. l'émission spontanée :**

Porté à l'énergie  $E_2$ , le système peut perdre l'énergie  $h\nu = E_2 - E_1$  qu'il vient d'acquérir en réémettant spontanément un photon de fréquence  $\nu$ .

#### **3. l'émission induite (ou émission stimulée) :**

Ce phénomène fut découvert par Einstein en 1917.

Ici encore l'atome perd l'énergie  $h\nu$  par émission d'un photon, mais cette émission est provoquée par l'impact d'un photon identique (qui n'est évidemment pas absorbé en ce cas); par ailleurs les 2 photons émergents ont la même direction et leurs ondes associées ont la même phase (celle du photon incident). Ce processus est donc amplificateur.

Mais pour que ce phénomène d'amplification soit possible, il faut que le nombre de particules dans l'état supérieur soit plus grand que celui des particules dans l'état inférieur : c'est l'inversion de population. Dans ce cas il y a plus de photons émis que de photons absorbés, les photons stimulés ne sont pas réabsorbés (plus exactement le bilan est positif) et il y a amplification.

### - Laser He-Ne (utilisé en T.P.).

C'est un laser à gaz: il se compose d'une cavité remplie d'environ 85 % d'Hélium et de 15% de Néon. Le milieu actif est constitué par les atomes de Néon; l'Hélium joue un rôle essentiel dans le pompage aboutissant à l'inversion de population, bien qu'il ne constitue pas le milieu actif.

Les atomes d'Hélium sont excités par une décharge électrique. Ils sont portés dans un niveau  $2s$  qui a pratiquement la même énergie que le niveau  $3s$  du Néon. Les atomes d'Hélium excités transmettent leur énergie aux atomes de Néon par collisions. Ces atomes de Néon retombent ensuite vers des états d'énergie inférieurs en émettant un rayonnement laser.

La longueur d'onde la plus fréquemment utilisée correspond à la transition  $3s - 2p$  située à 632,8 nm (lumière rouge). D'autres fréquences peuvent être émises à 1152,3 nm ou 3391,2 nm

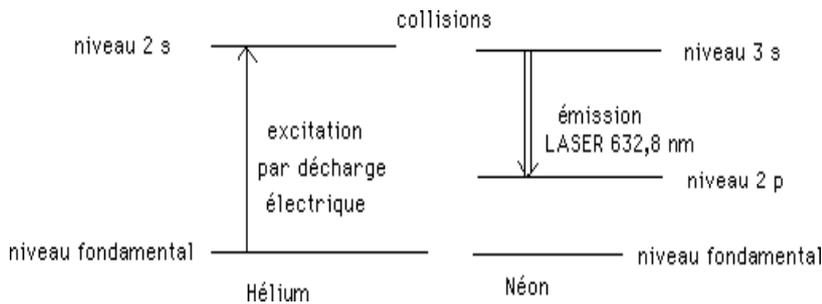


Schéma de principe d'un laser Hélium-Néon

### **- Réalisation pratique du laser à gaz.**

La cavité est constituée d'un tube cylindrique en verre placée entre 2 lames métallisées ou entre 2 miroirs concaves dont l'un est presque totalement réfléchissant et l'autre possède un pouvoir de transmission pouvant aller jusqu'à 10 %. C'est cette lumière transmise qui constitue le faisceau laser. Le gaz contenu dans ce tube peut être excité par des électrodes.

Imaginons un photon qui se déplace dans le tube parallèlement à son axe, vers la droite. Au cours de son trajet, il provoque un certain nombre de fois les phénomènes d'absorption et d'émission induite. Si le gaz excité se trouve dans un état tel que le bilan d'énergie lumineuse pour ce trajet est positif, le flux lumineux se trouvera amplifié; réfléchi presque intégralement par le miroir de droite, il peut subir une deuxième fois l'amplification avant d'arriver sur le miroir de gauche, et ainsi de suite. Finalement l'état du tube se stabilise dans un état où les diverses pertes d'énergie lumineuse (énergie qui traverse les miroirs... et qui est seule utilisée par l'expérimentateur, énergie perdue par émission spontanée qui a lieu dans n'importe quelle direction...) contrebalancent l'amplification du tube.

### **- Propriétés du faisceau laser.**

La lumière du faisceau laser est :

- très monochromatique
- très cohérente
- très directive (ceci est évident si on pense qu'un photon qui ne se propage pas exactement parallèlement à l'axe du tube, sort du tube inévitablement au bout d'un certain nombre de réflexions sur les miroirs).

Nous allons nous servir du laser simplement pour observer commodément des phénomènes difficiles à voir avec des sources classiques du fait du manque de lumière.

# INTERFERENCES ET DIFFRACTION EN ONDES CENTIMETRIQUES

## **Objectifs:**

Propagation d'ondes électromagnétiques de type radar. Polarisation. Interférométrie.

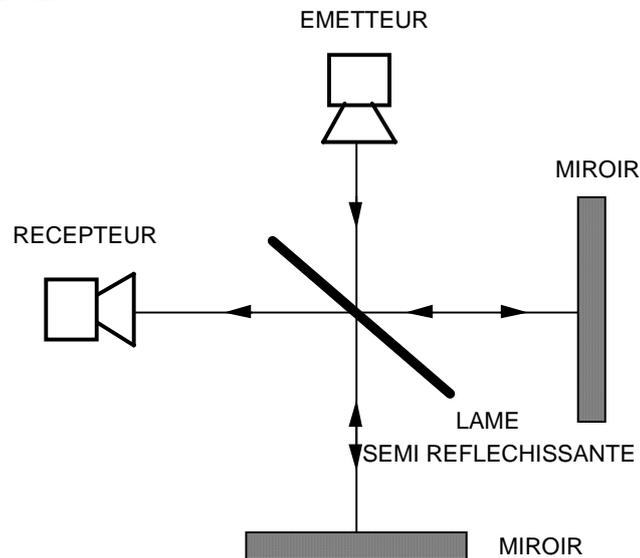
## **Matériel disponible :**

- ◆ Un émetteur qui est une diode Gunn. Alimentée par du 8 V continu maximum, elle émet des ondes électromagnétiques dont la fréquence est voisine de 9 GHz. Elle comporte un élément à base de semi-conducteur et une cavité résonante réglable mécaniquement, ce qui permet de faire varier la fréquence entre 8.5 et 10.5 GHz. A la sortie une antenne cornet à forme de parois exponentielle permet une bonne adaptation d'impédance entre la sortie de la diode et l'air dans la gamme de fréquence considérée. Contrairement à un radar utilisé en détection par exemple, l'onde émise est sinusoïdale.
- ◆ Un détecteur composé d'une diode fixée au centre d'un guide d'onde. Etant donné la gamme de fréquence considérée, on ne voit donc pas les oscillations haute fréquence du champ électrique, mais on détecte un signal correspondant à l'amplitude efficace. Ce signal sera envoyé sur un oscilloscope ou un multimètre. Là encore un cornet permet l'adaptation d'impédance.
- ◆ Un fréquencemètre constitué d'une cavité coaxiale avec un plongeur d'accord et un cadran gradué en MHz. La cavité est couplée à un guide d'onde. Quand la fréquence de l'onde incidente est égale à la fréquence de la cavité dont la valeur est affichée sur le cadran, alors il y a perte de la transmission de l'onde incidente car la cavité absorbe. La fréquence de l'onde incidente correspondra donc au minimum de transmission quand on fait varier la fréquence de la cavité résonante.
- ◆ Une grille composée de fils métalliques que l'on peut faire tourner
- ◆ Un jeu de plaques en bois verticales dont une face est recouverte de mousse absorbante et doit être placée face à l'émetteur afin d'éviter les réflexions parasites. Ces plaques servent à réaliser des fentes.
- ◆ Des plaques métalliques réfléchissantes
- ◆ Une plaque semi réfléchissante en bakélite qui, orientée à  $45^\circ$  de l'onde incidente, laissera passer environ 50% de l'onde incidente et réfléchira les 50% restant.
- ◆ Des lentilles en paraffine (FRAGILES) qui jouent le même rôle que des lentilles classiques en optique. Remarquer qu'elles ne sont pas transparentes à la lumière visible!!! Commenter.
- Un grand plateau de bois pour réaliser ces expériences (on a le droit de monter avec précaution sur la table pour atteindre les éléments situés dessus!). L'émetteur est placé au bord du cercle. Le détecteur sera déplacé uniquement sur le cercle dessiné sur le plateau. Il ne doit pas être mis à petite distance directement face à l'émetteur.

## Manipulations

### 1. Interféromètre

Réaliser le montage suivant :



**La lame semi-réfléchissante sépare l'onde en deux ondes cohérentes qui après réflexion sur les miroirs vont interférer sur le récepteur. Si les ondes parcourent la même distance comme c'est le cas sur le schéma alors les deux ondes sont en phase et leurs amplitudes s'ajoutent de façon constructive. Si maintenant on déplace l'un des miroirs dans la direction de propagation de l'onde qu'il reçoit, on va modifier l'un des trajets et modifier le déphasage. Pour certaines positions du miroir, les amplitudes des ondes vont alors se soustraire et on observe un minimum d'intensité au niveau du détecteur. En déplaçant continûment l'un des miroirs, repérer ainsi la succession de maxima et de minima d'intensité.**

- Translater l'un des miroirs d'environ 20 cm. En déduire la distance moyenne entre deux positions du miroir associée à des maxima d'intensité. Cette distance correspond à la moitié de la longueur d'onde.
- En déduire la longueur d'onde :

$$\lambda = \quad \pm \quad \text{m}$$

- En déduire la vitesse de propagation des ondes

$$c = \quad \pm \quad \text{m.s}^{-1} .$$

## 2. Polarisation (sans lentille)

- Placer le détecteur en face de l'émetteur. Faire tourner le détecteur d'un angle  $\phi$  autour de l'axe principal et étudier l'intensité reçue en fonction de l'angle  $\phi$ . Montrer qu'elle dépend linéairement de  $|\cos \Phi|$ .

Cette expérience montre que d'une part le récepteur est sensible à la polarisation de l'onde et que l'onde elle-même est polarisée, c'est-à-dire que le champ électrique qui se propage à une direction bien précise. Le but est maintenant de déterminer cette direction; on va donc utiliser un polariseur constitué de fils métalliques qui laisse passer facilement un champ électrique parallèle à ces fils.

- Se remettre dans la situation où le détecteur affiche un maximum d'intensité. Placer le polariseur au centre du cercle entre l'émetteur et le récepteur. Faire tourner le polariseur d'un angle  $\alpha$  en partant d'une orientation des fils verticale. Mesurer l'intensité reçue par le détecteur en fonction de  $\alpha$ . Comme précédemment, montrer que l'intensité reçue est linéaire en  $\cos^2 \alpha$ . En déduire la polarisation de l'onde incidente et celle du récepteur.

- Dans cette configuration, orienter le polariseur à  $45^\circ$ . Faire tourner alors le détecteur et mesurer l'intensité en fonction de l'angle  $\phi$ . Montrer qu'elle est maximum quand le détecteur est lui aussi tourné de  $45^\circ$ , c'est-à-dire parallèle au polariseur.

## 3. Diffraction

**- On va d'abord étudier l'influence des lentilles sur la largeur angulaire de l'onde émise. Etudier la largeur angulaire de l'onde émise sans lentille. Refaire l'expérience en plaçant avec précaution les lentilles au centre du cercle entre l'émetteur et le récepteur. Tracer les courbes  $I(\theta)$  sans et avec lentilles. Commenter.**

- Placer le récepteur en face de l'émetteur. Vérifier la bonne orientation de l'émetteur.

- Former au centre du cercle une fente de largeur environ 6 cm avec les plaques munies d'un absorbeur, l'absorbeur étant placé face à l'émetteur. Placer une lentille de part et d'autre de la fente pour se placer dans des conditions de diffraction à l'infini. Déplacer le détecteur autour du cercle d'un angle  $\theta$  entre  $-45^\circ$  et  $45^\circ$  et tracer l'intensité mesurée en fonction de  $\theta$ .

Mettre en évidence la diffraction par la fente: l'ouverture angulaire est plus grande qu'en l'absence de fente

- Changer la largeur de la fente. Refaire la courbe pour montrer que la largeur angulaire de l'onde diffractée varie grossièrement comme  $1/d$ .

### **Annexe : la polarisation**

Une onde électromagnétique est la propagation dans l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires à la direction de propagation. Si la direction du champ électrique est toujours la même (x sur le dessin), alors l'onde est polarisée rectilignement. C'est le cas de l'onde émise par votre antenne.

Le détecteur lui aussi est polarisé. Il mesure l'amplitude efficace du champ électrique dans sa direction principale. Si la direction principale du détecteur fait un angle  $\alpha$  avec la direction de polarisation, alors l'amplitude efficace mesurée est :  $A_{eff} = |\cos \alpha| A_{0eff}$ .

Pour changer la direction de la polarisation incidente, on peut utiliser un polariseur. Après le polariseur, le champ électrique est dirigé suivant l'axe du polariseur (les fils de la grille dans le cadre du TP) mais son amplitude efficace est plus faible :  $A_{1eff} = |\cos \alpha| A_{0eff}$ . Si on place le détecteur parallèle au champ électrique initial, il va ainsi mesurer une nouvelle amplitude efficace :  $A_{eff} = |\cos \alpha| A_{1eff} = |\cos \alpha|^2 A_{0eff}$

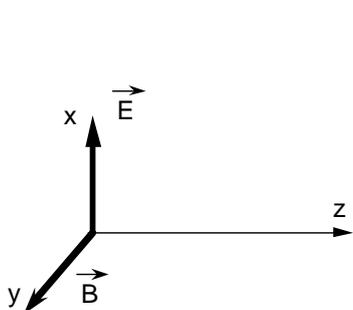
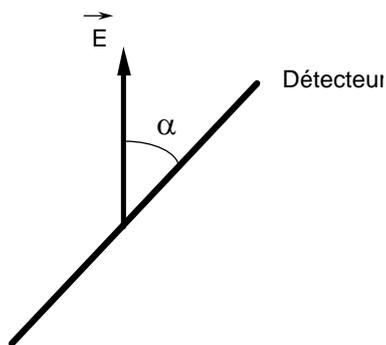
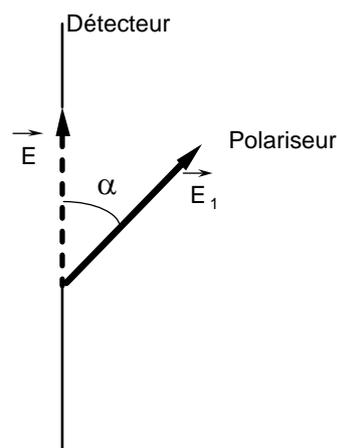


Schéma d'une OEM se propageant dans la direction z et polarisée suivant x



Amplitude efficace transmise par le polariseur :  
 $A_{eff} = |\cos \alpha| A_{0eff}$



Amplitude efficace mesurée par le détecteur :  
 $A_{eff} = |\cos \alpha| A_{1eff} = |\cos \alpha|^2 A_{0eff}$

# EFFET DOPPLER

**Remarque liminaire:** L'étude de l'effet Doppler et de ses applications est faite dans le cadre du cours de physique de S3 pour des ondes acoustiques. Les résultats en sont rappelés ici. Cependant, il importe de rappeler que le support expérimental proposé ici consiste en un double effet Doppler sur ondes électromagnétiques (OEM) dans le vide (ici l'air). La propagation de ces ondes ne fait pas référence à un milieu matériel et vous apprendrez (ou vous savez déjà), que quelque soit le repère choisi, leur vitesse de propagation est et reste constante égale à la vitesse de la lumière. Ces travaux vous permettront de la mesurer et constituent l'un de vos objectifs. La démonstration des formules, faites dans le cadre d'un support matériel nécessaire à toute onde acoustique ne peut donc être validée dans le cas d'OEM. Pour obtenir les équations Doppler en EM, il est nécessaire de se placer dans le cadre d'une théorie où  $c$  reste constant, ce sera donc les transformations de Lorentz, qui à faible vitesse redonnent les transformations de Galilée. C'est la raison pour laquelle les résultats obtenus sur onde acoustique reste valide, c'est-à-dire reste principalement un effet radial. Les OEM présente un effet Doppler supplémentaire transverse qui peut être mis à profit dans des applications comme le gyromètre laser ou dans des mesures de physique fondamentale. Vous irez chercher sur le Web les différentes applications de l'effet Doppler dont le nombre vient de s'accroître avec la réalisation du laser à atomes (septembre 2003)

L'effet Doppler se traduit par une dérive de fréquence entre le signal transmis d'une source fixe et son écho sur une cible mobile. Ce signal peut être acoustique ou une onde électromagnétique sinusoïdale.

Les exemples bien connus sont le changement de timbre de l'avertisseur d'un train à grande vitesse, le décalage du rouge de la lumière reçue des étoiles. Cependant, nous limiterons notre étude aux signaux hyperfréquences, dont le champ d'application est très étendu.

L'application la plus connue est probablement le radar utilisé, par exemple et de plus en plus, par la police pour les contrôles de vitesses des automobiles. Dans ce cas la dérive de fréquence est directement proportionnelle à la vitesse du véhicule, comme nous allons le montrer plus loin. Dans les systèmes antiviol, autre application, la dérive de fréquence déclenche directement une alarme.

## Principe de l'effet Doppler

Considérons une source émettant un signal de période  $T_0$  se déplaçant à la vitesse  $v$  par rapport à un observateur.

Soit  $t_1$  l'instant où le maximum d'un signal périodique est émis. Si à cet instant la distance entre la source et l'observateur est  $L_1$ , il parvient à cet observateur à l'instant  $t'_1 = t_1 + L_1/c$  où  $c$  est la vitesse de propagation du signal.

Le maximum suivant sera émis à  $t_2=t_1+T_0$ , mais sera reçu à l'instant  $t'_2=t_2+L_2/c$ , où  $L_2$  est la distance entre la source et l'observateur en  $t_2$ , c'est à dire  $L_2=L_1+v T_0$  ( on considère la vitesse en valeur algébrique).

La période du signal que l'observateur perçoit est donc la différence  $t'_2-t'_1$ , soit:

$$T' = T_0 \left( 1 - \frac{v}{c} \right)$$

Un raisonnement similaire conduit à montrer que si c'est l'observateur qui se déplace on à:

$$T' = \frac{T_0}{1 + \frac{v}{c}}$$

**Remarque** : Il peut sembler paradoxale que l'effet soit différent selon que ce soit l'émetteur ou le récepteur qui se déplace !

A ce sujet, il est intéressant de noter que lorsqu'on fait appel à la relativité restreinte, ce qui est nécessaire dans le cas où l'onde émise est une onde électromagnétique (se propageant donc à la vitesse de la lumière !) (cf remarque liminaire), pour exprimer les changement de référentiel, on aboutit à une formule identique quelque soit celui qui se déplace (l'observateur ou l'émetteur). ce qui est rassurant puisque leur mouvement étant **relatifs** leur rôles doivent être symétriques.

On peut obtenir une formule décrivant cet effet en considérant que les temps du référentiel en mouvement sont affectés du facteur de ralentissement  $1 - \beta^2$  avec  $\beta = v/c$  :

$$T' = T_0 \frac{1 + \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Ici, nous allons nous intéresser au cas où la vitesse  $v$  est petite devant  $c$ . Le radar Doppler émet un signal électromagnétique sans modulation de la forme  $\cos \omega t$  où  $\omega$  est la pulsation du signal Le temps nécessaire au signal pour parcourir la distance jusqu'à la cible est  $D/c$  ( $D$  = distance entre la cible et la source).

Puisque la cible est en mouvement,  $D$  varie avec le temps, mais la vitesse est très faible par rapport à  $c$ . Le signal arrivant sur la cible est le même que celui transmis au temps  $D/c$ . Le signal sur la cible est donc :

$$\cos \omega \left( t - \frac{D}{c} \right) = \cos \left( \omega t - \frac{\omega D}{c} \right)$$

Une partie de ce signal est réfléchi vers le récepteur (source).

Au niveau du récepteur (écho) on reçoit donc un signal de la forme:  $\cos \left( \omega t - \frac{2\omega D}{c} \right)$

puisque le temps  $D/c$  est pratiquement pour le trajet de la cible au récepteur.

Par simplicité, supposons maintenant que la vitesse de la cible est constante. La distance  $D$  peut alors être reliée au temps de la façon simple suivante :  $D = D_0 + V_d t$  où  $D_0$  est la distance

cible - source au temps  $t = 0$  et  $V_d$  est la vitesse axiale de la cible. Les signes + et - s'appliquent respectivement à une cible s'éloignant ou se rapprochant du récepteur.  
Ainsi l'écho peut s'écrire :

$$\cos\left(\omega t - \frac{2\omega D_0}{c} \pm \frac{2\omega v_0 t}{c}\right) = \cos\left((\omega \pm \omega_0)t - \frac{2\omega D_0}{c}\right)$$

À  $\omega_0 = \frac{2\omega v_0}{c}$  correspond une fréquence Doppler  $f_0 = \frac{2f}{c} v_0$

**Remarques importantes :**

Dans le cas étudié ici comme dans celui des exercices d'application (paragraphe 3), l'effet analysé correspondant en fait à un double effet Doppler. Dans une première étape, la source fixe (émetteur du radar) envoie un signal à la fréquence  $f$  sur un récepteur mobile (train, voiture ou globule sanguin). Celui-ci reçoit le signal à la fréquence  $f^*$ , ce qui constitue un premier effet Doppler. Dans la deuxième étape, le récepteur est une source mobile envoyant un signal à la fréquence  $f^*$  sur le récepteur fixe du radar, qui reçoit ce signal à la fréquence  $f + f_d$  (deuxième effet Doppler).  $f_d$  est donc le glissement en fréquence entre le signal émis par une source fixe et le signal reçu par un récepteur fixe également et situé au même endroit que la source.

**Matériel disponible :**

On dispose d'un radar constitué d'un émetteur-récepteur d'onde électromagnétique, la source étant un oscillateur Gunn. Dans ce montage, c'est un circulateur à ferrite qui permet l'utilisation de la même antenne en émission et en réception. La plus grande partie du signal de l'oscillateur Gunn passe à travers le circulateur et est rayonnée par l'antenne pour atteindre la cible ; cependant une petite fraction fuit vers la cavité qui contient la diode de détection et donne une fréquence de référence à la fréquence  $f$ . Le signal de l'écho, réfléchi par la cible en mouvement est reçu par cette même antenne et se transmet presque intégralement, à travers le guide et le circulateur à la cavité de détection où il se mélange au signal de référence.

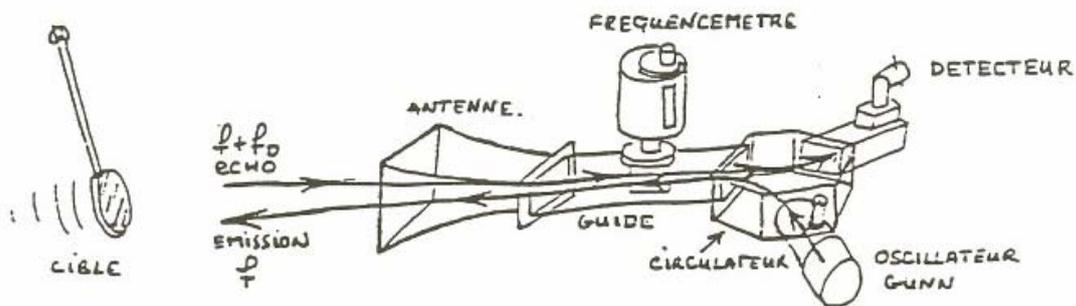


Figure 8

## **Manipulations**

Réaliser le montage ci-dessus avec comme cible le petit train dont on peut faire varier la vitesse par réglage de la tension d'alimentation. Vérifiez que la tension d'alimentation de la diode Gunn ne dépasse pas 9V.

### **1. Fréquence de l'onde émise.**

Faites varier la fréquence de la cavité résonante du fréquencemètre pour observer un minimum dans l'intensité reçue par le détecteur ou maximum si vous mesurez le signal directement sur le fréquencemètre.

Tracer la courbe de cette intensité reçue en fonction de la fréquence pour déterminer la largeur de la bande en fréquence.

$$v = \pm \text{ Hz}$$

Quand cette étude est réalisée, **surtout n'oublier pas de désaccorder le fréquencemètre** d'au moins 50 MHz par rapport à la fréquence de l'onde incidente.

### **2. Etalonnage du radar Doppler.**

Il s'agit d'étudier la variation de la fréquence Doppler en fonction de la vitesse du train.

En faisant varier la tension d'alimentation de la locomotive, on sélectionnera au moins 4 valeurs de vitesse  $v$  du train.

*Eviter des vitesses trop faibles qui entraîneraient un mouvement du train non uniforme.*

Mesurer les vitesses à l'aide du dispositif chronométrique et les fréquences Doppler correspondantes à l'aide de l'oscilloscope. Construire la courbe  $f_D=f(v)$ .

Calculer la pente de la droite ainsi déterminée et en déduire, connaissant la fréquence de l'onde incidente, la célérité de cette onde.

### **3. Etude de l'influence de l'orientation du détecteur.**

Choisir une vitesse du train et la mesurer au chronomètre. On gardera cette vitesse constante dans la suite de cette étude.

Déplacer le radar de façon à obtenir un angle  $\theta$  de l'ordre de  $20^\circ$  entre le faisceau incident et la trajectoire du train dans sa partie rectiligne.

*Il ne faudra pas oublier d'orienter le réflecteur porté par la locomotive de façon à le rendre à peu près perpendiculaire à la direction du faisceau dans la zone où sera faite la mesure.*

Mesurer la fréquence Doppler.

A partir de la courbe d'étalonnage, déterminer la vitesse apparente du train.

Faites le rapport entre la vitesse apparente déduite de la courbe d'étalonnage et la vitesse vraie mesurée au chronomètre.

Expliquez.

Faire une nouvelle mesure pour un angle  $\theta$  de l'ordre de  $40^\circ$  et/ou  $60^\circ$ . Dans ces cas, déterminer la vitesse apparente qui correspond à la moitié gauche de l'enregistrement puis celle qui correspond à la moitié droite.

En déduire l'angle moyen de visée.

## Note sur l'utilisation des oscilloscopes

Ce sont des oscilloscopes numériques à mémoire. Ils sont de deux types :  
HAMEG 205-3 ou HP 54600

Mesure des tensions (utilisée pour les courbes de résonance du fréquencesmètre)

### 1) HAMEG

La mesure s'effectue de la même façon qu'avec un oscilloscope classique. La tension est mesurée sur l'écran. Vérifier que le voyant 'STOP' est éteint (la mémoire n'est pas utilisée).

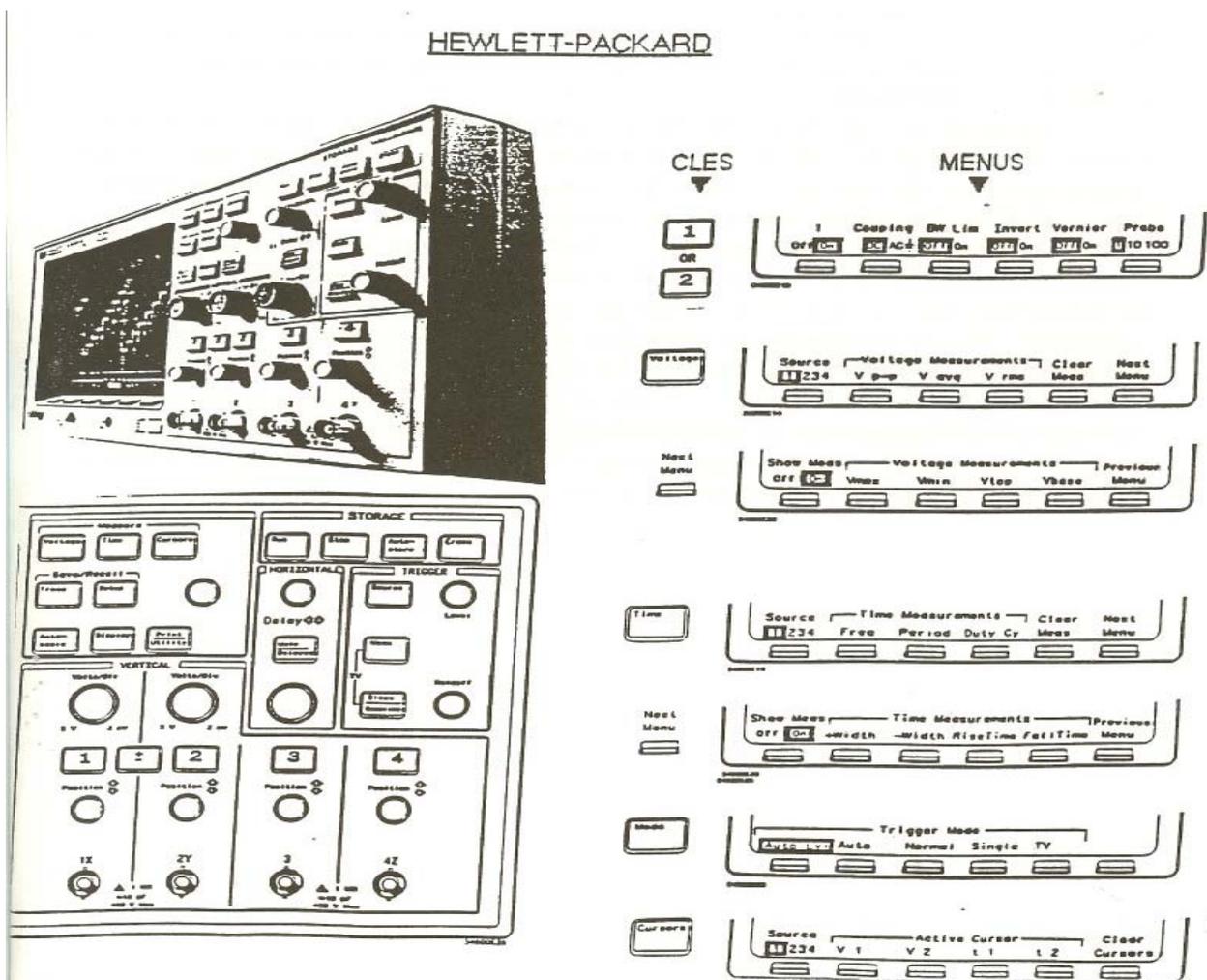
### 2) HP (Voir figure)

-Connecter le signal à une des voies de l'oscilloscope, par exemple la voie 1.

-Appuyer alors sur la clé 1. Vérifier sur le menu affiché à l'écran que la voie 1 est 'ON' et la voie 2 'OFF' et que le couplage est sur 'DC'.

-Appuyer sur la clé 'MODE'. Un nouveau menu apparaît. Sélectionner 'AUTO'.

-Appuyer sur la clé 'VOLTAGE' (série 'mesure'). Comme on veut faire une mesure de tension continue, sélectionner 'AVERAGE'. La tension est visualisée sur l'écran et sa valeur est affichée.



## Mesure des fréquences Doppler

Elle s'effectue en mode de couplage A C pour HAMEG, D C pour H P.

1) HAMEG – Régler le tension et la base de temps de façon à obtenir sur l'écran une vingtaine d'oscillations. Pour obtenir un tracé stable, appuyer sur "STOR" de façon à travailler en mode mémoire.

En appuyant sur "SINGLE", on enregistre le signal qui reste figé jusqu'à ce qu'on appuie sur "RESET" ou qu'on ait déverrouillé le bouton-poussoir "SINGLE". On peut alors faire une autre mesure.

Noter l'échelle des tensions et l'échelle des temps et imprimer l'oscillation affichée sur l'écran en appuyant sur le bouton-poussoir situé à l'arrière de l'oscilloscope.

Mesurer la distance entre les deux maxima extrêmes et la transformer en temps, connaissant la base de temps (attention ; l'impression introduit une dilatation des abscisses qu'on évaluera).

En comptant le nombre de périodes entre les deux instants mesurés, on peut en déduire la fréquence du signal.

2) H.P. –

On n'utilisera pas la méthode de mesure automatique des fréquences (clé "TIME", sélection "Freq") qui ne tient compte que d'une seule période et est donc fort imprécise.

On commencera par enregistrer le signal à étudier. Pour cela deux méthodes sont possibles :

– ou bien appuyer sur "RUN" (le signal s'inscrit sur l'écran) puis appuyer sur "STOP" (le signal est figé).

– ou bien, méthode à utiliser de préférence, appuyer sur "MODE" et, dans le menu affiché, sélectionner "SINGLE". Alors, quand on appuie sur "RUN", le signal qu'on souhaite étudier s'inscrit sur toute la largeur de l'écran et se fixe. (Le "STOP" est automatique).

Dans le cas où, le mode "SINGLE" étant sélectionné, on n'obtient aucun signal, attendre le passage de la cible dans le champ du radar et appuyer sur "autoscale". Le réglage de l'échelle des tensions se fait automatiquement mais il faut régler manuellement l'échelle des temps.

Le signal étant affiché, appuyer sur "CURSORS". On voit apparaître deux traits verticaux  $t_1$  et  $t_2$  dont on peut faire varier la position (après les avoir sélectionnés sur le menu) à l'aide du bouton situé en-dessous de la clé "CURSORS". Placer le curseur  $t_1$  en coïncidence avec le maximum de la première oscillation et le curseur  $t_2$  en coïncidence avec le maximum de la dernière oscillation visible sur l'écran. L'écart de temps  $\Delta t$  entre les deux curseurs s'affiche en millisecondes. Il suffit de connaître le nombre de périodes entre les deux curseurs pour calculer la fréquence du signal. Pour faire cette mesure, faire une copie d'écran à l'aide de la clé "PRINT".

## **Annexe : historique du radar**

Le mot **radar** est le sigle de l'expression américaine RAdio Detection And Ranging, c'est à dire détection par radio et mesure de la distance. Jusqu'à la moitié des années 40 les Anglais utilisaient le terme de *radiolocation* et les Français celui de *détection électromagnétique* (DEM). En 1886, Heinrich Hertz démontra la similitude entre ondes lumineuses et ondes «radio», toutes deux électromagnétiques. Leur différence essentielle est que la longueur d'onde de ces dernières est beaucoup plus grande que celle des ondes lumineuses. Hertz montra que les ondes «radio» pouvaient, elles aussi, être réfléchies par les corps métalliques et diélectriques. Dès 1904, l'Allemand Christian Hülsmeyer décrivait un «appareil de projection et de réception d'ondes hertziennes pour donner l'alarme en présence d'un corps métallique tel qu'un navire ou un train situé dans le faisceau du projecteur». Cette possibilité était vérifiée expérimentalement de façon plus ou moins complète de 1922 à 1927 par un certain nombre de chercheurs. En juin 1930, l'Américain L. A. Hyland obtint une détection accidentelle d'un avion passant dans un faisceau d'ondes «radio» de 9 mètres de longueur d'onde. Dès lors, le Naval Research Laboratory (N.R.L.) expérimenta de 1930 à 1934 un premier système de «détection d'objets par radio» en ondes métriques (environ 5 m de longueur d'onde) permettant des détections d'avions distants de quelque 80 kilomètres.

Un radar est essentiellement constitué par un émetteur, une antenne et un récepteur muni d'un système de visualisation, ces deux éléments ne faisant la plupart du temps qu'un seul. L'émetteur lance à intervalles réguliers (par exemple, toutes les millisecondes) des signaux très brefs (par exemple, de 1 microseconde de durée), à une fréquence donnée (correspondant à une longueur d'onde variant, selon les applications, entre quelques mètres et quelques millimètres). Le signal n'est pas émis dans toutes les directions: l'antenne du radar, qui agit comme un projecteur, concentre l'émission dans une zone très étroite de l'espace, soit dans un cône de faible ouverture horizontale (de l'ordre de 1 degré), soit dans un cône de faible ouverture verticale (également de l'ordre de 1 degré). C'est ainsi que sont illuminées, d'autant plus faiblement qu'elles sont d'autant plus loin, les cibles situées dans le champ de l'antenne. Ces cibles réfléchissent les signaux reçus, et l'antenne capte les échos avec un décalage par rapport à l'émission, décalage d'autant plus grand que les cibles sont d'autant plus lointaines. Avec un radar classique, on atteint des portées de 500 kilomètres sur des avions militaires, et l'on utilise pour ce faire des antennes dont la surface peut atteindre 100 mètres carrés, associées à des émetteurs produisant des signaux dont la puissance atteint 20 mégawatts.

Pour plus de renseignements, consulter : [http://dept.navigation.enmm.free.fr/theorie\\_radar.swf](http://dept.navigation.enmm.free.fr/theorie_radar.swf)

### **Le radar en géologie :**

Utilisée depuis les années 90 en archéologie, la prospection géoradar de surface ou GPR (ground-probing radar ou ground penetrating radar) est, dans son principe, proche de la méthode de réflexion sismique. Un transmetteur (Tx) émet un signal qui pénètre dans le sol à étudier. Le signal réfléchi est détecté et enregistré par un receveur (Rx). Par contraste avec les méthodes sismiques, les instruments radar utilisent des ondes électromagnétiques au lieu d'ondes acoustiques. Les ondes EM ne pénètrent pas aussi profond que les ondes acoustiques mais donnent une mesure de plus haute résolution. Le radar détecte des cibles qui ont une impédance électrique contrastée par rapport au sol environnant. Les instruments radar de surface sont essentiellement utilisés pour les détections et localisations de cibles métalliques et non métalliques. La prospection géoradar de surface consiste à émettre dans le sol des impulsions électromagnétiques au travers d'une antenne émettrice et de mesurer l'intensité des ondes réfléchies par des obstacles dans le sol, au moyen d'une antenne réceptrice. Quand les ondes frappent la limite entre deux matériaux différents ou entre un matériau et le vide, elles sont renvoyées à un récepteur (antenne). Les résultats sont présentés sous forme d'une coupe transversale où la profondeur relative est estimée en temps aller-retour des ondes.

Extrait de <http://perso.wanadoo.fr/archeogeophy/html/gpr.htm>

**Altimétrie:** <http://www.educnet.education.fr/obter/applied/circula/theme/alti1.htm>