

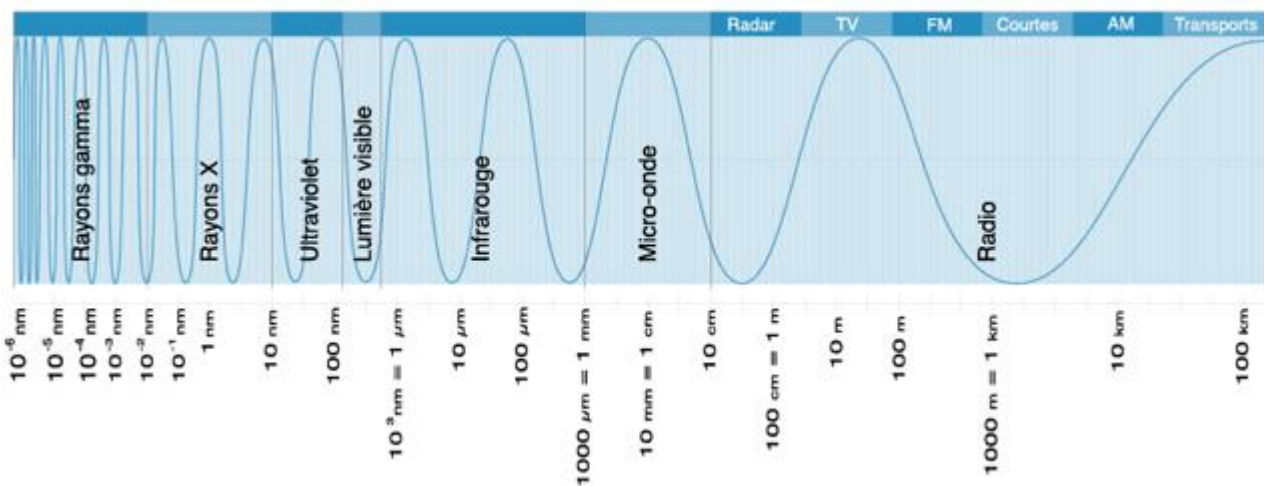
# TP EM1 : ONDES ELECTROMAGNETIQUES CENTIMETRIQUES

## Capacités exigibles :

- Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques : mettre en œuvre un détecteur dans le domaine des ondes centimétriques.
- Mettre en évidence une polarisation rectiligne : identifier, à l'aide d'un polariseur, une onde polarisée rectilignement et déterminer sa direction de polarisation.

## Généralités sur les micro-ondes :

Les ondes centimétriques (ou micro-ondes) sont des radiations électromagnétiques ayant une longueur d'onde comprise entre 1 mm et 10 cm. Elles sont donc comprises entre l'infrarouge et les ondes radio.



Lorsqu'elles traversent un matériau, elles génèrent des oscillations des ions de petite amplitude dont le mouvement provoque le réchauffement du matériau par frottement. On peut évidemment citer comme application le « four à micro-ondes », mais il y a également des applications en médecine (on peut réchauffer des zones limitées du corps humain pour soigner des arthrites, des déchirements musculaires, des dommages traumatiques en général).

## Production des micro-ondes :

Les micro-ondes peuvent être produites de diverses façons, que l'on peut classer en deux catégories :

- Les dispositifs à état solide : ils sont basés sur des semi-conducteurs et des transistors ou des diodes.
- Les tubes à vide : ils sont basés sur le mouvement balistique des électrons dans le vide sous l'influence de champs électriques ou magnétiques de contrôle (magnétron, klystron, gyrotron, ...).

## Exposition aux micro-ondes :

Même si les micro-ondes sont largement utilisées depuis la moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, leur dangerosité est encore discutée. Ici, même si les ondes émises ne sont pas très intenses (de l'ordre de 10 mW), **on évitera de regarder dans l'antenne émettrice, ceci pourrait provoquer des lésions aux yeux. L'antenne émettrice ne restera pas pointée contre un individu pendant un long moment.**

### Matériel utilisé :

Au laboratoire, nous disposons de deux kits différents. Il est donc nécessaire de se référer aux notices qui sont fournies pour plus de précision, notamment pour effectuer les branchements. Pour les deux kits, on dispose :

- D'un émetteur de micro-ondes avec cornet : fréquence  $f = 9,4 \text{ GHz}$  (ou  $11 \text{ GHz}$  selon le modèle), soit une longueur d'onde  $\lambda = 3,2 \text{ cm}$  (ou  $\lambda = 2,7 \text{ cm}$  selon le modèle) (on rappelle que la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide, ou dans l'air assimilé au vide, vaut  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ).  
Le signal peut aussi être modulé par un signal de fréquence acoustique. On préférera travailler si possible sans modulation (avec l'émetteur pour lequel c'est possible), ou bien avec le mode « monotone 1 kHz » (avec l'émetteur pour lequel il y a obligatoirement une modulation), notamment quand on souhaite effectuer une mesure du signal grâce à un voltmètre ou un oscilloscope.
- D'un récepteur de micro-ondes : il permet de capter les micro-ondes. Pour les deux kits, on dispose :
  - d'un récepteur avec cornet.
  - d'une sonde à micro-ondes (antenne à dipôle). **Regarder la notice pour effectuer les branchements et pour savoir comment orienter l'antenne.**

Si le signal envoyé est modulé, une démodulation du signal est effectuée, et on peut obtenir l'onde acoustique. Plus l'intensité du signal récupéré est élevée, plus les ondes captées sont intenses.

On peut effectuer des mesures sur le signal électrique récupéré grâce à un voltmètre ou un oscilloscope. **Attention, la tension de sortie est susceptible de saturer, ce qu'il faudra absolument éviter si on veut effectuer des mesures au voltmètre ou à l'oscilloscope. Pour éviter que la tension sature, il ne faut pas que le gain soit trop important.**

### Prise en main expérimentale :

- Positionner l'émetteur et le récepteur face à face à une distance de 40 cm environ.
- Mettre en place une modulation au niveau de l'émetteur dans l'une des options présentes (« INT », « monotone 1 kHz », « diphone » ou « music »).
- Régler le bouton du gain à la valeur maximale. Le haut-parleur émet un signal acoustique selon le mode configuré.
- Abaisser le gain et vérifier que l'intensité du signal acoustique diminue.
- Déplacer le récepteur latéralement et constater que l'intensité du signal acoustique diminue : les micro-ondes se propagent rectilignement.
- Utilisation de l'antenne de dipôle : se référer à la notice. Sur l'un des dispositifs, il faut relier l'antenne au récepteur à cornet. Pour l'autre dispositif, il faut relier l'antenne au boîtier électronique.
- Mesurer l'intensité du signal reçu, grâce à un voltmètre ou un oscilloscope.

### But du TP :

Le but de ce TP est de réaliser diverses expériences sur les micro-ondes et de montrer que les micro-ondes ont les mêmes caractéristiques que les ondes lumineuses et donnent lieu aux mêmes phénomènes (dans les deux cas, ce sont des ondes électromagnétiques !). On s'intéressera donc :

- à la transmission et l'absorption des micro-ondes par différents matériaux.
- à la polarisation des ondes électromagnétiques.
- à l'étude d'une onde stationnaire.
- à l'amplitude de l'onde émise.
- aux phénomènes de réflexion, de réfraction, de diffraction, d'interférences.

# I) Transmission et absorption des micro-ondes :

## 1) Rappels théoriques :

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 :  $I = I_0 \exp(-\alpha x)$ , où  $\alpha$  est le coefficient d'absorption du matériau à la fréquence considérée.

Si  $\alpha = 0$ , alors le matériau n'absorbe pas à la fréquence considérée, le matériau est dit transparent, et l'onde est entièrement transmise. Bien sûr, un même matériau peut être transparent pour certaines valeurs de fréquence et absorbant pour d'autres.

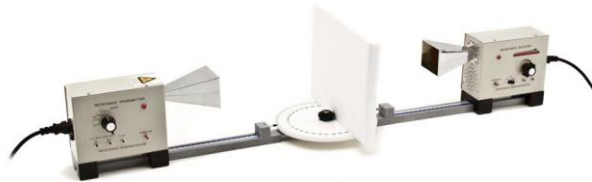
On observe que les isolants sont généralement transparents aux micro-ondes, à la lumière visible, et absorbent fortement la radiation ultra-violette. Les isolants solides comme le diamant, le quartz, le sel de cuisine, se présentent comme des cristaux transparents. Si l'isolant est un cristal ionique, c'est-à-dire s'il est constitué d'ions positifs et d'ions négatifs, on observe une forte absorption dans l'infrarouge. Le premier type d'absorption est dû aux électrons du solide, le second est dû aux oscillations des ions.

Les semi-conducteurs absorbent la lumière visible. Pour cette raison, les panneaux de cellules solaires au silicium apparaissent noirs.

Un coefficient élevé d'absorption est associé à une réflectivité élevée. Les métaux absorbent et reflètent sur tout le spectre, également dans l'infrarouge lointain et dans la région des micro-ondes. La coloration typique de certains métaux, comme l'or et le cuivre, indique une réflectivité élevée dans les intervalles spectraux qui correspondent au jaune ou au jaune-rouge.

## 2) Expériences :

Réaliser l'expérience ci-dessous : mettre un panneau en polystyrène, en bois ou en liège (ou d'autres matériaux électriquement isolants) et constater l'absence d'atténuation du signal acoustique. On pourra aussi envoyer le signal reçu à un instrument de mesure (voltmètre ou oscilloscope).



Utiliser maintenant le bac en plexiglas sans eau et répéter l'essai. Aucune atténuation du signal n'est enregistrée.



Remplir le bac avec de l'eau (sur la photo, elle a été colorée pour bien la voir). Placer le bac comme sur la photo ci-dessous (l'onde traverse la longueur du bac) :



Dans ce cas, le signal acoustique est quasiment totalement absent : les micro-ondes ont été absorbées par l'eau.

Répétez l'essai mais cette fois en tournant le bac de 90°. L'épaisseur de l'eau traversée par les micro-ondes est alors inférieure à la précédente. Le signal est davantage reçu. Ceci est une vérification qualitative de la loi exponentielle de l'absorption :  $I = I_0 \exp(-\alpha x)$ .

Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de vérifier quantitativement cette loi et déterminer la valeur du coefficient d'absorption de l'eau  $\alpha$ . On prendra garde à ne pas faire saturer le signal.

Une confirmation supplémentaire que les micro-ondes sont absorbées par l'eau peut se faire en interposant la main entre l'émetteur et le récepteur comme sur la figure ci-dessous :

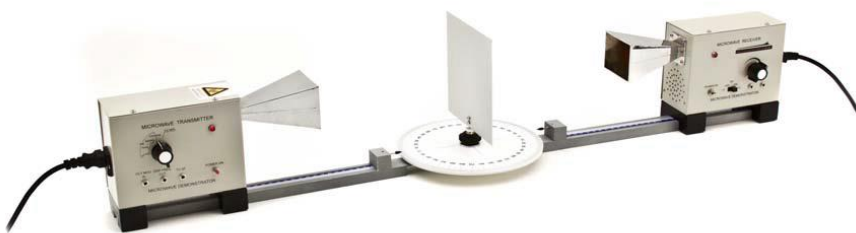


Le signal résultant est dans ce cas également atténué. L'explication de ce phénomène réside dans le fait que le corps humain contient en moyenne 75 % d'eau.

*Remarque : application aux fours à micro-ondes :*

A la fréquence de 2,45 GHz se trouve le pic d'absorption de l'eau. En émettant de l'énergie électromagnétique à la même fréquence de vibration que la molécule d'eau, le phénomène de la résonance électromagnétique est constaté. Dans ces conditions, on provoque l'absorption totale d'énergie électromagnétique par l'eau, en obtenant un chauffage maximal. Ceci explique pourquoi un four à micro-ondes ayant une puissance de quelques centaines de Watt réussit à réchauffer rapidement un aliment qui, dans un four traditionnel (qui n'émet pas d'ondes à cette fréquence spécifique), nécessite une dizaine de minutes de réchauffement pour être porté au même niveau de cuisson. Dans le four à micro-ondes, les modalités de diffusion de la chaleur dans l'aliment sont également différentes et font percevoir une différence « qualitative » : alors que dans le four traditionnel la chaleur attaque la surface de l'aliment et ensuite, par conduction, la chaleur se diffuse également à l'intérieur (ce qui entraîne une « brûlure » plus importante de la surface), avec le four à micro-ondes, la chaleur se diffuse de manière très homogène. En effet, c'est la matière interne (l'eau dans ce cas) qui recueille l'énergie électromagnétique et qui la transmet autour d'elle.

Essayer enfin avec une lame métallique comme sur la photo ci-dessous.



Le signal est totalement absent ; il n'y a aucun passage de micro-ondes et le signal acoustique cesse totalement. En général, les métaux conducteurs sont opaques aux micro-ondes.

## II) Polarisation des ondes électromagnétiques :

L'état de polarisation des ondes électromagnétiques peut être mis en évidence de deux manières :

### 1) Première méthode : par le positionnement de l'antenne réceptrice :

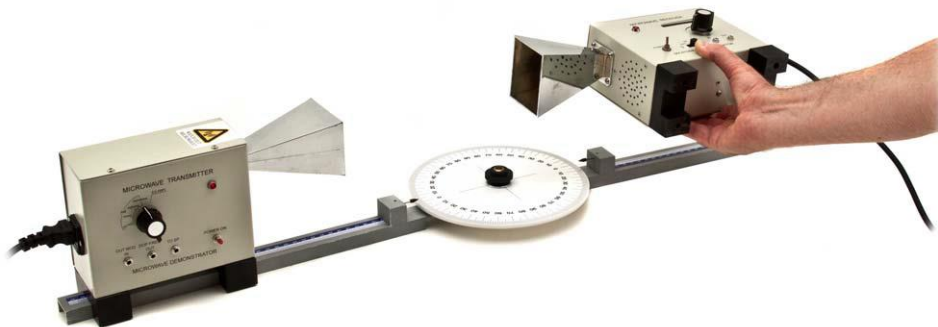
Pour pouvoir comprendre cette méthode, on s'intéresse au préalable au principe de fonctionnement du détecteur :

#### Principe de fonctionnement du détecteur :

On a montré en cours que quand on envoie une onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement sur un conducteur parfait en incidence normale, il n'y a pas d'onde transmise (l'épaisseur de peau est nulle), mais uniquement une onde réfléchie. On a également montré qu'apparaissent des courants sur la surface du conducteur, et que ces courants sont colinéaires au champ électrique incident. Ce phénomène est utilisé en pratique pour détecter des ondes électromagnétiques à l'aide d'une antenne rectiligne conductrice. Le courant induit est proportionnel à la composante du champ électrique de l'onde incidente le long de cette antenne.

Dans le cas d'une polarisation rectiligne, le signal détecté est maximal lorsque la direction de l'antenne coïncide avec la direction de polarisation de l'onde, et nul lorsque la direction de l'antenne est perpendiculaire à la direction de polarisation de l'onde. En effet, lorsque l'antenne réceptrice est perpendiculaire au champ électrique incident, aucun courant ne peut prendre naissance dans le récepteur (les électrons ne peuvent pas se mettre en mouvement).

Positionner l'antenne du récepteur perpendiculairement à l'antenne de l'émetteur : le récepteur ne reçoit aucun signal. Cette simple expérience démontre que les ondes émises par l'émetteur sont polarisées rectilignement, et que le champ électrique oscille « verticalement ».



### 2) Deuxième méthode : utilisation d'un polariseur :

#### Principe de ce polariseur (grille métallique) :

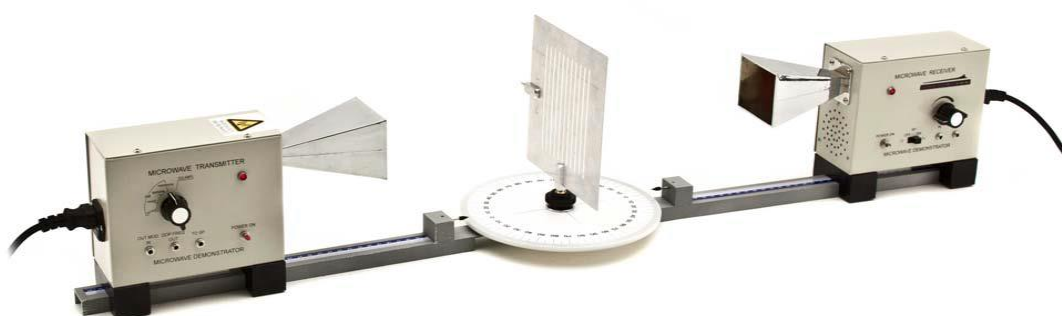
Une grille métallique (ensemble de tiges rectilignes), dont le pas est nettement inférieur à la longueur d'onde du rayonnement, constitue un polariseur. Cette grille est transparente pour la composante du champ électrique perpendiculaire à la direction des tiges, car aucun courant macroscopique ne peut circuler dans cette direction. En revanche, la grille réfléchit la composante du champ parallèle aux tiges (des courants peuvent apparaître dans cette direction). Au final, le champ électrique après la grille est forcément perpendiculaire aux fils. La grille se comporte comme un polariseur, d'axe de transmission perpendiculaire aux fils.

Ces polariseurs sont surtout efficaces dans le domaine infrarouge et dans le domaine des ondes centimétriques, car ils sont difficiles à réaliser lorsque le pas est trop faible.

Positionner la grille contenant une dizaine de 10 fils comme sur la photographie ci-dessous (fils horizontaux), et constater que l'onde est transmise.



Positionner ensuite la grille comme sur la photographie ci-dessous (fils verticaux), et constater que l'onde n'est pas transmise.



Cette expérience démontre que les ondes émises par l'émetteur sont polarisées rectilignement, et que le champ électrique oscille « verticalement ».

*Remarque : application au blindage électromagnétique :*

Ce résultat est à la base de la réalisation de blindages électromagnétiques, lesquels sont le plus souvent des grillages métalliques (grille verticale + grille horizontale) dont le pas est inférieur à la longueur d'onde. Ainsi, les composantes horizontale et verticale du champ électrique (donc le champ électrique lui-même) ne sont pas transmises.

### **3) Vérification expérimentale de la loi de Malus :**

On considère une onde polarisée rectilignement qui arrive sur un polariseur. On note  $\theta$  l'angle entre le champ électrique incident et l'axe du polariseur.

Seule la composante du champ électrique suivant l'axe du polariseur est transmise. Par conséquent, l'intensité de l'onde transmise, égale au carré de son amplitude, a pour expression :  $I = I_0 \cos^2 \theta$  (loi de Malus).

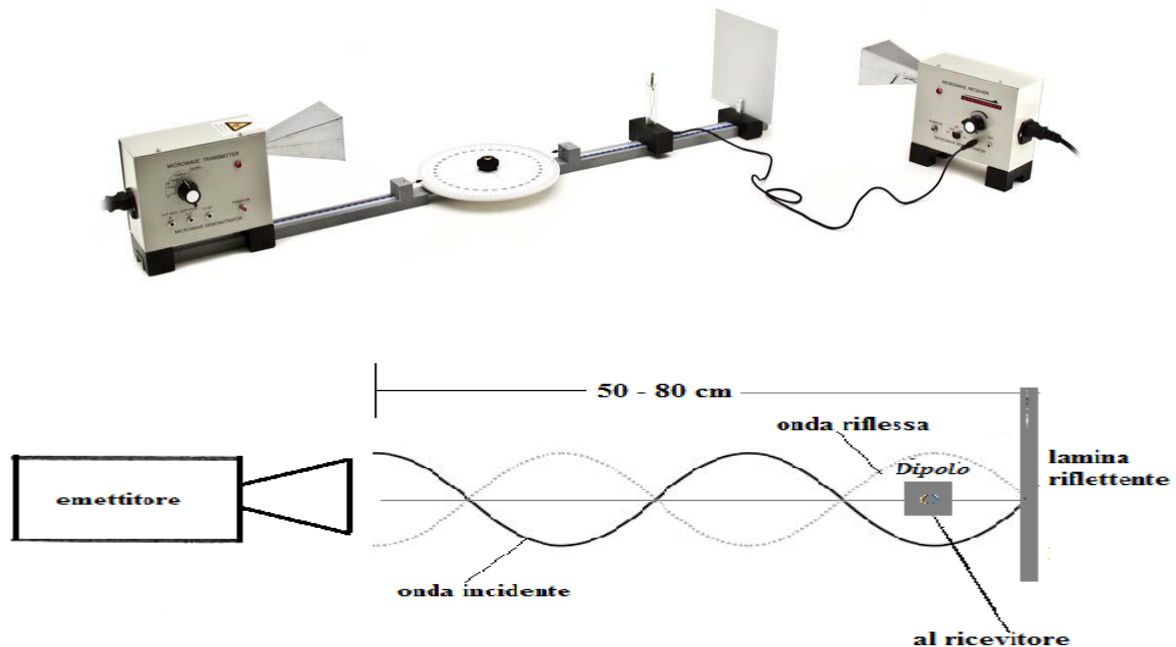
Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de vérifier la loi de Malus. On prendra garde à ne pas faire saturer le signal.



### III) Formation d'une onde électromagnétique stationnaire par réflexion sur un conducteur :

On a montré en cours que quand on envoie une onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement sur un conducteur parfait en incidence normale, il n'y a pas d'onde transmise (l'épaisseur de peau est nulle), mais uniquement une onde réfléchi. Suite à la réflexion sur la plaque métallique, un système d'ondes stationnaires prend place.

Sur la figure ci-dessous est illustrée une expérience permettant de créer des ondes stationnaires par réflexion sur un conducteur métallique :



On utilisera ici la sonde à micro-ondes. Regarder la notice pour effectuer les branchements et pour savoir comment orienter l'antenne.

Si l'antenne de dipôle est déplacée le long de la direction de propagation de l'onde incidente et de l'onde réfléchi, il est possible de vérifier la présence des maxima et des minima de l'onde stationnaire à travers les maxima et les minima du signal électrique récupéré grâce à un voltmètre ou un oscilloscope. On a montré en cours que la distance entre deux ventres ou entre deux nœuds successifs est égale à une demi-longueur d'onde. On peut facilement vérifier, en se servant de la règle linéaire, que la distance entre deux nœuds vaut  $\frac{\lambda}{2}$ .

Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de déterminer la longueur d'onde.

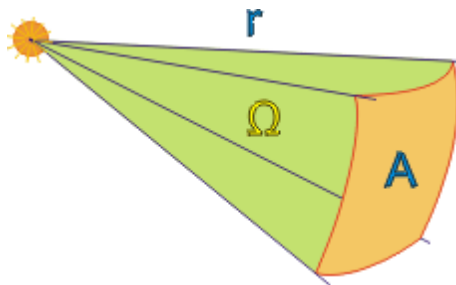
En déduire une valeur expérimentale pour la longueur d'onde et pour la fréquence.

Evaluer les incertitudes sur les mesures.

Comparer à la valeur annoncée par le constructeur (fréquence  $f = 9,4$  GHz ou 11 GHz, selon le modèle utilisé).

## IV) Amplitude de l'onde émise :

### 1) Rappels théoriques :

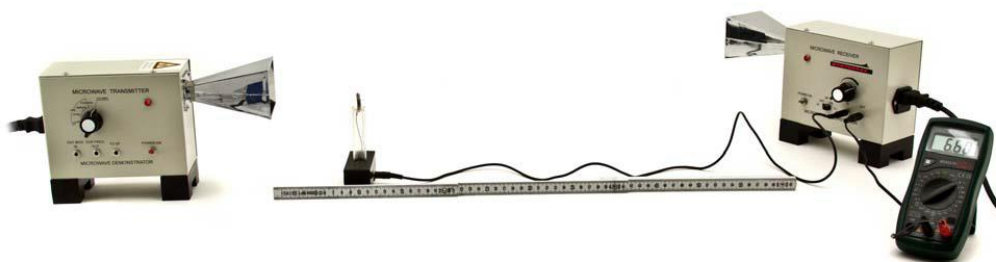


L'énergie émise par une source d'ondes électromagnétiques qui irradie uniformément dans toutes les directions suit la loi du carré inverse. Celle-ci démontre que la quantité d'énergie qui passe à travers l'unité de zone diminue avec la distance de la source. La puissance totale irradiée d'une source dans toutes les directions (dans tout l'angle solide) reste constante, alors que la zone totale de la sphère s'accroît avec le carré du rayon.

Ainsi la puissance par unité de zone décroît en  $\frac{1}{r^2}$ , et l'amplitude d'une onde sphérique décroît en  $\frac{1}{r}$ .

### 2) Expérience :

Disposer l'antenne réceptrice à une certaine distance de l'émetteur (s'assurer que le signal ne sature pas). Brancher le récepteur à un voltmètre.



Proposer et mettre en œuvre un protocole permettant de savoir si l'onde émise est une onde sphérique.

Pour cela, on admettra que le signal électrique récupéré est proportionnel à  $r^\alpha$  et on déterminera  $\alpha$ .

L'onde émise est-elle sphérique ?

Le signal électrique récupéré est-il proportionnel à l'amplitude de l'onde ou à l'intensité de l'onde ?

## V) S'il vous reste du temps... D'autres manipulations possibles :

En vous aidant du matériel et des notices fournis, proposer et mettre en œuvre des protocoles permettant de vérifier des lois relatives aux ondes électromagnétiques :

- Loi de Descartes pour la réflexion.
- Loi de Descartes pour la réfraction : déterminer l'indice de la paraffine.
- Diffraction par une fente.
- Interférences par des fentes d'Young.

Vous pouvez aussi vous amuser à moduler le signal par de la musique provenant de votre smartphone. En plaçant votre main entre l'émetteur et le récepteur, vous pouvez alors « couper » la musique à votre guise, continuer à chanter, enlever votre main, et vérifier que vous avez gardé le rythme, ou pas... !!!