TP Ondes centimétriques

But : Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques. Détecter une onde électromagnétique rayonnée.

I. Transmission et absorption des micro-ondes par différents matériaux

1 - Utilisation du matériel

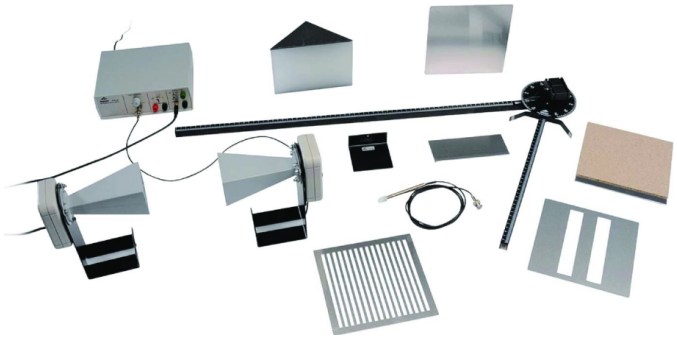


FIGURE 1 – Matériel didactique

L'émetteur utilisé (à gauche) a la particularité d'émettre une onde électromagnétique monochromatique, polarisée rectilignement, et dont la longueur d'onde vaut quelques centimètres. Le récepteur recueille à ses bornes une tension continue proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique : cette tension est donc proportionnelle à la valeur moyenne de la densité d'énergie transportée par l'onde. La tension prélevée aux bornes du récepteur est amplifiée avant d'être mesurée par un multimètre.

2 - Isolant ou conducteur électrique

L'absorption et la réflexion d'ondes électromagnétiques sur un matériau permet d'obtenir des informations importantes sur les propriétés de ce dernier. On se propose dans cette partie d'observer l'absorption des ondes électromagnétiques par différents matériaux.

Expérience 1

- ✔ Placer émetteur et récepteur en regard et s'assurer d'obtenir un signal de forte amplitude mais sans saturation en réglant l'amplification.
- ✔ Interposer entre l'émetteur et le récepteur, successivement, une plaque de polystyrène, une plaque de bois et une plaque métallique.

À rédiger

☐ **Q 1 -** Écrire l'équation de propagation dans un milieu sans propriété magnétique, de permittivité complexe $\underline{\varepsilon}$ en l'absence de charge et courant.

☐ **Q 2 -** Établir la relation de dispersion en supposant la propagation d'une onde plane progressive monochromatique sous la forme $\underline{\vec{E}}(x,t) = \underline{E}_0 e^{i(\omega t - \underline{k}x)}\,\vec{e}_y$.

☐ **Q 3 -** Dans le cas où $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ est un réel positif, déterminer l'indice du milieu matériel.

☐ **Q 4 -** Dans le cas où $\varepsilon = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + i\varepsilon_r'')$, exprimer deux équations reliant les composantes réelle et complexe de $\underline{k} = k' - ik''$.

☐ **Q 5 -** Si le vecteur d'onde possède une partie imaginaire, justifier que l'onde est atténuée en explicitant $\underline{\vec{E}}(x,t)$.

Appel Professeur, à l'oral

Est-ce que le corps humain absorbe les ondes électromagnétiques émises par ce dispositif ? Le corps humain est il associé à une permettivité complexe ou réel ?

J.B

II. Caractéristiques de l'onde électromagnétique

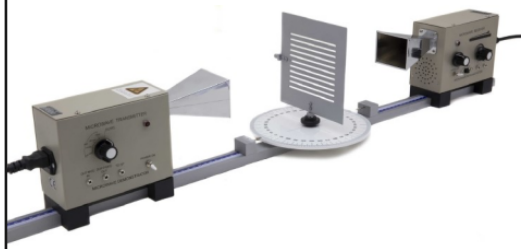
Appel Professeur, à l'oral

Proposer un protocole permettant d'établir une onde stationnaire à l'aide de la plaque métallique et de l'antenne puis de mesurer la longueur d'onde.

1 - Polarisation

Expérience 2

- ✔ Intercaler entre l'émetteur et le récepteur la grille métallique.
- ✔ Observer le signal reçu suivant que les fils métalliques sont horizontaux ou verticaux.



À rédiger

☐ **Q 6 -** Effectuer un schéma modèle de l'experience.

☐ **Q 7 -** Proposer une expression pour le champ électrique $\vec{E}(M,t)$.

☐ **Q 8 -** En déduire l'expression du champ magnétique associé $\vec{B}(M,t)$.

2 - Mesure de la longueur d'onde

Nous disposons de deux récepteurs différents :

- un récepteur placé à la suite d'un système cornet récepteur-guide d'onde à section rectangulaire
- une antenne, placée dans un tube ; son allure est représentée ci-dessus à droite.

À rédiger

☐ **Q 9 -** Réaliser un schéma du montage.

☐ **Q 10 -** Mesurer la longueur d'onde des ondes électromagnétiques le plus précisément possible.

☐ **Q 11 -** Estimer, en la justifiant, l'incertitude sur la longueur d'onde notée $u(\lambda)$.

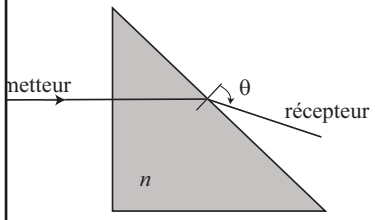
☐ **Q 12 -** En déduire la fréquence des ondes électromagnétiques émises par le dispositif. À quelle gamme du spectre correspondent elles ?

III. Propriétés diélectriques de matériaux

1 - Mesure de l'indice de réfraction de la paraffine

Expérience 3

- ✔ Placer un prisme sur la partie centrale du banc de mesure.
- ✔ Orienter le prisme de façon à être en incidence normale par rapport à l'émetteur.
- ✔ Mesurer l'angle θ du récepteur pour lequel on obtient un signal maximal.



À rédiger

☐ **Q 13 -** Justifier que l'angle θ est supérieur à 45°.

☐ **Q 14 -** Montrer que l'indice du prisme vérifie : $n = \sqrt{2}\sin\theta$.

☐ **Q 15 -** En déduire l'indice n de la paraffine accompagnée de son incertitude.

2 - Coefficient d'absorption

L'absorption et la transmission des micro-ondes donnent d'importantes informations qualitatives concernant les propriétés physiques des substances qui interagissent avec l'onde électromagnétique. Lorsque l'onde traverse une couche d'épaisseur x, on observe que l'intensité de la radiation émise diminue : $\mathrm{I}(x) = \mathrm{I}_0 e^{(} - \alpha x)$, où α est le coefficient d'absorption du matériau à la fréquence considérée

Expérience 4

- ✔ Introduire la cuve sur son support comme indiqué ci-dessous.
- ✔ Décrire un protocole pour mesurer la valeur de α en s'aidant d'un schéma légendé.
- ✔ Mesurer α.

À rédiger

Votre valeur est-elle compatible avec le document ci-contre répertoriant l'atténuation d'une onde électromagnétique en dB pour différentes fréquences et température ?

Rappel : l'atténuation pour une mesure de puissance est donnée par :

$$\mathrm{A}_{d\mathrm{B}} = 10\log_{10}\frac{\mathcal{P}_{ref}}{\mathcal{P}_{transmise}}$$

où $\mathcal{P}_{transmise}$ est la puissance mesurée aprèrs propagation dans le milieu absorbant et $\mathcal{P}_{ref}$ est la puissance de référence idéalement reçue en l'absence de matériau absorbant.

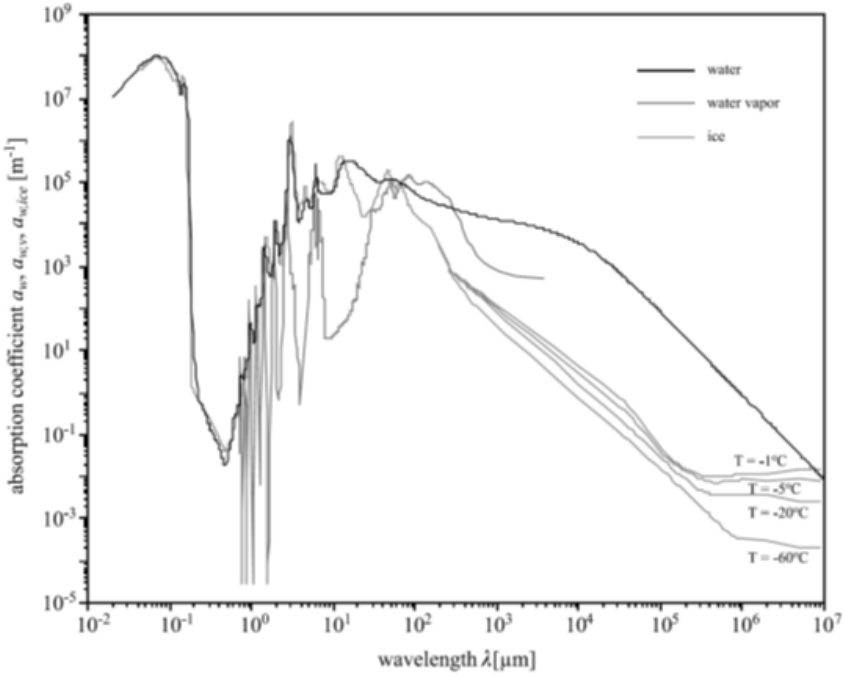


FIGURE 2 – Light Absorption by water (Wozniak B. ; Dera J. (2007). Atmospheric and Oceanographic Sciences Library)

Exercice 1

On se place dans l'espace rapporté à un repère cartésien (O, $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$, $\vec{e}_z$). Une onde plane progressive monochromatique à polarisation rectiligne de pulsation ω et de vecteur d'onde $\vec{k}$ se propage dans le vide dans la direction (Ox), dans le sens des x croissants :

$$\vec{\mathrm{E}}_i(x,t) = \mathrm{E}_0 \cos(\omega t - kx)\, \vec{e}_y$$

avec E_0 constant.

En $x = 0$, elle arrive sur la surface plane d'un miroir métallique parfaitement conducteur (on admet que dans un tel conducteur, les champs $\vec{\mathrm{E}}$ et $\vec{\mathrm{B}}$ sont nuls) et donne naissance à une onde réfléchie se propageant dans la direction $(-\mathrm{O}x)$:

$$\vec{\mathrm{E}}_r(x,t) = \vec{\mathrm{E}}_{0r} \cos(\omega t + kx)$$

☐ **Q 1 -** Un conducteur parfait est assimilé à un métal de conductivité infini. En vous aidant de la puissance volumique cédée aux porteurs de charge et de la loi d'Ohm locale, montrer que le champ électromagnétique est nul dans un conducteur parfait.

☐ **Q 2 -** Écrire les conditions aux limites que doivent vérifier les champs $\vec{\mathrm{E}}$ et $\vec{\mathrm{B}}$ sur le plan d'équation $x = 0$ qui limite l'espace entre le vide et le miroir métallique en précisant bien la signification de tous les termes intervenant dans les équations.

☐ **Q 3 -** Montrer que le champ électrique réfléchi est lui aussi polarisé suivant l'axe Oy et établir l'expression du vecteur $\vec{\mathrm{E}}_{0r}$ en fonction de $\vec{\mathrm{E}}_0$ et d'un vecteur unitaire que l'on précisera.

☐ **Q 4 -** Déterminer les expressions en fonction du temps du champ magnétique incident $\vec{\mathrm{B}}_i$ et du champ magnétique réfléchi $\vec{\mathrm{B}}_r$

☐ **Q 5 -** Déterminer le champ électrique $\vec{\mathrm{E}}$ et le champ magnétique $\vec{\mathrm{B}}$ du champ électromagnétique résultant de l'onde incidente et de l'onde réfléchie dans le demi-espace $x < 0$. Caractériser l'onde résultante.

☐ **Q 6 -** Déterminer l'expression du vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$ de l'onde résultante ainsi que sa valeur moyenne $< \vec{\Pi} >$ au cours d'une période $\mathrm{T} = 2\pi/\omega$. Commenter.

Données : $\cos a + \cos b = 2\cos\dfrac{a+b}{2}\cos\dfrac{a-b}{2}$, $\cos a - \cos b = 2\sin\dfrac{a+b}{2}\sin\dfrac{b-a}{2}$

Exercice 2

On se place dans l'espace rapporté à un repère cartésien (O, $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$, $\vec{e}_z$). Une onde plane progressive monochromatique à polarisation rectiligne de pulsation ω et de vecteur d'onde $\vec{k}$ se propage dans le vide dans la direction (Ox), dans le sens des x croissants :

$$\vec{\mathrm{E}}_i(x,t) = \mathrm{E}_0 \cos(\omega t - kx)\, \vec{e}_y$$

avec E_0 constant.

En $x = 0$, elle arrive sur la surface plane d'un miroir métallique parfaitement conducteur (on admet que dans un tel conducteur, les champs $\vec{\mathrm{E}}$ et $\vec{\mathrm{B}}$ sont nuls) et donne naissance à une onde réfléchie se propageant dans la direction $(-\mathrm{O}x)$:

$$\vec{\mathrm{E}}_r(x,t) = \vec{\mathrm{E}}_{0r} \cos(\omega t + kx)$$

☐ **Q 1 -** Un conducteur parfait est assimilé à un métal de conductivité infini. En vous aidant de la puissance volumique cédée aux porteurs de charge et de la loi d'Ohm locale, montrer que le champ électromagnétique est nul dans un conducteur parfait.

☐ **Q 2 -** Écrire les conditions aux limites que doivent vérifier les champs $\vec{\mathrm{E}}$ et $\vec{\mathrm{B}}$ sur le plan d'équation $x = 0$ qui limite l'espace entre le vide et le miroir métallique en précisant bien la signification de tous les termes intervenant dans les équations.

☐ **Q 3 -** Montrer que le champ électrique réfléchi est lui aussi polarisé suivant l'axe Oy et établir l'expression du vecteur $\vec{\mathrm{E}}_{0r}$ en fonction de $\vec{\mathrm{E}}_0$ et d'un vecteur unitaire que l'on précisera.

☐ **Q 4 -** Déterminer les expressions en fonction du temps du champ magnétique incident $\vec{\mathrm{B}}_i$ et du champ magnétique réfléchi $\vec{\mathrm{B}}_r$

☐ **Q 5 -** Déterminer le champ électrique $\vec{\mathrm{E}}$ et le champ magnétique $\vec{\mathrm{B}}$ du champ électromagnétique résultant de l'onde incidente et de l'onde réfléchie dans le demi-espace $x < 0$. Caractériser l'onde résultante.

☐ **Q 6 -** Déterminer l'expression du vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$ de l'onde résultante ainsi que sa valeur moyenne $< \vec{\Pi} >$ au cours d'une période $\mathrm{T} = 2\pi/\omega$. Commenter.

Données : $\cos a + \cos b = 2\cos\dfrac{a+b}{2}\cos\dfrac{a-b}{2}$, $\cos a - \cos b = 2\sin\dfrac{a+b}{2}\sin\dfrac{b-a}{2}$

J.B