

III TP 3 : Intérférences à deux ondes dans le domaine hyperfréquence.

Introduction

Le but de ce TP est d'étudier le phénomène d'interférences dans le domaine des ondes hyperfréquences ². Il s'agit donc d'une étude en espace libre. La longueur d'onde des ondes hyperfréquences étudiées dans ce TP étant beaucoup plus grande que la longueur d'onde du domaine visible (de l'ordre de quelques cm contre le micromètre), la mise en évidence des interférences se fera plus facilement avec des hyperfréquences qu'avec des ondes optiques.

Nous allons dans un premier temps faire quelques rappels sur le phénomène d'interférences à deux ondes, puis nous décrirons le banc d'expérience. La partie expérimentale sera décrite dans un second temps.

III.1 Quelques rappels théoriques sur les interférences à 2 ondes.

Considérons deux ondes, caractérisées par leur champ électrique \vec{E}_1 et \vec{E}_2 . Notons $I(E_1)$ l'intensité associée à la première onde et $I(E_2)$ l'intensité associée à la seconde onde. Rappelons que l'intensité mesurée par un détecteur est proportionnelle à la valeur moyenne temporelle ³ du produit du champ par son conjugué :

$$I \propto \langle E \times E^* \rangle_t = \langle |E|^2 \rangle_t \quad (14)$$

On parle d'interférence lorsque l'intensité de la somme de deux ondes n'est pas égale à la somme des intensités des deux ondes :

$$I(E_1 + E_2) \neq I(E_1) + I(E_2) \quad (15)$$

Dans la plupart de nos expériences quotidiennes, l'intensité de la somme de deux sources lumineuses est égale à la somme des intensités des deux sources (vous pouvez faire le tests avec deux lampes de poche!). Nous allons voir sous quelles conditions ceci n'est plus vrai.

Considérons deux ondes monochromatiques d'amplitudes a_1 et a_2 . Le champ électrique peut se mettre sous la forme (en complexe), dans le cas général :

$$\begin{cases} E_1 &= a_1 e^{i(\omega_1 t + \phi_1(t))} \\ E_2 &= a_2 e^{i(\omega_2 t + \phi_2(t))} \end{cases}$$

Remarquons que le déphasage dépend du temps : chaque source émet un train d'onde à un instant aléatoire. L'émission de ces trains d'onde ne se fait pas en continu et n'est pas, dans le cas général, synchrone avec d'autres sources. Ces trains d'ondes ont une certaine longueur moyenne (appelée longueur de cohérence temporelle), caractéristique de la source. Le déphasage est donc lié à l'instant d'émission de la

²bien que les interférences aient été découvertes au début du XIX^{ème} siècle dans le domaine optique

³n'oublions pas l'ordre de grandeur des variations temporelles du champ électrique : la fréquence est de l'ordre de 10 GHz. Nous n'avons pas les moyens de suivre les variations temporelles du champ : les appareils de mesure ne donnent qu'une information sur la valeur moyenne du signal.

source (de manière aléatoire). L'amplitude complexe E résultante de la somme des deux champs est donc :

$$\underline{E} = E_1 + E_2 \quad (16)$$

$$= a_1 e^{i(\omega_1 t + \phi_1(t))} + a_2 e^{i(\omega_2 t + \phi_2(t))} \quad (17)$$

$$(18)$$

L'intensité associée vaut, à un facteur multiplicatif près : $I = \langle \underline{E} \underline{E}^* \rangle_t$. D'où :

$$I = a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2 \langle (e^{i(\omega_1 - \omega_2)t + i(\phi_1(t) - \phi_2(t))} + e^{-i(\omega_1 - \omega_2)t - i(\phi_1(t) - \phi_2(t))}) \rangle_t \quad (19)$$

$$= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \langle \cos((\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1(t) - \phi_2(t))) \rangle_t \quad (20)$$

$$(21)$$

Dans cette dernière équation, il faut effectuer une valeur moyenne temporelle d'un cosinus, dont l'argument dépend du temps. Si les pulsations sont différentes, cette valeur moyenne sera nulle. Il en résulte que $I = a_1^2 + a_2^2 = I_1 + I_2$: il n'y a pas d'interférences. Pour avoir des interférences, une première condition apparaît : il faut que les deux sources aient la même fréquence : $\omega_1 = \omega_2$.

L'intensité s'écrit alors :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos(\phi_1(t) - \phi_2(t)) \rangle_t \quad (22)$$

En outre, les déphasages dépendent également du temps. Si les deux sources sont décorréliées, le déphasage $\phi_1(t) - \phi_2(t)$ est aléatoire et la valeur moyenne du cosinus est nulle. Il en résulte que $I = I_1 + I_2$: dans ce cas encore, il n'y a pas d'interférences (ce qui existe dans la plupart des cas). Une deuxième condition apparaît : il faut que les déphasages entre les deux ondes soient corrélés. Le déphasage $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ est alors constant et ne dépend plus du temps. L'intensité s'écrit alors :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (23)$$

L'intensité globale diffère donc bien de la somme des deux intensités. Si ces deux conditions sont satisfaites, on dit que les sources sont **cohérentes** entre elles. En pratique, pour avoir deux sources cohérentes, on dédouble une unique source, à l'aide de dispositifs interférentiels. Nous allons étudier dans ce TP trois exemples de dispositifs.

En outre, on montre que le déphasage peut s'écrire :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta \quad (24)$$

où δ est la différence de marche, c'est à dire la différence de distance que parcourent les deux rayons dans le milieu considéré, en tenant compte de l'indice du milieu ⁴.

³n'oublions pas que les amplitudes des champs se somment mais pas leurs intensités.

⁴dans le cas d'interférences dans l'air ou le vide, la différence de marche correspond à la différence de distance parcourue par les deux rayons depuis la source unique. Dans le cas d'une propagation dans un milieu d'indice n , la différence de marche correspond à la différence de distance parcourue multipliée par l'indice.

III.2 Présentation du matériel

Schéma global. Les figures 5 et 6 représentent le banc d'expérience.

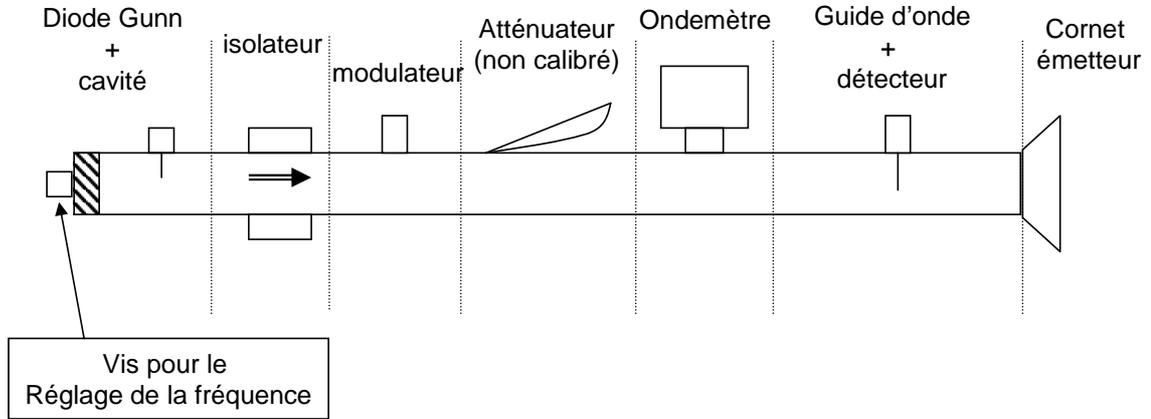


FIG. 5 – Schéma de la partie émission.

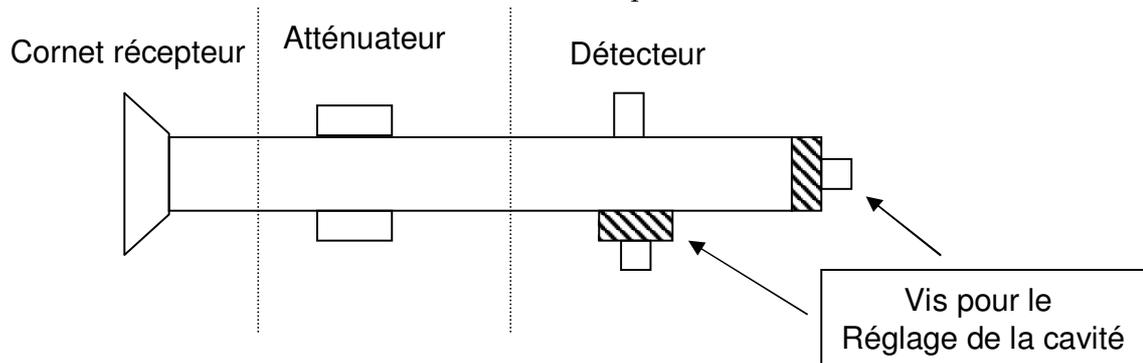


FIG. 6 – Schéma de la partie de réception.

Génération de l'onde L'onde hyperfréquence est générée grâce à une diode Gunn placée dans une cavité. Une diode Gunn est un semiconducteur qui, lorsqu'il est soumis à un champ, oscille dans le domaine des hyperfréquences⁵. Une telle diode émet des hyperfréquences sur une plage assez large (typiquement quelques GHz). Lorsqu'on la place dans une cavité, la fréquence de résonance de l'onde ainsi obtenue est accordée à la fréquence de la cavité (la cavité joue alors le rôle de filtre). Une vis micrométrique permet de modifier la longueur de la cavité et donc la fréquence générée par ce dispositif. Une lecture de la position de la vis permet d'obtenir, en utilisant l'abaque fourni avec le banc⁶, une valeur approximative de la fréquence émise.

⁵une diode gunn n'a pas la structure d'une diode. Il s'agit en fait d'un semiconducteur massif, généralement de l'AsGa, dans lequel on exploite des effets de résistance dynamique négative sous champ (effet Gunn). La fréquence centrale d'oscillation est fonction de la longueur de ce semiconducteur.

⁶si elle existe!

isolateur Le rôle de l'isolateur est d'empêcher le retour des ondes électromagnétiques réfléchies par la chaîne d'émission située en aval afin de protéger la diode Gunn d'un tel rayonnement et de ne pas perturber cette cavité.

le modulateur On insère un modulateur pour permettre de trouver plus facilement le signal au niveau de la détection. Le modulateur permet de rajouter une modulation en créneaux sur le signal précédent. Cette modulation d'amplitude est aux alentours de 1 kHz, donc basse fréquence. Côté réception, on peut retrouver ce signal basse fréquence : on aura ainsi prouvé expérimentalement la possibilité de transport d'information (ici du signal créneau) à l'aide d'ondes hyperfréquences. Les applications concernent bien sûr les communications sans fils (téléphone DECT, téléphone portable, réseau WIFI etc ...).

Deux modes de fonctionnement existent pour ce modulateur :

† le premier mode correspond à l'émission d'un signal hyperfréquence pur, d'amplitude constante, appelé "HF pur". On ne peut pas voir les variations du signal à l'oscilloscope (la bande passante de l'oscilloscope est bien plus faible que la fréquence de l'onde hyperfréquence). On ne voit donc qu'un signal constant correspondant à la puissance moyenne de l'onde. Ce mode est aussi appelé modulation atténuée. C'est le mode de fonctionnement qu'il faut utiliser pour ce TP.

† le second mode correspond à l'émission d'un signal dont l'amplitude est modulée en créneaux à une fréquence basse, afin d'être visible à l'oscilloscope. Ce mode n'est à utiliser que pour "trouver" le signal sur l'oscilloscope.

L'atténuateur non calibré. Il est constitué d'une lame diélectrique que l'on enfonce manuellement dans le guide d'onde. Il permet d'atténuer l'onde en sortie du guide. Il n'y a aucun moyen de connaître le facteur d'atténuation. Aussi, on utilise peu cet atténuateur.

l'ondemètre Il permet de déterminer la fréquence de l'onde émise, avec plus de précision que la mesure effectuée grâce à la vis micrométrique. Il s'agit également d'une cavité cylindrique munie d'une paroi mobile. A l'aide de la vis micrométrique on peut modifier la position de la paroi et ainsi ajuster la longueur de la cavité. Pour une certaine longueur de la cavité, elle peut devenir résonante, absorbant une partie du signal émis. Une chute de puissance émise est alors observée (de l'ordre de 5 à 10 %) à la sortie du guide d'onde et une augmentation de la puissance est constatée dans l'ondemètre. Un compteur (mécanique!) permet de lire la fréquence correspondant à la position de la vis. Ce dispositif ne modifie pas la fréquence d'émission. Une fois la fréquence déterminée, il faut dérégler l'ondemètre afin qu'il n'absorbe pas de rayonnement.

guide d'onde rectangulaire Entre le cornet émetteur et l'ondemètre, il y a un guide d'onde rectangulaire. Selon le banc utilisé, une antenne est placée à l'intérieur de ce guide d'onde. On ne se servira pas de cette antenne pendant le TP.

le cornet émetteur Si le guide était simplement coupé et ouvert à son extrémité, une importante partie de l'énergie serait réfléchi vers l'intérieur en raison d'une mauvaise adaptation d'impédance entre le guide d'onde et l'atmosphère. En électronique haute fréquence, pour des fréquences inférieures au GHz, le même phénomène de réflexion se produit au bout des lignes filaires (coaxiales par exemple). En électronique, il est courant de placer des circuits d'adaptation d'impédance. Ici, l'adaptation d'impédance se réalise grâce au cornet d'émission (et de réception). L'onde sort du cornet polarisée rectilignement dans la direction orthogonale au grand côté du cornet.

le cornet récepteur Il joue le même rôle que le cornet émetteur (adaptation d'impédance). En outre, il est aussi sensible à la polarisation de l'onde.

le détecteur Le détecteur est un cristal placé au centre du guide d'onde. Il est sensible aux faibles amplitudes du champ électrique. La tension disponible à ses bornes est proportionnelle à la puissance de l'onde, c'est à dire au carré du champ électrique. La cavité est fermée et la paroi est mobile. Des ondes stationnaires s'établissent ainsi dans la cavité. En déplaçant la vis de la paroi, on peut modifier l'onde dans la cavité et placer un ventre au niveau du détecteur afin d'optimiser la détection. La tension peut être lue directement à l'oscilloscope ou à l'aide d'un voltmètre.

Attention : le détecteur ne fournit une tension proportionnelle au carré du champ que pour des faibles amplitudes. Pour des tensions supérieures à 25 mV, la tension n'est plus proportionnelle à la puissance. Il faudra bien veiller à rester en dessous de 25 mV (tension lue à l'oscilloscope). C'est la raison pour laquelle on a placé un atténuateur en amont du détecteur.

Remarque : le facteur de proportionnalité entre la puissance électromagnétique au niveau du détecteur et la tension fournie par le détecteur n'est pas connu. Seule une variation relative de puissance pourra être déduite.

l'atténuateur calibré Il est constitué d'une lame diélectrique (absorbante dans le domaine des hyperfréquences) que l'on introduit plus ou moins dans le guide d'onde. L'enfoncement de la lame est commandé par une vis micrométrique graduée. Un abaque (et une table) permettent de convertir la lecture de l'enfoncement en atténuation, exprimée en dB. Grâce à cet atténuateur, on peut travailler à signal constant (inférieur à 25 mV) sur l'oscilloscope et être sûr de rester dans la plage de linéarité du détecteur. Une variation de puissance est alors déduite de la variation de l'atténuation qu'il faut effectuer pour retrouver le signal précédent sur l'oscilloscope. Méthode pratique d'utilisation de l'atténuateur à puissance constante. Notons P et P_0 les puissances à l'entrée et à la sortie de l'atténuateur. Ce dernier donne une atténuation en décibel (dB) :

$$Att \text{ |}_{dB} = 10 \log(P/P_0) \quad (25)$$

Ne pouvant pas connaître la valeur de P_0 , on cherchera à se référencer par rapport à cette puissance (qui correspond à une tension V_0 du détecteur). Cette relation permet

d'exprimer la puissance en entrée en fonction de P_0 et de la valeur de l'atténuation Att . Si la valeur de la puissance change en entrée (suite à une modification de la manip), les valeurs des puissances précédentes changent aussi (et deviennent P' et P'_0), ainsi que la tension lue aux bornes du détecteur (V'_0). On a la relation suivante : $Att = 10 \log(P'/P'_0)$. La technique consiste à modifier l'atténuation pour retrouver la valeur précédente de la puissance en sortie (ie retrouver la tension V_0 précédente) : $Att' = 10 \log(P'/P_0)$. Cette relation nous permet d'en déduire P' en fonction de P_0 et de Att' . Comme on a la même puissance de sortie, on peut donc comparer les deux puissances P et P' .

Autre méthode : lecture directe.

Une autre méthode, beaucoup moins précise, consiste à trouver une atténuation permettant d'avoir une tension maximale de 25 mV pour toute la manipulation. On lit ensuite les variations de puissance en relevant directement la tension aux bornes du détecteur. Cette méthode n'est pas conseillée pour un tracé précis et est d'autant plus imprécise que les variations de puissances sont grandes.

III.3 Etude des dispositifs interférentiels.

A l'aide de l'ondemètre et de la vis de réglage de la cavité mesurez la fréquence de l'onde émise par le banc émetteur.

Dispositif des miroirs de Lloyd.

Etude du dispositif Considérons le dispositif interférentiel de la figure 7. Il est constitué d'une source (partie émettrice), d'un récepteur (partie réceptrice) et d'un miroir. Le miroir utilisé sera la plaque métallique pleine. Les ondes hyperfréquences sont en effet totalement réfléchies (en première approximation) par une plaque métallique.

On a donc deux trajets distincts : une trajectoire directe et une autre avec réflexion

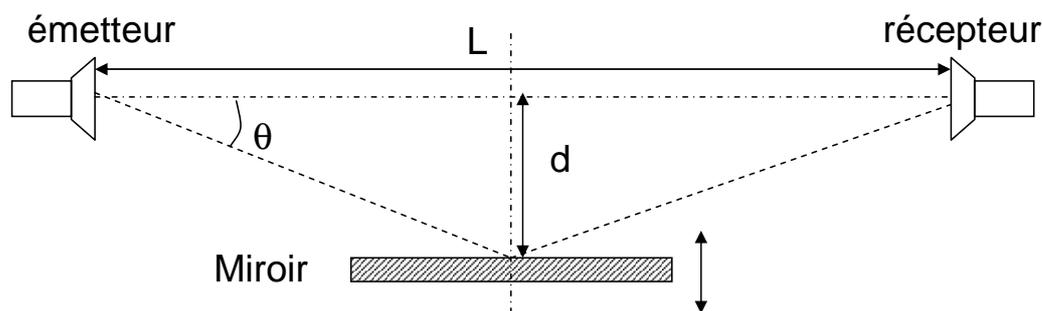


FIG. 7 – Schéma de l'expérience des miroirs de Lloyd.

sur le miroir. Ces deux "rayons" permettent de dédoubler la source.

Faites figurer sur le schéma précédent la source fictive.

Le déplacement du miroir modifie le trajet du rayon indirect : on modifie donc la différence de chemin optique. La valeur de la puissance recueillie au niveau du récepteur (correspondant aux interférences) est donc modifiée.

Nous allons déterminer la différence de chemin optique entre les trajets en fonction de la distance d du miroir à l'axe émetteur-récepteur.

Notons e_d (resp. e_i) la distance parcourue par le rayon suivant le trajet direct (resp. suivant le trajet indirect).

1. Donner les expressions de e_d et e_i en fonction de d et L .
2. En supposant $d \ll L$, donner une expression approchée de e_i . En déduire la différence $\delta = e_i - e_d$.
3. Donner l'expression de la puissance reçue au niveau du récepteur. Tracer cette puissance en fonction de d^2 .
4. Discuter de la pertinence de ce modèle et des conditions de validité.
5. Quel autre paramètre pourrait-on faire varier pour mettre en évidence ces interférences ?

Manipulation Réalisez le dispositif et modifiez l'atténuateur afin d'avoir un signal maximal de 25 mV quelle que soit la position du miroir. Sans changer l'atténuateur, observez les variations éventuelles de la puissance lorsque vous déplacez le miroir perpendiculairement à l'axe émetteur-récepteur. Mettez en évidence le phénomène d'interférences.

Tracer la courbe de la puissance en fonction de la distance d^2 . Conclusions ?

Interféromètre de Michelson

Etude du dispositif La figure 8 représente l'interféromètre de Michelson. La lame séparatrice a pour rôle de laisser passer 50 % de l'onde incidente et de réfléchir 50 %. On utilisera la grille à fils verticaux comme séparatrice. On note d la distance du miroir fixe à la séparatrice. Lorsque le miroir mobile est à la distance d de la séparatrice, les trajets suivis par les deux rayons sont identiques : on n'a pas d'interférences.

On suppose que le miroir est situé à une distance $d_1 \neq d$.

1. Représentez sur un schéma les trajets des rayons, sous incidence normale.
2. Justifiez alors l'existence d'interférences.
3. Que vaut la différence de marche en fonction de l'écart $e = d_1 - d$ du miroir mobile par rapport à sa position d'équilibre ? En déduire la différence de phase correspondante.
4. Donner l'expression de la puissance reçue au niveau du récepteur, en fonction de la distance e .
5. Tracer cette puissance en fonction de e .

Manipulation Réalisez le dispositif. Observez les interférences en translatant le miroir mobile. Tracer la puissance reçue en fonction de l'éloignement du miroir (on ne tracera que quelques périodes). Qu'observez-vous ?

Nous allons essayer de retrouver la fréquence d'émission de l'onde ainsi que la longueur d'onde associée.

Placez vous sur un maximum. Donner la valeur du déphasage $\Delta\phi_1$ (modulo 2π)

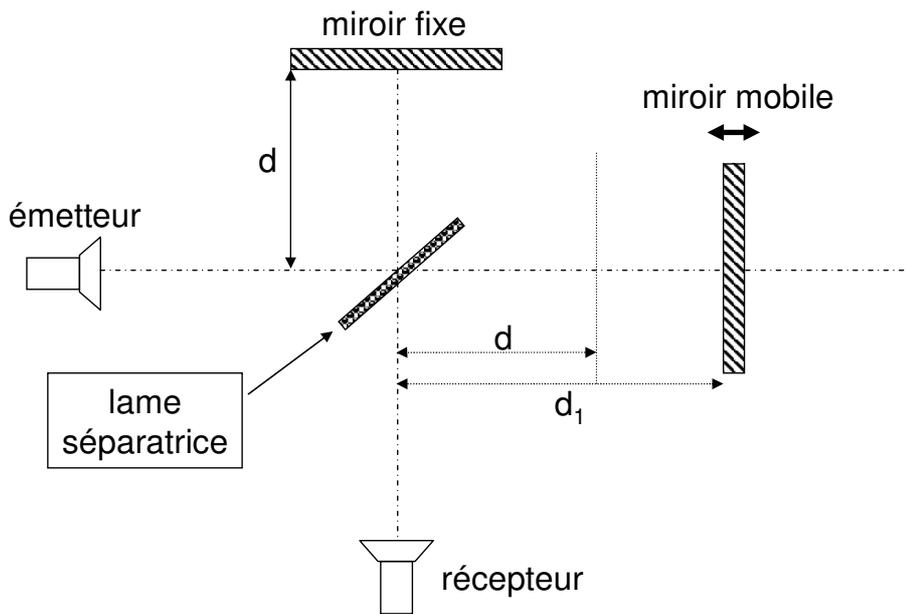


FIG. 8 – Schéma de l'interféromètre de Michelson.

associé à ce maximum ? Repérer la distance du miroir par rapport à la séparatrice. Soit d_1 cette distance. Le miroir est donc situé à la distance $e_1 = d_1 - d$ de la position ne donnant pas lieu à des interférences (position caractérisée par une différence de phase nulle). Exprimer alors ce déphasage en fonction de e_1 puis en fonction de d_1 . Placez-vous au maximum suivant. Donner la nouvelle valeur du déphasage $\Delta\phi_2$ (modulo 2π) ? Exprimer de la même manière ce déphasage en fonction de la distance $e_2 = d_2 - d$ où d_2 est la distance séparant le miroir mobile de la séparatrice. Que vaut la différence $\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1$? Exprimer cette différence en fonction de la différence $e_2 - e_1$?

En déduire une estimation de la fréquence et de la longueur d'onde. Commentez cette valeur. Déterminer l'incertitude associée à ces mesures.

Proposez une amélioration de cette méthode pour avoir une meilleure estimation.

Interféromètre de Mach-Zender

La figure 9 présente l'interféromètre de Mach-Zender, dispositif qui est largement utilisé dans les télécommunications.

1. Justifiez rapidement l'existence d'interférences. Comment peut-on les mettre en évidence ?
2. Réalisez le montage de la figure 9 et mettez en évidence les interférences.

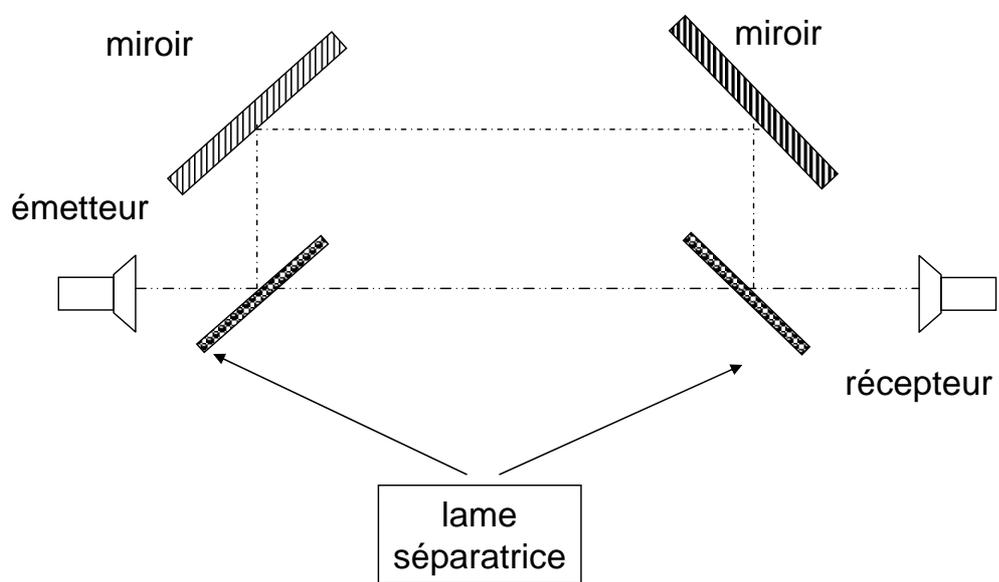


FIG. 9 – Schéma de l'interféromètre de Mach-Zehnder