

Module :

ondes et antennes



▶ Diaporama : les antennes

▶ Itinéraire pédagogique

▶ Résumé de cours

- 1- Découverte des ondes électromagnétiques
- 2- Définition d'une OEM
- 3- Propriétés des OEM
- 4- Spectre des OEM
- 5- Les différents types d'antennes
- 6- Champ créé par une antenne
- 7- Bilan de puissance d'une liaison HF

▶ Exercices

▶ Corrigés des exercices

▶ Questionnaire : ondes et antennes

▶ Réponses au questionnaire

Itinéraire pédagogique : ondes et antennes



► Diaporama :

| diapos | contenu |
|--------|---------------------------------------|
| 1-7 | onde OEM produite par une antenne |
| 8-12 | rayonnement d'une antenne |
| 13-18 | estimation de la portée d'un émetteur |
| 19-26 | l'antenne dipôle |
| 27-31 | l'antenne quart-d'onde |
| 32-43 | les autres modèles d'antennes |

► Fondamentaux :

L'onde électromagnétique (OEM) est le compagnon inséparable de la charge en mouvement :

- une charge électrique au repos produit un champ électrique E (1)
- un courant continu, un aimant, produisent un champ magnétique B (2)
- un courant alternatif produit une OEM composée de E et B

L'onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence qui est celle du courant qui la produit (4), sa longueur d'onde et sa polarisation (3).

Tout circuit électrique produit une OEM qui se propage dans tout l'espace, mais cette production est optimale pour un conducteur de taille et de géométrie adaptés : c'est l'antenne (5,6).

L'OEM part de l'antenne et se propage dans l'espace en s'atténuant à cause de la dispersion et des obstacles absorbants qu'elle rencontre (7). Avec une antenne directive, on peut choisir une direction privilégiée d'émission ou de réception de l'OEM (8).

La vitesse de la source par rapport au récepteur a une influence sur la fréquence de l'onde émise ou réfléchi (9).

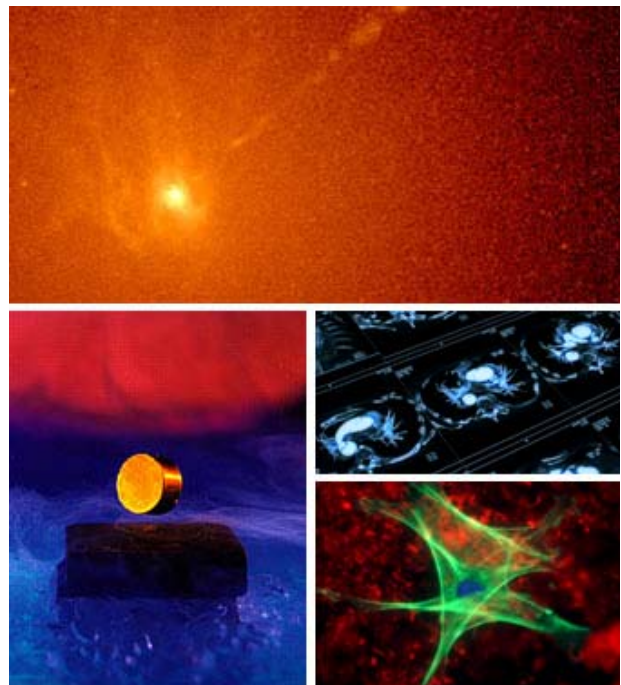
► Exercices :

- | | |
|---|--|
| 1- champ électrique créé par une charge | 6- antenne dipôle pour la TV |
| 2- champ magnétique créé par un courant continu | 7- bilan d'une liaison radio |
| 3- champ E au voisinage d'une antenne | 8- diagramme de rayonnement d'une Yagi |
| 4- circuit accordé de réception | 9- effet Doppler |
| 5- antenne de Marconi (quart-d'onde) | |

► Questionnaire :

De nombreuses applications simples pour tester vos connaissances dans le domaine.

Résumé de cours



jean-philippe muller

1) Découverte des ondes électromagnétiques

De nombreux scientifiques ont participé au développement de la radio. Les plus éminents sont :



James Clerk
MAXWELL
1831-1879

A son époque , on s'intéresse beaucoup aux phénomènes électriques et magnétiques :

- **Ampère** remarque qu'un courant électrique qui circule dans un fil dévie l'aiguille d'une boussole située à proximité
- **Faraday** découvre qu'un courant électrique circule dans un fil métallique refermé en boucle quand un aimant est approché ou éloigné de cette boucle

En 1864, **James Maxwell** unifie les diverses relations entre champs magnétique et électrique sous la forme d'un ensemble d'équations... les équations de Maxwell !

Ces équations prédisent l'existence d'ondes électromagnétiques se déplaçant à la vitesse de la lumière, et montrent que la lumière est elle-même une OEM.

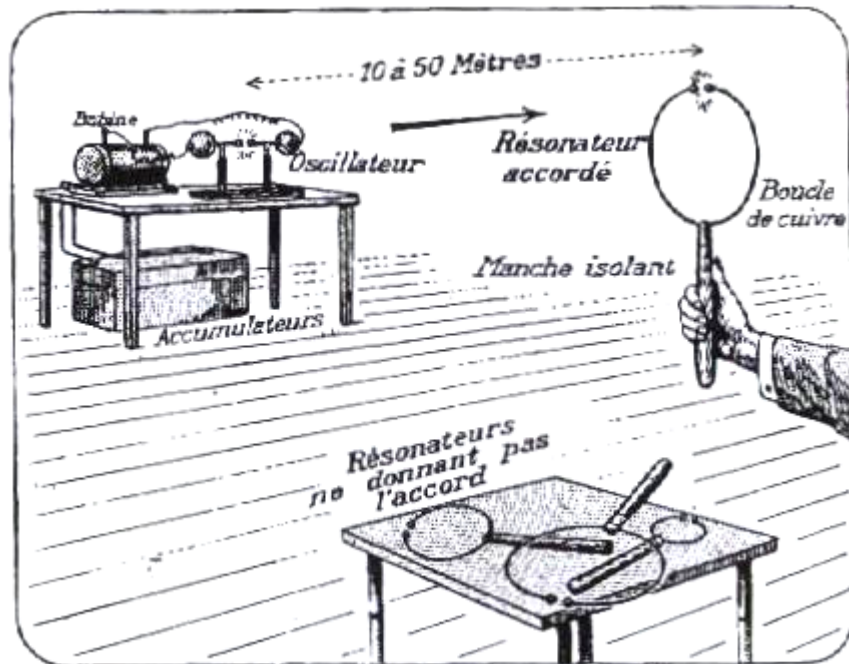
En 1888, **Heinrich Hertz** réussit à produire des ondes électromagnétiques dont la longueur était un million de fois plus grande que celle de la lumière visible. On donna le nom d' onde radio à cette sorte de lumière invisible.

Il étudie inlassablement la propagation des ondes électromagnétiques, qui font passer l'énergie d'un circuit à un autre sans l'aide d'un fil conducteur.

Il construit une machine permettant de produire une onde électromagnétique produisant une étincelle dans un résonateur à une distance allant jusqu'à 50m.



Heinrich HERTZ
1857-1894



Guglielmo MARCONI
1874-1937

Guglielmo Marconi perfectionne le dispositif de Hertz et rend le récepteur plus sensible grâce au cohéreur d'**Edouard Branly**.

En 1903 à Cape Cod dans le Massachusetts (USA), il réceptionne des signaux en provenance d'Europe démontrant ainsi que des liaisons transcontinentales sont possibles (grâce aux réflexions des ondes sur l'ionosphère).

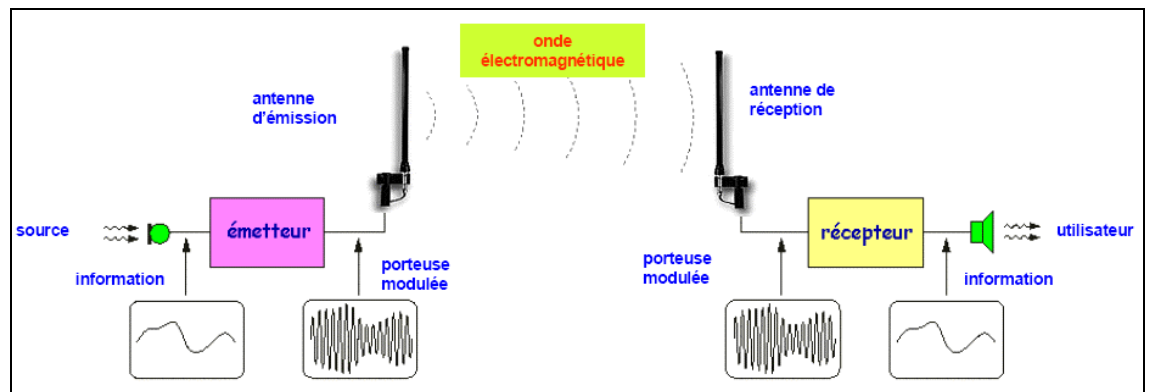
Ce sera le début des applications commerciales de la radio.

2) Définition de l'onde électromagnétique

Une onde électromagnétique (OEM) est constituée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B qui varient au même rythme que le courant qui leur a donné naissance.

On peut remarquer que :

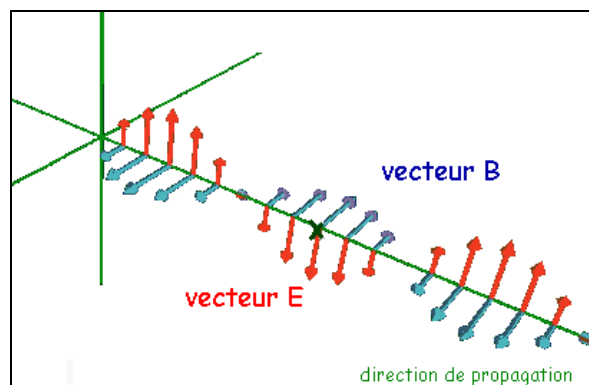
- toute circulation de charges dans un conducteur produit une OEM
- lorsque cette émission est voulue, le conducteur s'appelle « antenne d'émission »
- lorsque l'émission n'est pas voulue, elle est dite « parasite »
- une OEM crée dans tout conducteur des courants induits (antenne de réception)



Les champs E et B produits par l'antenne se répandent dans tout l'espace environnant l'antenne, en s'atténuant.

A une certaine distance de l'antenne d'émission :

- les vecteurs E et B sont perpendiculaires entre eux
- les vecteurs E et B sont perpendiculaires à la direction de propagation
- E et B sont déphasés (en retard) par rapport au courant qui les a créé



L'onde électromagnétique se propage en ligne droite, à la vitesse de la lumière :

- vitesse de propagation dans le vide ou l'air : $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- dans un matériau diélectrique de permittivité relative ϵ_r (isolant de câble coaxial, par exemple) la vitesse de propagation est inférieure à celle de la lumière :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{n}$$

et la longueur d'onde aussi

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Remarque : on réalise des antennes sur des céramiques à ϵ_r élevé (> 80) beaucoup plus petites que si elles étaient dans l'air (antennes patch pour GPS par exemple).

3) Propriétés de l'onde électromagnétique

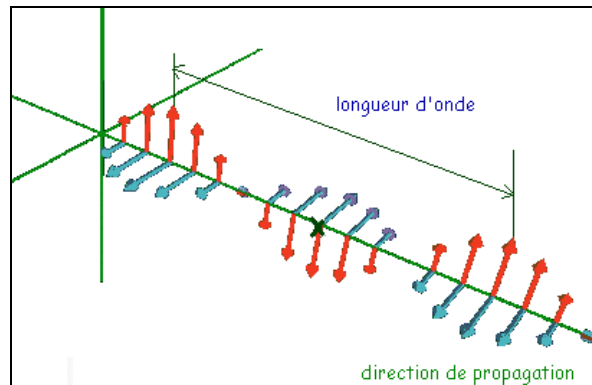
⇒ fréquence :

- la fréquence d'une OEM est la fréquence des champs E et B qui la composent
- c'est aussi la fréquence du courant circulant dans l'antenne

Exemple : un signal sinusoïdal de $f = 100 \text{ MHz}$ appliqué à une antenne d'émission produira des champs E et B variant sinusoïdalement à la fréquence de 100 MHz.

⇒ longueur d'onde :

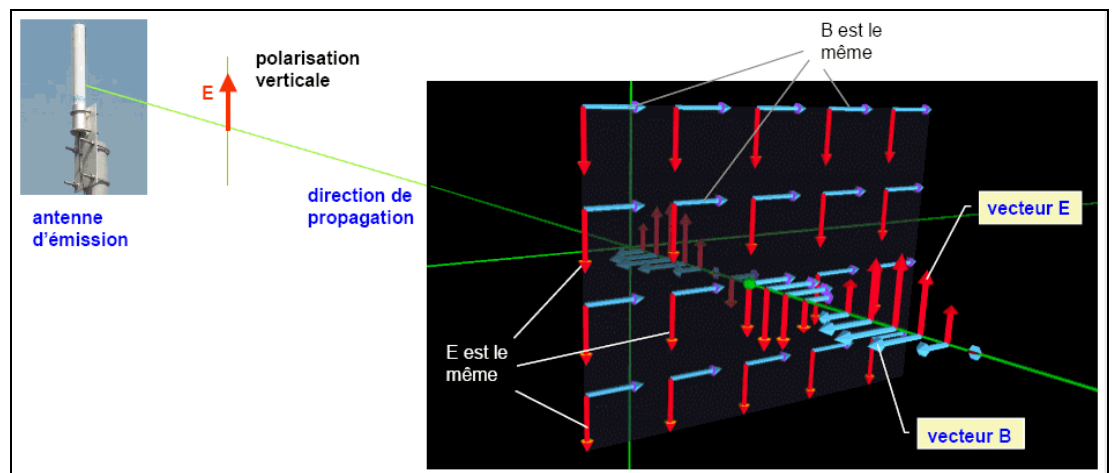
La longueur d'onde λ est le trajet parcouru par l'onde durant une période T : $\lambda = \frac{c}{f} = cT$



⇒ polarisation :

La polarisation d'une OEM est la direction de son champ électrique E.

- si E garde une direction constante, on dit que la **polarisation est rectiligne** (le plus courant)
- le plus souvent, E est horizontal (polarisation horizontale) ou vertical (polarisation verticale)
- à grande distance de l'antenne, E est toujours perpendiculaire à la direction de propagation
- il existe aussi des polarisation circulaire et elliptique



⇒ propagation :

Les ondes radio se propagent de l'antenne d'émission à l'antenne de réception de diverses manières :

- par **onde directe**, partant de l'émetteur et arrivant sur le récepteur sans rencontrer d'obstacles naturels (montagnes, couches atmosphériques) ou artificiels (immeubles, lignes à THT)
- par **onde réfléchie**, lorsque l'onde rencontre un obstacle et est renvoyée dans sa totalité, ou en partie, dans une direction différente.

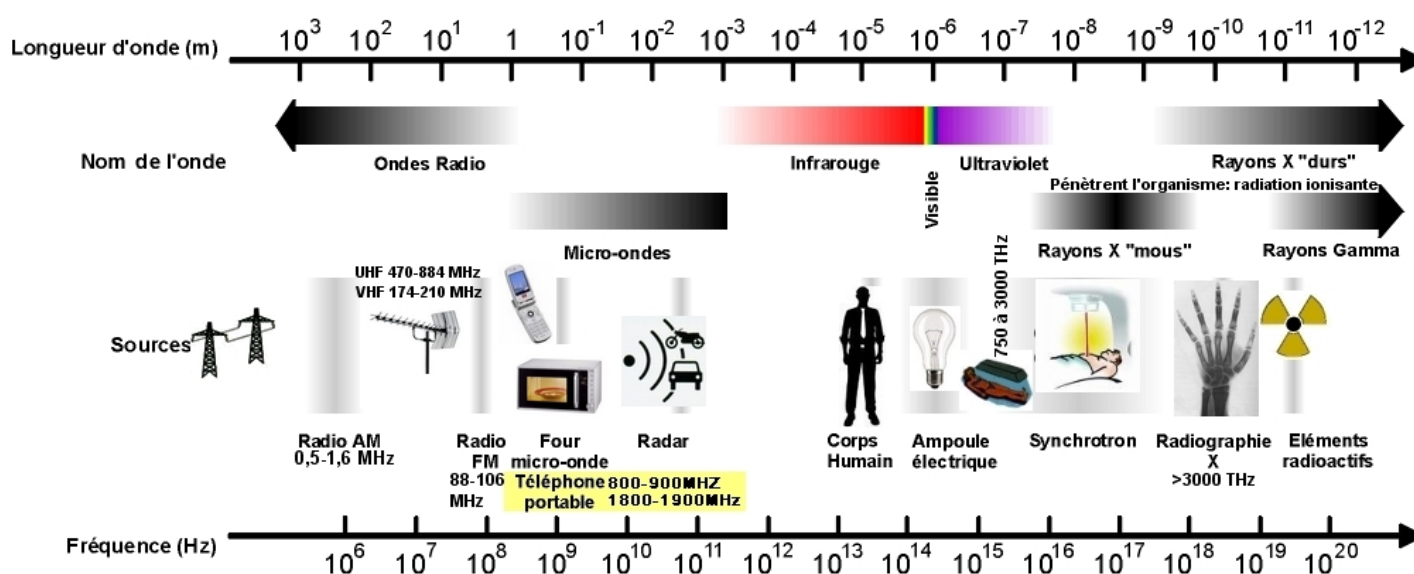
Les couches ionisées de l'atmosphère peuvent constituer des surfaces de réflexion si $f < 30 \text{ MHz}$.

4) Spectre des onde électromagnétique

Le tableau suivant indique les domaines d'applications des ondes électromagnétiques :

| OEM | fréquence | λ | applications |
|----------------|--------------|---------------|---|
| rayons X | > 1 THz | <100 nm | imagerie médicale, radiographie |
| rayons UV | > 1 THz | 400 à 100 nm | banc solaire |
| visible | > 1 THz | 780 à 400 nm | vision humaine, photosynthèse |
| infrarouges | > 1 THz | 1 mm à 780 nm | chauffage, détecteurs de présence |
| EHF | 30 à 300 GHz | 10 cm à 1 mm | radars, communication par satellite |
| SHF | 3 à 30 GHz | 10 à 1 cm | radars, alarmes anti-intrusion |
| UHF | 0,3 à 3 GHz | 1 à 0,1 m | TV, radars, GSM, fours à micro-ondes, hyperthermie |
| VHF | 30 à 300 MHz | 10 à 1 m | télévision, radio FM |
| HF | 3 à 30 MHz | 100 à 10 m | communications, soudage, collage |
| MF | 0.3 à 3 MHz | 1 km à 100 m | radiodiffusion MO-PO, diathermie médicale |
| LF | 30 à 300 KHz | 10 à 1 km | radiodiffusion GO, fours à induction |
| VLF | 30 à 0,3 kHz | 10 à 1000 km | radio-communications, chauffage par induction |
| ELF | 3 à 300 Hz | > 1000 km | transport/distribution de l'électricité, électroménager |
| quasi statique | 0 à 3 Hz | > 1000 km | champs électrique et magnétique terrestre |

Comme les fréquences basses sont assez encombrées, les nouvelles applications sont développées dans les fréquences élevées. L'avantage est que les antennes sont de taille réduite.



L'énergie d'une onde augmente avec sa fréquence et on distingue :

- les **rayonnements ionisants**, dont la fréquence est supérieure à 10^{15} Hz, qui ont une énergie suffisante pour casser les liaisons chimiques (rayons X, gamma et cosmiques)
- les **rayonnements non-ionisants**, dont la fréquence est inférieure à 10^{15} Hz, qui n'ont pas une énergie suffisante (rayons UV, IR, lumière visible, ondes radiofréquences)

5) Les différents types d'antennes

Pour les liaisons radio, on utilise une très grande variété d'antennes selon leurs propriétés :

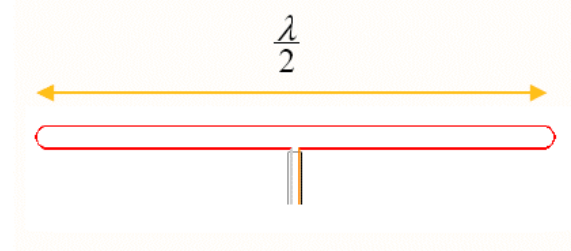
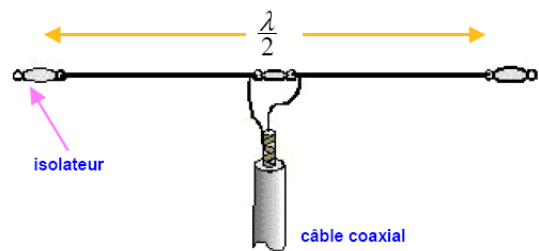
- pour champ B (bobine, cadre par ex.) ou champ E (la plupart des antennes)
- directives ou omnidirectionnelles
- à gain faible ou à fort gain
- impédance normalisée de 50Ω , ou autre valeur
- antenne filaire (télescopique par ex.) ou à réflecteur (parabole par ex.) etc...

Remarque : les dimensions de l'antenne sont toujours liées à la fréquence de travail (souvent $\lambda/4$ ou $\lambda/2$)

Quelques exemples :

Antenne dipôle

- économique
- rayonne perpendiculairement au brin
- impédance 75Ω



Antenne « dipôle replié »

- impédance 300Ω
- plus robuste que le dipôle
- associée à des brins directeurs et réflecteurs, donne l'antenne Yagi très utilisée en TV

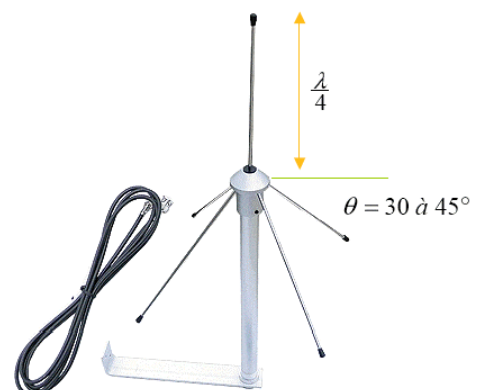


Antenne quart-d'onde

- nécessite un plan de masse
- omnidirectionnelle dans le plan horizontal
- moins encombrante que le dipôle
- impédance 36Ω

Antenne Ground-plane

- omnidirectionnelle dans le plan horizontal
- ne nécessite pas de plan de masse
- impédance 50Ω

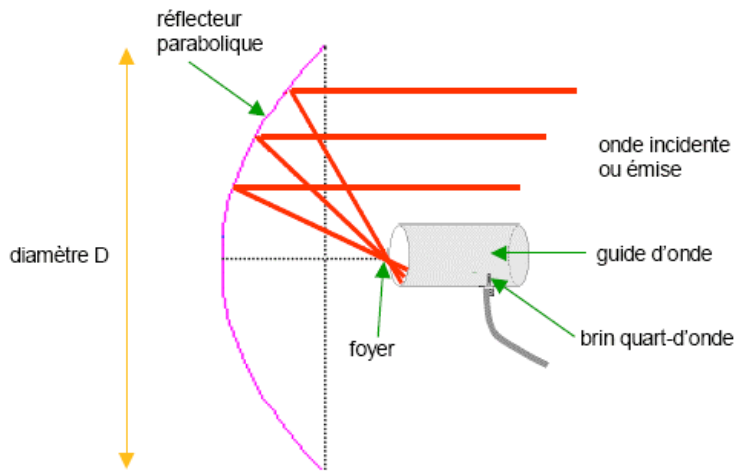
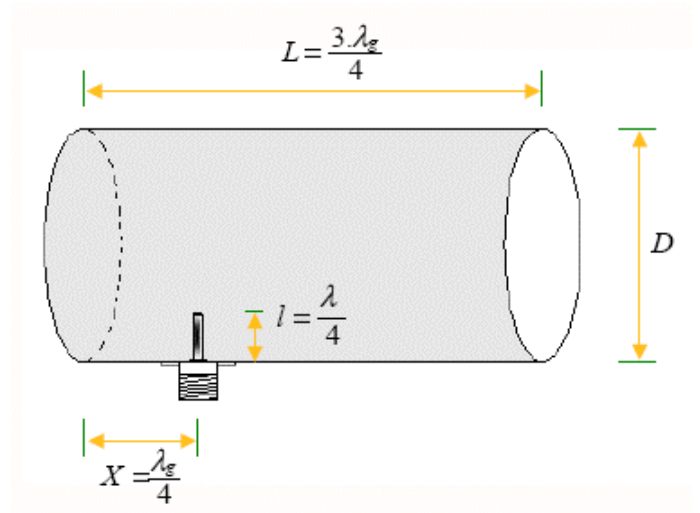


Antenne « guide d'onde »

- directive
- gain élevé

$$\lambda_c = 1,706 \cdot D$$

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}$$

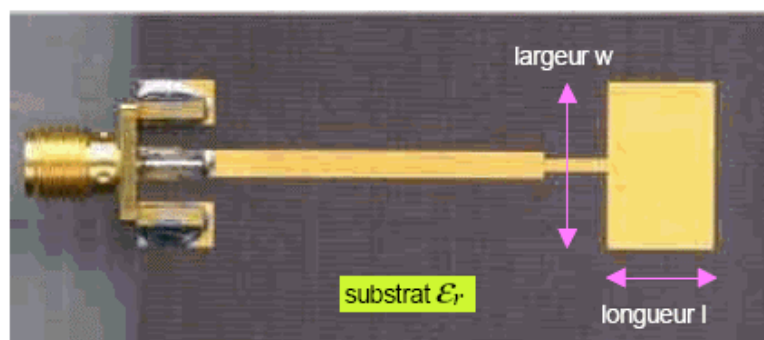
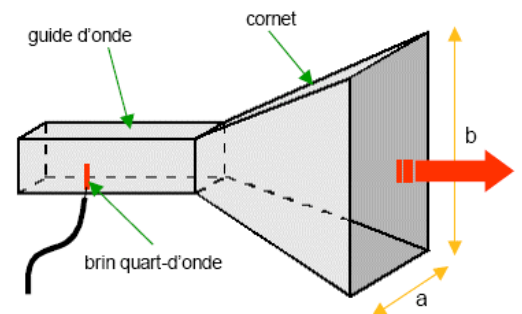


Antenne parabolique

- gain élevé lié au diamètre du réflecteur
- très directive

Antenne cornet

- très directive
- gain élevé



Antenne patch

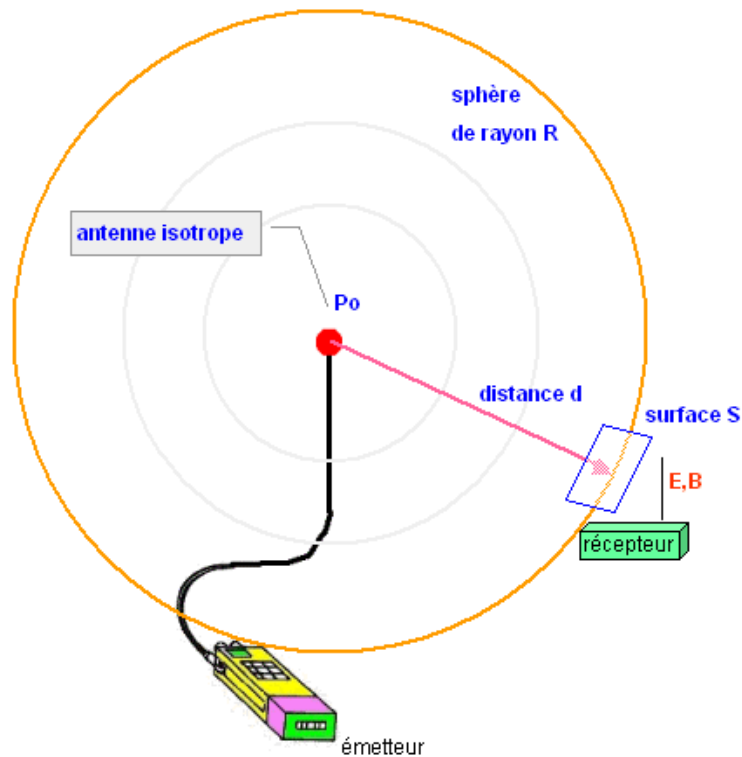
- résonance si $l = \lambda/2$
- w joue sur l'impédance à la résonance
- peu directive

De nombreux autres types d'antennes sont décrits dans la seconde partie du Diaporama Antennes.

6) Champ créé par une antenne isotrope

Une antenne isotrope rayonne la puissance P_0 de l'émetteur uniformément dans toutes les directions.

On **ne sait pas réaliser** une telle antenne en pratique, mais elle est commode pour les calculs et pour servir de référence aux antennes réelles.



Question :

Que valent les champs E et B au niveau de l'antenne du récepteur ?

- la surface S de la sphère de rayon d s'écrit : $S=4\pi d^2$ en m^2
- la puissance émise P_0 se répartit sur cette sphère, une surface S reçoit donc une densité de puissance P :

$$P=\frac{P_0}{S}=\frac{P_0}{4\pi d^2} \quad \text{en } W/m^2$$

- on montre que le champ électrique E au niveau du récepteur s'écrit :

$$E=\sqrt{120\pi P} \quad \text{en } V/m$$

- et le champ magnétique B :

$$B=\frac{E}{c} \quad \text{en Tesla}$$

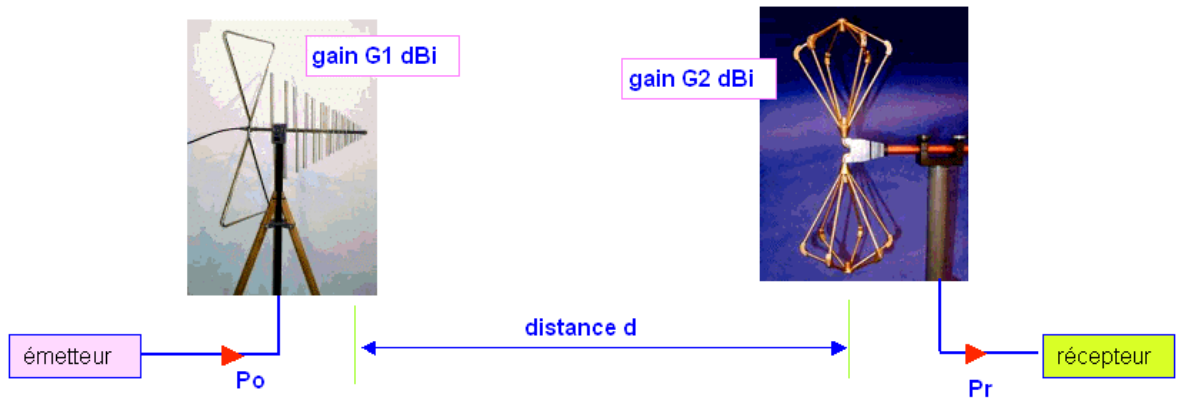
Application : un émetteur de 10W muni d'une antenne isotrope produirait à 5 km :

$$P=\frac{P_0}{4\pi d^2}=31,8nW/m^2 \quad E=\sqrt{120\pi P}=3,46mV/m \quad B=\frac{E}{c}=11,5pT$$

7) Bilan de puissance d'une liaison HF

Une liaison radio est établie au moyen d'un émetteur de puissance P_0 équipé d'une antenne directive de gain G_1 par rapport à une antenne isotrope.

Le récepteur est équipé d'une antenne directive de gain G_2 , pointée vers l'émetteur.



Si on néglige l'influence des obstacles, difficile à évaluer, on peut calculer la puissance reçue P_r à l'entrée du récepteur grâce à la formule de Friis :

$$P_r = G_1 \cdot G_2 \cdot P_0 \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2$$

avec :

- P_0 et P_r en Watts
- d et λ en mètres
- G_1 et G_2 sans unité (amplification en puissance)

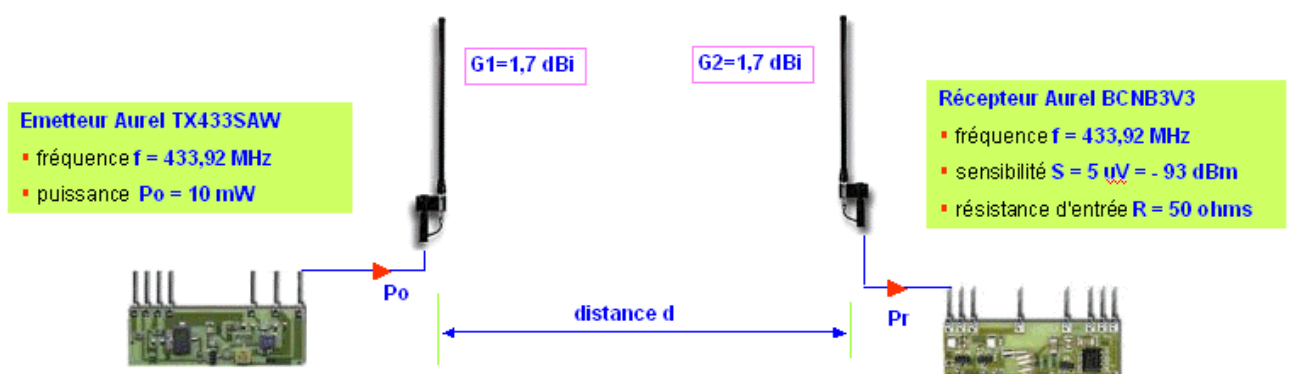
Si on exprime la puissance en dBm et les gains en dB, la formule de Friis devient , après simplification :

$$P_r = P_0 + G_1 + G_2 - 20\log(f) - 20\log(d) + 147,5$$

avec :

- P_0 et P_r en dBm
- d en mètres
- f en Hz
- G_1 et G_2 en dBi

Exemple d'une liaison par modules Aurel :



Question : une liaison sur une distance de 1 km est-elle possible ?

Réponse : le niveau à l'entrée du récepteur vaut

$$P_r = 10 \text{ dBm} + 1,7 \text{ dBi} + 1,7 \text{ dBi} - 20\log(433,92 \cdot 10^6) - 20\log(1000) + 147,5 = -71,8 \text{ dBm}$$

Ce niveau est supérieur à la sensibilité du récepteur, la puissance d'émission est donc suffisante et la liaison possible.

Exercices d'application



jean-philippe muller

Champ électrique créé par une charge

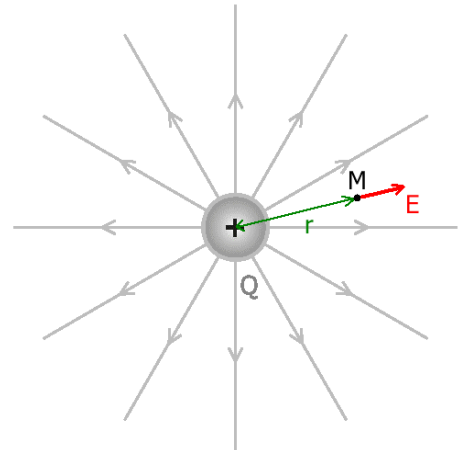


apprendre à définir le champ E à une certaine distance d'une charge électrique

On rappelle qu'une charge électrique Q produit autour d'elle un champ électrique E ayant les caractéristiques suivantes :

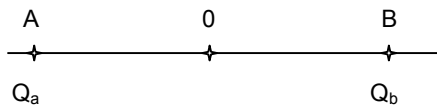
- le champ E est radial
- le vecteur E est dirigé vers l'extérieur si la charge Q est positive
- le vecteur E est dirigé vers l'intérieur si la charge Q est négative
- son module diminue avec la distance
- il s'exprime en V/m
- son module est donné par :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q|}{r^2} \quad \text{avec} \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$$

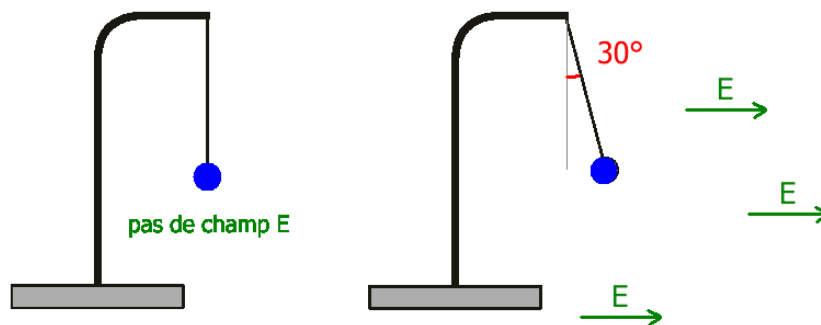


On rappelle aussi qu'une charge q placée dans un champ électrique est soumise à une force F telle que : $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$

1) Deux charges électriques Q_a et Q_b , placées en A et B, sont telles que $Q_a = 0,1 \mu\text{C}$, $Q_b = -0,3 \mu\text{C}$ et $AB = 20 \text{ cm}$. Caractériser le champ électrique résultant E qui règne en O, milieu du segment AB.



2) La boule d'un petit pendule électrostatique, de masse 2,5 g, porte une charge de $0,5 \mu\text{C}$. Elle est placée dans un champ électrique E uniforme et horizontal.



A l'équilibre, le fil du pendule s'incline d'un angle de 30° par rapport à la verticale. Déterminer l'intensité du champ électrique.

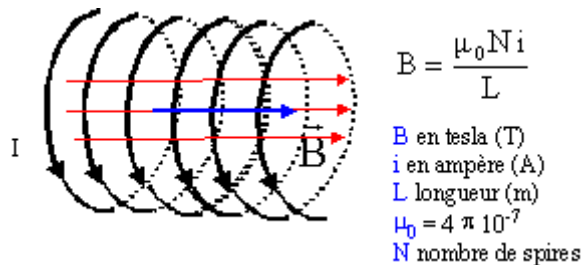
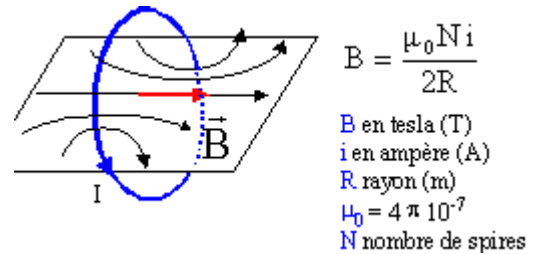
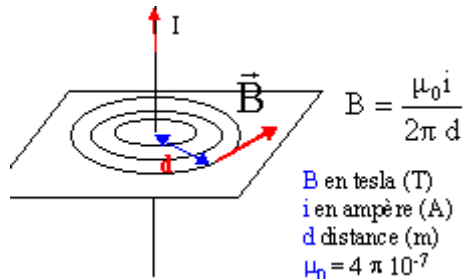
Champ magnétique créé par un courant continu



apprendre à caractériser le champ B au voisinage d'un circuit parcouru par un courant continu

A l'aide des relations permettant de calculer le champ magnétique B créé par un courant continu I dans quelques configurations simples, résoudre les problèmes suivants.

On rappelle que le champ magnétique B s'exprime en tesla (T).



1) Un conducteur est parcouru par un courant d'intensité $I = 50$ A. Calculer le champ magnétique B_1 qui règne à 1m de ce conducteur, puis le champ B_2 à 1 mm. A quelle distance le champ créé a-t-il la même intensité que celle du champ magnétique terrestre ($B_T = 4,7 \cdot 10^{-5}$ T) ?

2) On désire produire dans un petit volume (1cm^3 environ) un champ magnétique d'intensité $B = 0,1$ T. On dispose d'un courant d'intensité $I = 5$ A. Quelle configuration (fil, bobine plate, bobine allongée) est la meilleure ? proposer des valeurs numériques pour atteindre l'objectif fixé.

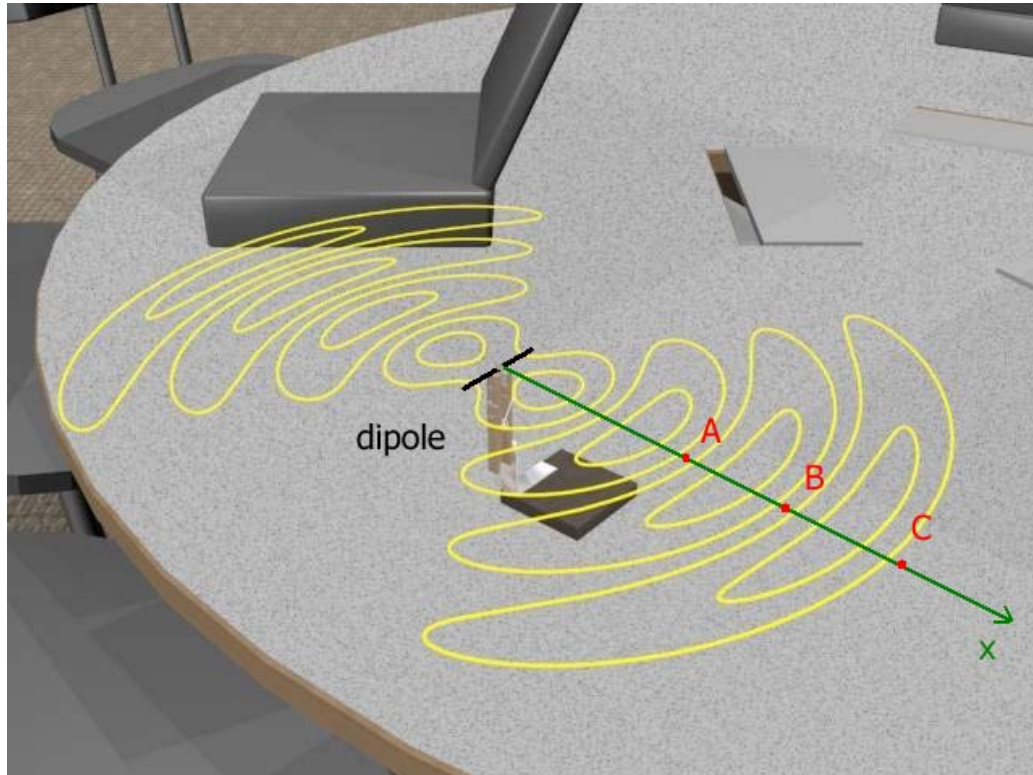
Champ E au voisinage d'une antenne



comprendre la structure du champ électrique lorsqu'on s'éloigne de l'antenne

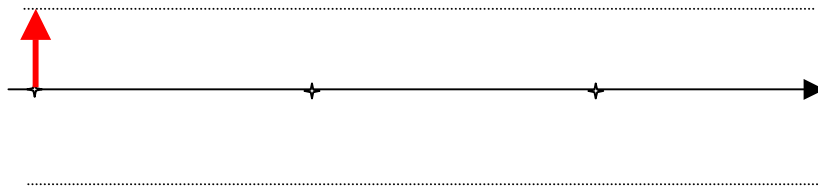
Une liaison WIFI fonctionnant à $f = 2,4 \text{ GHz}$ utilise une antenne dipôle pour relier l'ordinateur portable à la base.

La figure montre la répartition des lignes de champ, les zones où les lignes sont rapprochées (A, B et C) étant les zones où le champ E produit par l'antenne est maximal.

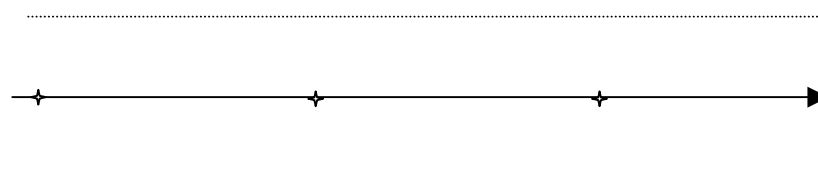


1) Quelle est la direction du vecteur champ électrique ? quelle est la polarisation de l'onde ? que vaut la distance AB ?

2) En admettant qu'en A le champ est maximal, esquissez la répartition des vecteurs champ électrique le long de l'axe Ox.



2) Comment a évolué cette répartition au bout d'un temps $t = 208 \text{ ps}$?

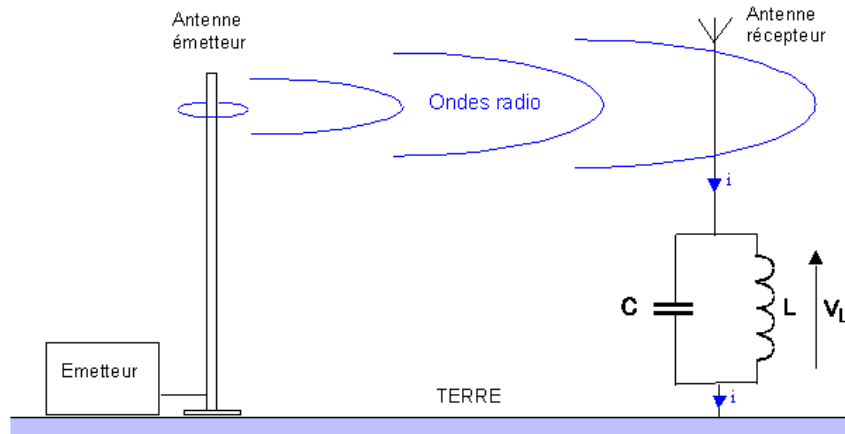


Le circuit accordé de réception



comprendre comment on peut capter et sélectionner un signal radio

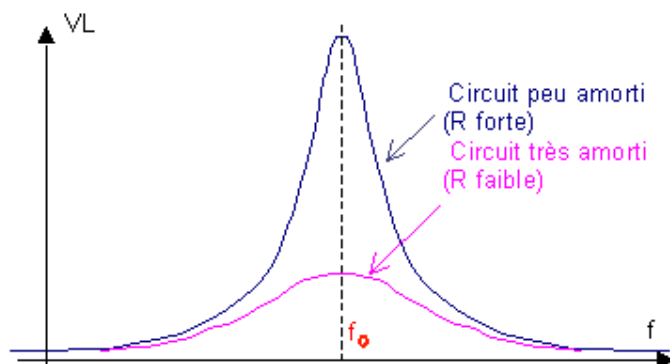
Une antenne placée dans un champ électromagnétique est le siège d'une force électromotrice induite qui fait circuler un courant dans le circuit LC placé à sa base.



1) La station "France Inter" en Grandes Ondes émet sur 1829m. Calculer alors la fréquence du signal émis et la valeur de l'inductance L qui donnera la résonance avec un condensateur de $C = 410 \text{ pF}$.

2) En pratique, la bobine a une résistance qui peut être introduite dans le schéma du circuit LC sous forme d'une résistance en R parallèle. Quelle est sa valeur de l'impédance de ce circuit à la résonance ? Est-elle maximale ou minimale ?

3) Les 2 courbes ci-dessous représentent les variations de la tension V_L pour 2 valeurs différentes de la résistance R. Faire apparaître sur ces deux courbes les bandes passantes des 2 circuits accordés.



4) Pour recevoir France-Inter en GO (spectre de largeur 10 kHz), on utilise un circuit accordé avec $C = 410 \text{ pF}$ et $R = 25 \text{ k}\Omega$. Calculer le coefficient de qualité $Q_0 = R/L\omega_0$ du circuit et sa bande passante B_0 . Cette bande B_0 est-elle bien adaptée à l'émission ?

Antenne de Marconi (quart-d'onde)



maîtriser quelques caractéristiques d'une antenne

Une antenne constituée par un brin vertical est un dispositif qui a une fréquence de résonance, et peut donc être modélisée par un circuit résonant de type R,L,C série (voir annexe) :

$$\underline{Z}_a(j\omega) = R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega} = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) = R + jX \quad \text{impédance de l'antenne}$$

Les courbes en Annexe montrent l'évolution de l'impédance d'un conducteur vertical de hauteur h et de diamètre w placé au-dessus d'un plan de masse en fonction de la fréquence (et donc la longueur d'onde λ) du signal v_{rf} appliqué.

1) Préciser sur la courbe les domaines où l'impédance est capacitive, résistive ou inductive.

On désire émettre à une fréquence de $f_0 = 100$ MHz

⇒ scénario 1 on utilise un brin de longueur $h_0 = \lambda/4 = 75$ cm

2) Cette longueur est-elle le meilleur choix si on veut une impédance résistive R_0 ? .Quelle longueur faudrait-il prendre ? Estimer alors la valeur de la résistance d'antenne R_0 .

3) On applique à cette antenne un signal sinusoïdal de valeur efficace $V_{rf} = 10$ V . Calculer la puissance P_0 dissipée dans la résistance de rayonnement R_0 qui représente la puissance émise par l'antenne.

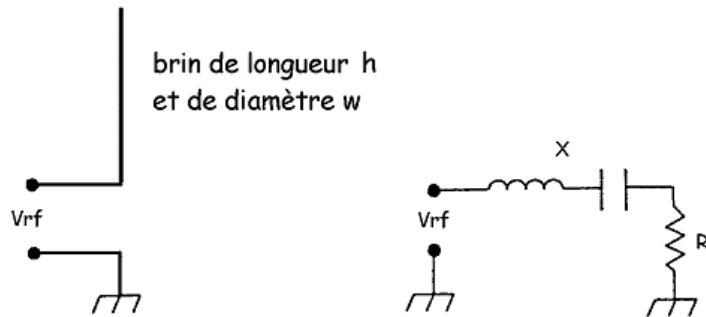
⇒ scénario 2 on utilise un brin de longueur $h_1 = 50$ cm (trop court !)

4) Sachant que ce brin a un diamètre $w = 8,5$ mm, estimer, à la fréquence $f_1 = 100$ MHz, les ordres de grandeurs de la résistance de rayonnement R_1 et de la réactance X_1 et en déduire l'impédance complexe \underline{Z}_1 de l'antenne.

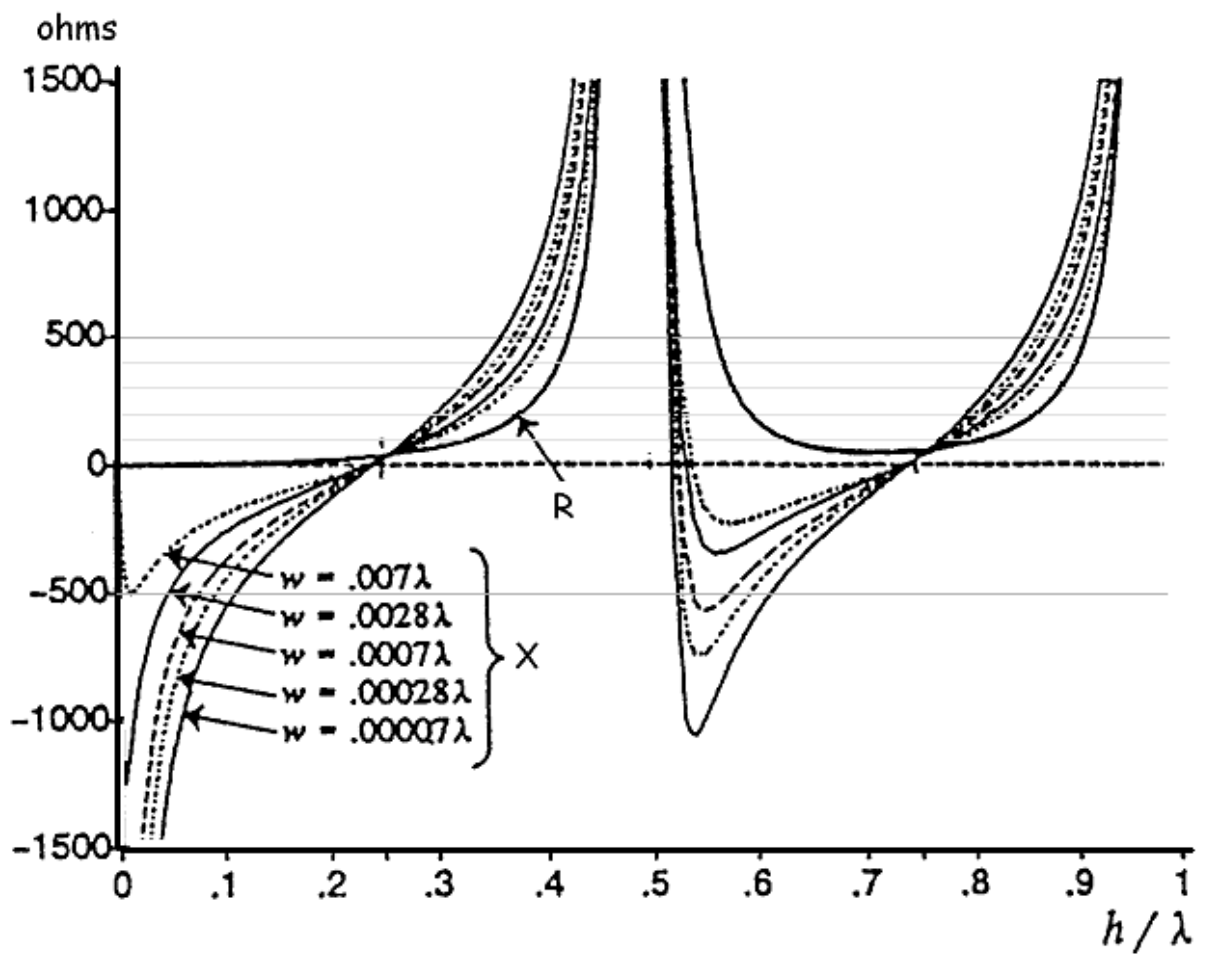
5) Pour la même tension $V_{rf} = 10$ V que précédemment, calculer la valeur efficace du courant I et son déphasage par rapport à la tension. En déduire la puissance émise P_1 . Comparer les deux antennes et conclure.

Annexe : impédance d'une antenne quart-d'onde

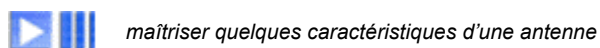
⇒ schéma équivalent de l'antenne :



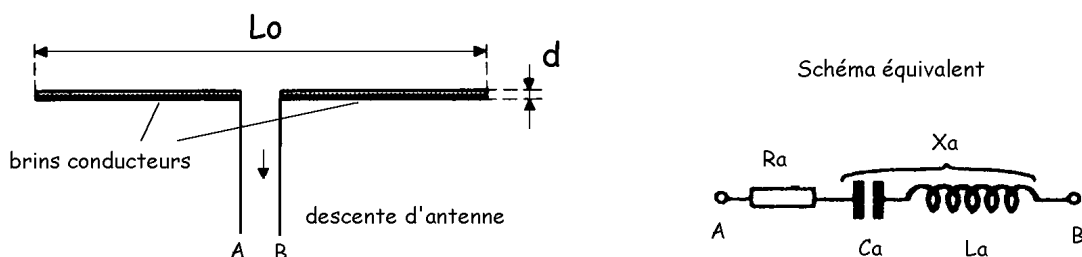
⇒ impédance en fonction de la longueur h et du diamètre w :



L'antenne dipôle pour la TV



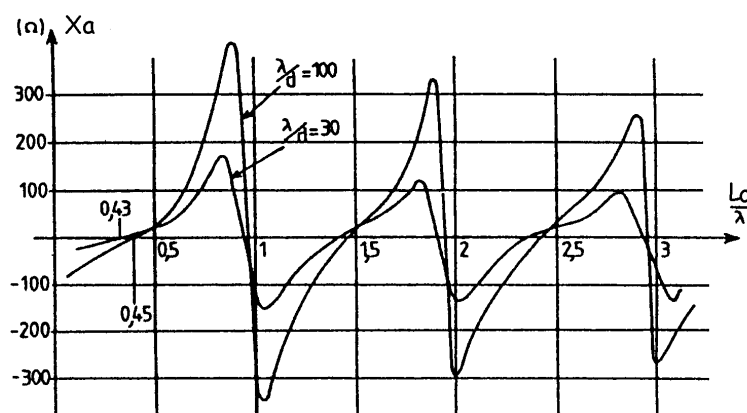
L'antenne dipôle, constituée de 2 brins d'environ $\lambda/4$ et de diamètre d , a une longueur totale voisine de $L_0 \approx \lambda/2$:



C'est une antenne résonante qui présente selon la fréquence une impédance résistive, capacitive ou inductive.

1) Calculer la longueur approximative L_0 d'une antenne dipôle taillée pour travailler dans la bande TV-UHF (on fera le calcul pour une fréquence moyenne de $f = 665$ MHz).

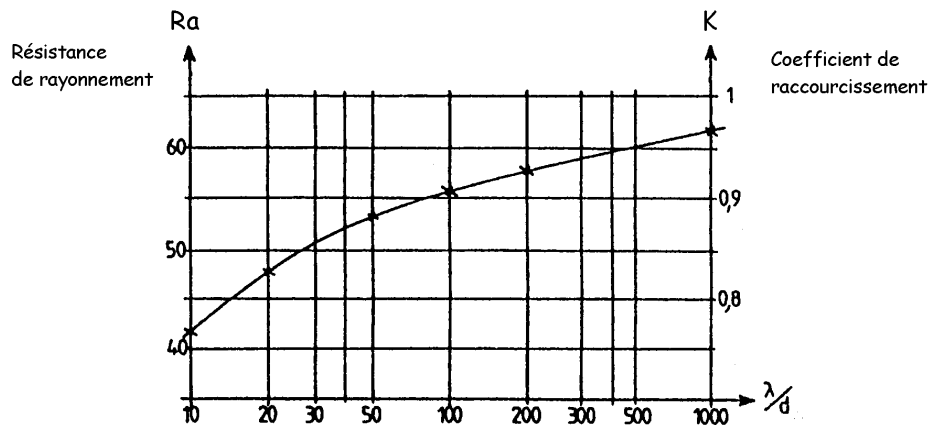
2) Les courbes suivantes donnent les variations de la réactance X_a en fonction du rapport L_0/λ pour 2 valeurs différentes du diamètre.



Une antenne est optimale si elle est équivalente à une résistance à la fréquence de travail. Si on veut une impédance d'antenne résistive à 665 MHz ($X_a = 0$), la valeur $L_0 = \lambda/2$ convient-elle pour la longueur de l'antenne ?

Si l'antenne est réalisée avec 2 tubes de diamètre $d = 0,5$ cm, quelle est alors la longueur optimale de l'antenne ?

3) La longueur exacte est donnée par la relation $L_0 = K \cdot \lambda/2$ où K est le facteur de raccourcissement. Sur la courbe ci-dessous, retrouver la valeur du coefficient K correspondant à des brins de diamètre $d = 0,5$ cm et vérifier la longueur optimale de l'antenne trouvée précédemment.

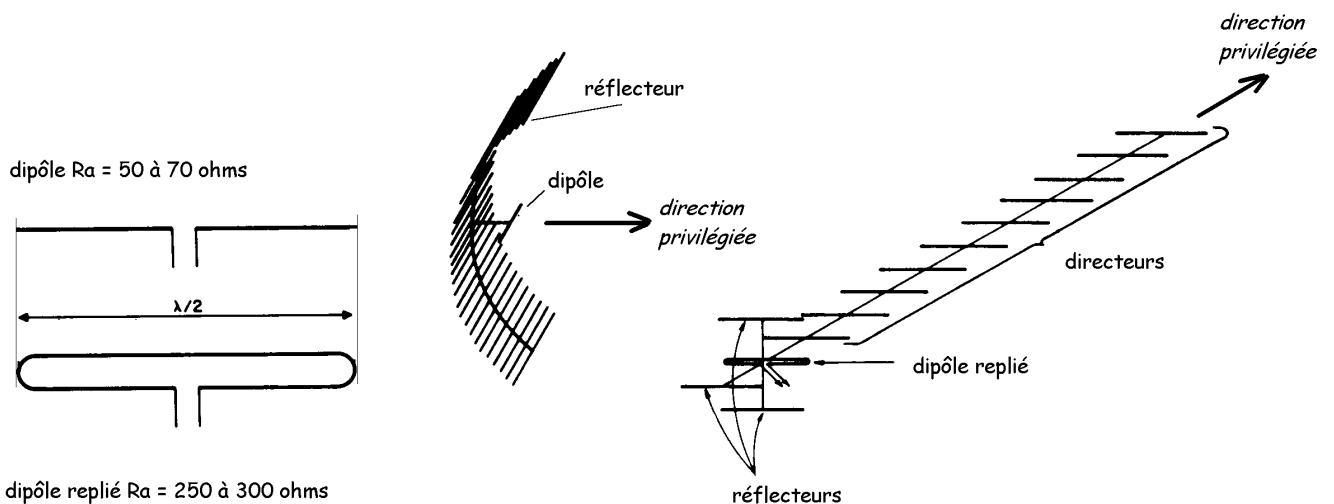


4) Toujours pour des brins de diamètre $d = 0,5$ cm, déterminer à l'aide de la courbe ci-dessus la résistance de rayonnement R_a de l'antenne réalisée.

5) A la fréquence de calcul, l'antenne est donc équivalente à une simple résistance R_a . A quel genre de circuit (RL, RC, LC etc...) cette antenne est-elle équivalente aux fréquences inférieures à la fréquence de calcul ? aux fréquences supérieures ?

Cette antenne dipôle est très utilisée :

- sous sa forme simple, comme antenne d'émission et de réception (bande FM par exemple) en disposition horizontale ou verticale
- sous la forme du dipôle replié, mécaniquement plus robuste, qui présente une résistance de rayonnement 4 fois plus élevée
- en association avec un réflecteur métallique pour créer une antenne directive qui présente un gain G dans une direction privilégiée
- sous la forme de l'antenne Yagi (ou râteau UHF) à gain élevé, en association avec des brins directeurs en nombre variable et des réflecteurs



Bilan d'une liaison radio

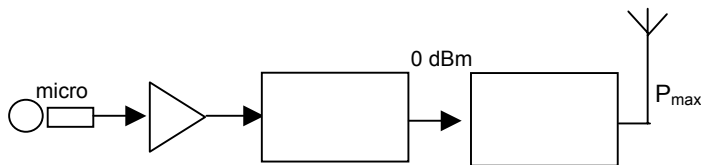


apprendre à définir les paramètres d'une transmission par ondes électromagnétiques

On se propose d'étudier les structures d'un émetteur et d'un récepteur permettant de réaliser une liaison HF entre deux points fixes et d'en déterminer les caractéristiques des différents éléments :

- liaison entre le sommet de la Tour de l'Europe (Mulhouse) et le Markstein (30 km en vue directe)
- fréquence de travail $f_0 = 433,92$ MHz (libre d'utilisation si la puissance fournie à l'antenne est < 10 mW)
- l'émission se fait en modulation de fréquence

1) Sachant qu'on dispose pour l'émission d'un oscillateur à 433,92 MHz modulable en fréquence et fournissant 0 dBm en sortie, dessiner le schéma fonctionnel de l'émetteur et définir le gain de l'ampli RF si on veut travailler à la puissance maximale autorisée.



2) En admettant que la puissance émise se répartit sur une sphère, calculer la densité de puissance P en W/m^2 au Markstein relative à l'émetteur de la Tour de l'Europe.

3) Une antenne sans gain fournit à sa base une tension e telle que :

$$e = \sqrt{\frac{120 \cdot P}{\pi}} \cdot \lambda$$

Calculer alors la tension E_1 reçue par l'antenne placée au Markstein.

4) On décide d'utiliser **à l'émission et à la réception** une antenne directive de gain en tension $G = 10$ dB dans son axe d'émission privilégiée. Calculer la nouvelle valeur E_2 du signal fourni par l'antenne de réception.

5) Le signal E_2 est reçu avec un récepteur dont le démodulateur (dernier étage) nécessite une tension de 100 mV pour fonctionner correctement. Calculer le gain total G_R que doit apporter le récepteur entre l'antenne et le démodulateur.

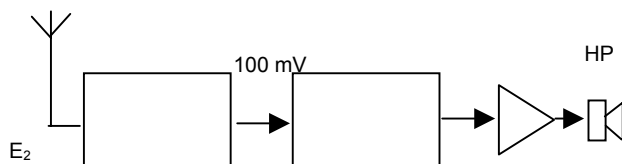
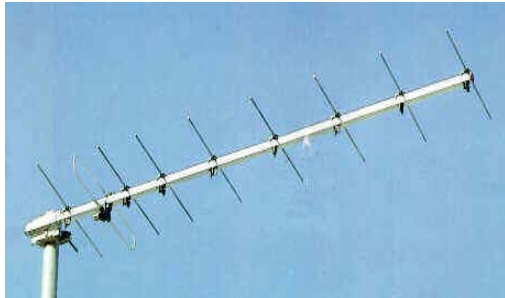


Diagramme de rayonnement d'une antenne



maîtriser quelques caractéristiques d'une antenne

L'antenne Yagi 9 éléments modèle 20909 de la société AFT a les caractéristiques suivantes :



Caractéristiques électriques

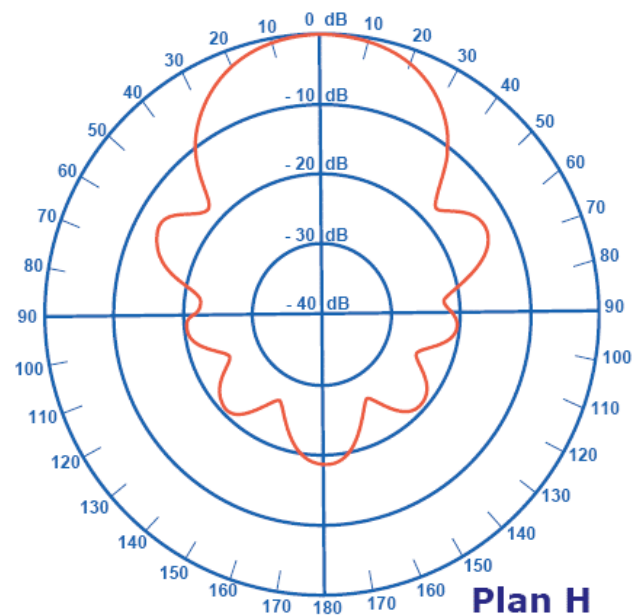
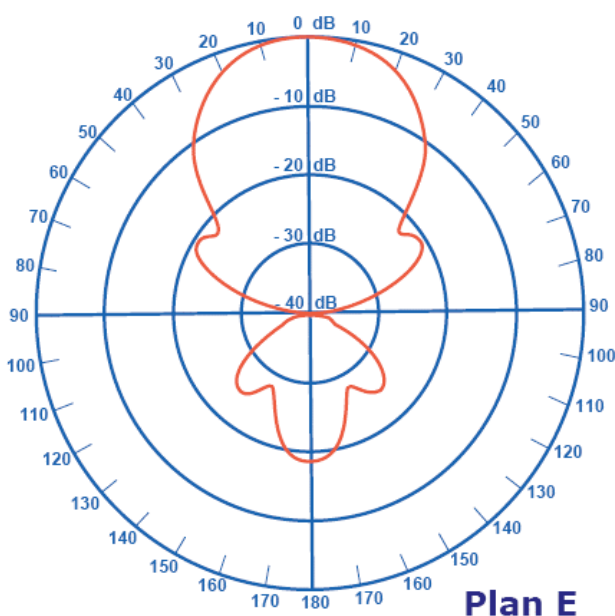
Rayonnement à 432 MHz

Longueur effective de l'antenne : 1,59 λ
Gain isotrope : 13,1 dBi

Bande passante

En gain à -1 dB : 409 à 440 MHz
Impédance nominale : 50 Ω
En adaptation pour ROS <1,3/1..... : 431,0 à 438,5 MHz
Puissance HF maximale admissible en continu .. : 1000 W

Les diagrammes de rayonnement de cette antenne dans les plans E (celui du brin rayonnant) et H (perpendiculaire au brin rayonnant) sont les suivants :



1) Mesurer graphiquement les angles d'ouverture à -3dB : θ_E dans le plan E et θ_H dans le plan H.

$$\theta_E = \pm \dots\dots \text{degrés}$$

$$\theta_H = \pm \dots\dots \text{degrés}$$

2) Mesurer l'amplitude et la direction des premiers lobes latéraux dans les deux plans.

- plan E : premiers lobes latéraux à $\pm \dots\dots$ degrés, d'une amplitude de $\dots\dots$ dB sous le lobe principal
- plan H : premiers lobes latéraux à $\pm \dots\dots$ degrés, d'une amplitude de $\dots\dots$ dB sous le lobe principal

3) On appelle « protection arrière » la différence en dB entre les gain dans la direction privilégiée et le gain dans la direction opposée. Mesurer les protections arrières P_E et P_H dans les deux plans.

$$P_E = \dots\dots\dots \text{dB}$$

$$P_H = \dots\dots\dots \text{dB}$$

4) Si l'antenne est montée horizontalement (comme sur la photo), que peut-on dire de la protection par rapport à un émetteur qui serait dans la direction perpendiculaire à l'axe de l'antenne ?

Effet Doppler



Découvrir ce phénomène physique

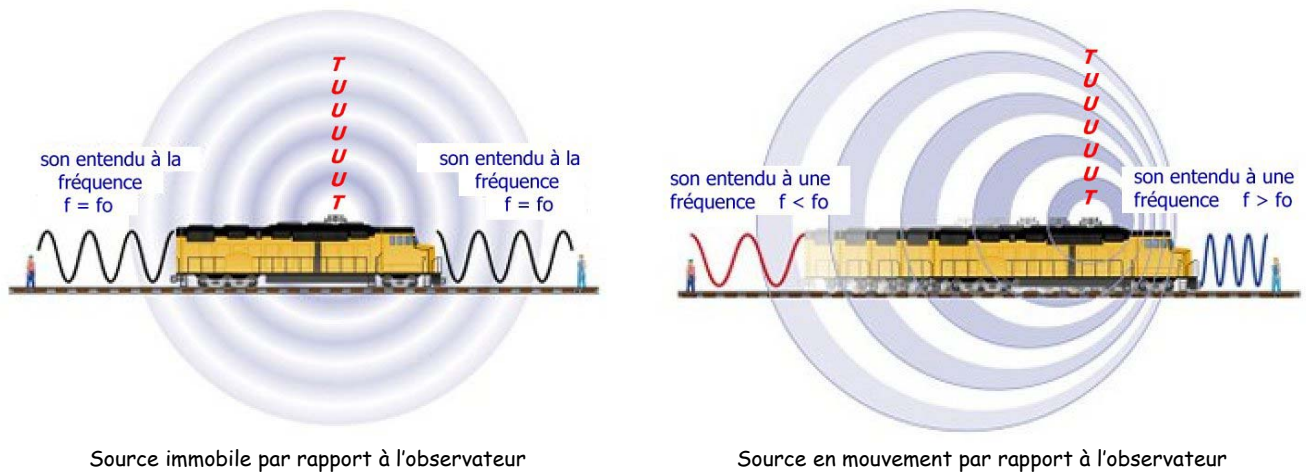
Il a été découvert indépendamment par Christian Doppler en 1842, puis six ans plus tard par Hippolyte Fizeau.

Effet Doppler : c'est la variation apparente de la fréquence d'une onde émise par une source en mouvement par rapport à un observateur.

Si la source émet un signal de fréquence f_0 et se déplace avec une vitesse v par rapport à l'observateur, la variation de fréquence Δf s'écrit :

$$\Delta f = 2.v.f_0/c$$

où c est la célérité de l'onde ($c = 340$ m/s si c'est un son, $c = 3.10^8$ m/s si c'est une OEM)



1) La locomotive des figures ci-dessus émet un « Tuuuut » assimilable à une tonalité continue à 400 Hz. Quelle est la valeur f_1 de la fréquence entendue par un observateur qui voit le train arriver vers lui à la vitesse de 120 km/h ? Quelle est la valeur f_2 de la fréquence entendue par un observateur qui voit le train s'éloigner ?

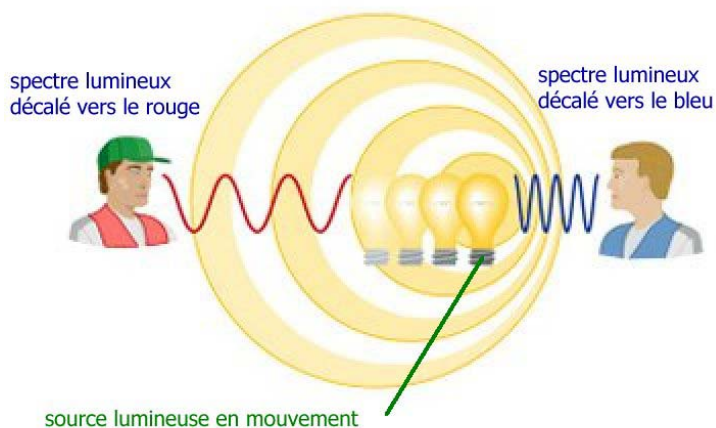
2) Un utilisateur de GSM téléphone depuis sa voiture qui roule à la vitesse de 130 km/h vers la station de base située le long de l'autoroute. Son téléphone émet dans le canal 801 soit à $f_0 = 1863$ MHz. Quelle sera la fréquence du signal reçu par la base ? Quel est le problème que peut poser l'effet Doppler si l'utilisateur se déplace à vitesse élevée ?

3) Ce décalage de fréquence est aussi observable pour les OEM, et donc pour la lumière.

Une diode laser de guidage émet une lumière rouge monochromatique de longueur d'onde $\lambda_0 = 0,5 \mu\text{m}$.

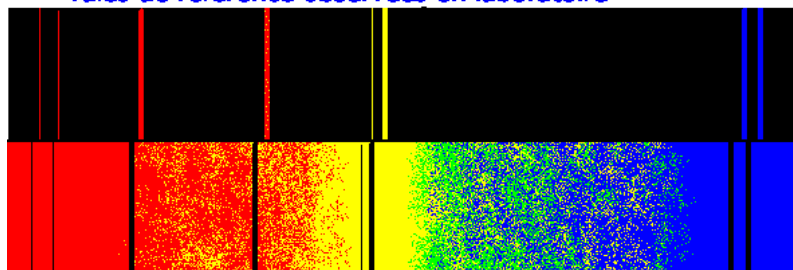
Elle est montée sur un satellite qui s'approche du satellite-cible à la vitesse de $v = 30000 \text{ km/h}$.

Calculer la longueur d'onde λ_1 de cette lumière vue par un observateur placé sur le satellite cible. Observera-t-il une variation de couleur de la diode laser ?



4) Dans la lumière qui nous vient des étoiles, il y a certaines longueurs d'onde qui sont absentes. Elle correspondent à des raies d'absorption propres à chaque atome, à des longueurs d'onde λ_0 bien connues.

raies de référence observées en laboratoire



A cause de l'effet Doppler, les raies manquantes sont décalées un peu vers le bleu ou vers le rouge, selon le mouvement de l'étoile.

raies d'absorption dans la lumière d'une étoile

Pour toutes les étoiles des autres galaxies dont on analyse le spectre, on observe que la lumière est toujours décalée vers le rouge. Qu'en déduisez-vous sur le mouvement des étoiles par rapport à notre galaxie ?



► Champ électrique créé par une charge :

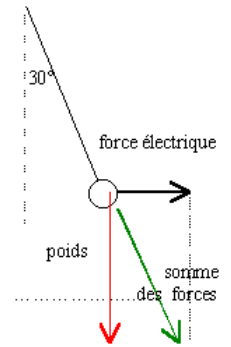
1) La charge Q_a crée en O un champ E_a de $9 \cdot 10^4$ V/m qui s'éloigne d'elle
 La charge Q_b crée en O un champ E_b de $27 \cdot 10^4$ V/m orienté vers elle.
 Les deux champs sont dans le même sens, ils s'ajoutent donc et $E = 36 \cdot 10^4$ V/m

2) Le pendule est en équilibre sous l'action de 2 forces :

- le poids $P = mg$
- la force électrostatique $F = qE$

La résultante des forces est dans la direction du fil.

On a donc : $\tan(30) = \frac{qE}{mg}$ d'où $E = 2,9 \cdot 10^4$ V/m



► Champ magnétique créé par un courant

1) $B_1 = 10 \mu\text{T}$ $B_2 = 10 \text{ mT}$ $B = B_T$ à la distance $d = 21,3 \text{ cm}$

2) Le solénoïde convient mieux, car le champ magnétique produit est uniforme à l'intérieur de la bobine

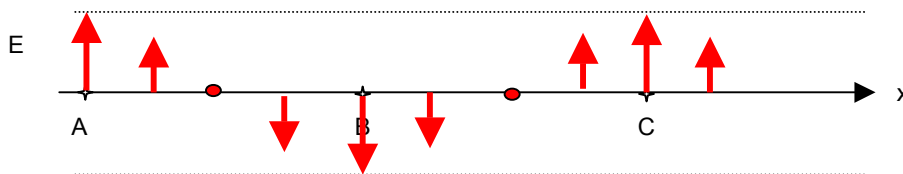
On peut prendre par exemple : $L = 4 \text{ cm}$ et $N = 636$ spires

► Champ E au voisinage d'une antenne :

1) Le champ électrique est parallèle au conducteur, donc ici horizontal, comme la polarisation.

En A le champ E est maximal dans un sens, en B il est maximal dans l'autre sens. On a donc entre AB une longueur égale à $\lambda/2 = 6,25 \text{ cm}$

2)



3) Au bout de $208 \text{ ps} = T/2$, l'onde s'est propagée d'une demi longueur d'onde et tous les vecteurs ont changé de sens.

► Circuit accordé en réception :

1) $f = c/\lambda = 164 \text{ kHz}$ $L = 2,3 \text{ mH}$ 2) $Z = R$ Z est maximale à la résonance

3) B définie à $\frac{V_{L\max}}{\sqrt{2}}$ 4) $Q_0 = \frac{R}{L\omega_0} = 10,6$ $B = \frac{f_0}{Q_0} = 15,5 \text{ kHz}$ un poil trop large

► Bilan d'une liaison radio :

1) Pour passer de 0 dBm à 10 dBm, il faut un ampli RF avec un gain de 10 dB.

2) $P = \frac{P_0}{4\pi d^2} = 8,8 \cdot 10^{-13} \text{ W/m}^2$ 3) $E_1 = \sqrt{\frac{120P}{\pi}} \times \frac{c}{f} = 4 \mu\text{V}$

4) avec deux antennes directives, on gagne 20 dB et donc un facteur 10, soit : $E_2 = 10 \cdot e = 40 \mu\text{V}$

5) Le récepteur doit faire passer le signal de $40 \mu\text{V}$ à $0,1 \text{ V}$ ce qui nécessite une amplification totale de $2500 = 68 \text{ dB} = G_R$

► Antenne de Marconi :

- 1) l'antenne est capacitive si $X < 0$ et inductive si $X > 0$
- 2) impédance résistive si $h/\lambda \approx 0,24$ soit $l = 72$ cm, la résistance vaut alors $R_0 \approx 40 \Omega$
- 3) $P_0 = U^2/R_0 = 2,5$ W
- 4) pour $h/\lambda = 0,167$ et $w/\lambda = 0,0028$, on lit sur la courbe : $R_1 \approx 10 \Omega$ et $X_1 = -130 \Omega$
soit $Z_a = 10 - j130$
- 5) le module de l'impédance vaut : $Z \approx 130 \Omega$, le courant $I = U/Z = 77$ mA
la puissance émise vaut $P_1 = R_1 \cdot I^2 = 60$ mW

Conclusion : si l'antenne n'a pas la bonne longueur, elle n'est pas à sa fréquence de résonance, et la puissance émise est bien plus faible que celle qu'on attendait. D'où l'importance d'utiliser une antenne taillée pour la fréquence de travail !

► Antenne dipôle pour la TV :

- 1) $\lambda = 45,1$ cm soit $L_0 = 22,5$ cm
- 2) pour avoir $X_a = 0$ il faut $L_0/\lambda < 0,5$! (voir courbes)
avec $d = 0,5$ cm, $\lambda/d = 90$ (on prend la courbe donnée pour $\lambda/d = 100$) soit $L_0/\lambda = 0,45$ et donc : $L_0 = 20,3$ cm
- 3) graphiquement, pour $\lambda/d = 100$, on lit : $K = 0,9$ donc $L_0 = 22,5 \times 0,9 = 20,4$ cm (on retrouve le résultat précédent)
- 4) graphiquement, pour $\lambda/d = 100$, on lit : $R_a = 55$ ohms
- 5) aux BF, L_0 diminue et $1/C\omega$ augmente, l'antenne est donc équivalente à un RC série
aux HF, L_0 augmente et $1/C\omega$ diminue, l'antenne est donc équivalente à un RL série

► Diagramme de rayonnement d'une antenne :

- 1) $\theta_E = \pm 21$ degrés $\theta_H = \pm 24$ degrés
- 2)
 - plan E : premiers lobes latéraux à ± 57 degrés, d'une amplitude de 22 dB sous le lobe principal
 - plan H : premiers lobes latéraux à ± 64 degrés, d'une amplitude de 15 dB sous le lobe principal
- 3) $P_E = 18$ dB = P_H
- 4) La protection est très bonne.

► Effet Doppler :

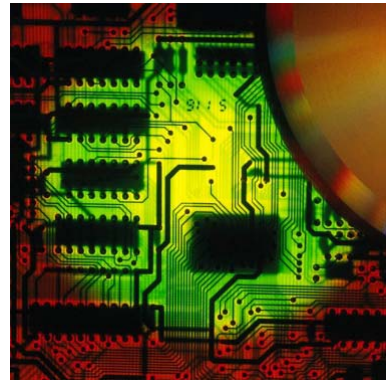
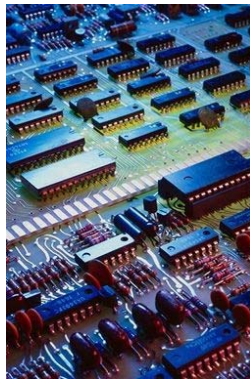
- 1) à $v = 120$ km/h, la variation de fréquence Doppler vaut : $\Delta f = 78$ Hz soit : $f_1 = 478$ Hz et $f_2 = 322$ Hz
- 2) à $v = 130$ km/h, la variation de fréquence Doppler vaut : $\Delta f = 448$ Hz soit : $f_1 = f_0 + \Delta f = 1863,000448$ MHz

La base reçoit une porteuse légèrement décalée par rapport au canal. Elle compense ce décalage en modifiant légèrement la fréquence du TCXO de 13 MHz à partir duquel est fabriqué la porteuse pour compenser l'effet Doppler.

- 3) $f_0 = c/\lambda = 6 \cdot 10^{14}$ Hz à $v = 30000$ km/h, la variation de fréquence Doppler vaut : $\Delta f = 3,33 \cdot 10^{10}$ Hz
l'observateur voit donc une fréquence de $f_1 = f_0 + \Delta f = 60003,33 \cdot 10^{10}$ Hz soit $\lambda_1 = c/f = 0,49997$ μm
Le changement de couleur est si faible qu'il n'est pas visible

4) Si toutes les raies sont décalées vers le rouge, cela veut dire que toutes les galaxies s'éloignent de la nôtre. Cette constatation a donné naissance à la théorie de l'expansion de l'univers.

Questionnaire



jean-philippe muller



Questions

1 Transformation d'un signal électrique en onde électromagnétique :

- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) une antenne transforme un signal électrique en onde électromagnétique | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) une antenne prévue pour l'émission ne peut pas servir pour la réception | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) il circule un courant dans l'antenne | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) le courant dans une antenne est plus intense à l'émission qu'à la réception | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) une antenne d'émission a des pertes Joules, et peut donc chauffer | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) c'est parce qu'une antenne d'émission chauffe qu'on l'installe à l'extérieur | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g) l'impédance d'une antenne 50Ω peut se mesurer à l'ohmmètre | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

2 A 200 mètres d'une antenne verticale parcourue par un courant $i(t)$ de fréquence 4 MHz :

- | | Vrai | Faux |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) l'OEM est composée parfois d'un champ E, parfois d'un champ B, parfois des 2 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) le champ E varie à la fréquence de 4 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) les variations des vecteurs E et B sont déphasées de 90° | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) les vecteurs E et B ont des directions perpendiculaires | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) les intensités de E et B ne dépendent que de la distance à l'antenne | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) l'OEM est caractérisée par une longueur d'onde de 7,5 m | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g) deux points où le champ E est maximal à un instant donné sont séparés de 75 m | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

3 Les sources de rayonnement électromagnétique :

- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) un courant variable circulant dans un fil produit toujours une OEM en son voisinage | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) il est impossible de ne pas créer d'OEM autour d'un circuit sans blindage | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) le blindage est un composant important dans les équipements radio | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) nous baignons en permanence dans un grand nombre d'OEM | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) pour être à l'abri de ces OEM, il faudrait éteindre tous les émetteurs du monde entier | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

4 La lumière est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre $0,4\mu\text{m}$ (lumière bleue) et $0,8\mu\text{m}$ (lumière rouge).

- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) la fréquence correspondant à la lumière bleue est de 750 GHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) le soleil, le corps humain, un fer à repasser sont des sources d'OEM | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) le corps humain est sensible aux ondes électromagnétiques | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

5 Un émetteur de puissance $P_o = 0,4 \text{ W}$ et de fréquence 100 MHz produit une OEM par une antenne isotrope (qui n'existe pas dans la réalité). L'OEM se propage sans aucun obstacle. Un observateur placé à 200 m de cet émetteur fait les observations suivantes :

- | | Vrai | Faux |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) la densité de puissance vaut $0,8 \mu\text{W}/\text{m}^2$ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) le champ électrique mesuré vaut 173 mV/m | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) le champ magnétique mesuré vaut 57,7 pT | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) la longueur d'onde vaut 3 m | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) la portée de l'émetteur ne dépasse pas 100λ soit 300 m | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

6 Ce même émetteur ($0,4\text{W} / 100 \text{ MHz}$) émet maintenant avec une antenne directive dont le gain vaut $G = 4 \text{ dBi}$ par rapport à l'antenne isotrope, et le signal est reçu par l'observateur, toujours à une distance de 200 m, avec une antenne identique. La résistance d'entrée du récepteur est de 50Ω :

- | | Vrai | Faux |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) la puissance émise vaut 26 dBm | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) d'après la formule de Friis, la puissance reçue vaut $-24,5 \text{ dBm}$ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) la tension à l'entrée du récepteur vaut 1,3 mV | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) le récepteur ayant une sensibilité de -67 dBm , la réception n'est pas possible | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) cette sensibilité correspond à un niveau d'entrée minimal de $100 \mu\text{V}$ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) avec ce récepteur, la limite de réception ou portée théorique sera de 26,6 km | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

7 Cette petite antenne, fabriquée à partir d'un connecteur :



- | | Vrai | Faux |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) rayonne surtout vers le haut | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) émet en polarisation verticale | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) a une fréquence de travail de l'ordre de 10 MHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) a une fréquence de travail de l'ordre de 3 GHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

8 Une fusée de construction amateur est équipée d'une liaison radio pour transmettre au sol des données (position GPS, température, pression etc...).

L'émetteur est équipé d'une antenne quart-d'onde (longueur $\lambda/4$) enrobée de matière plastique noire :



photo 1

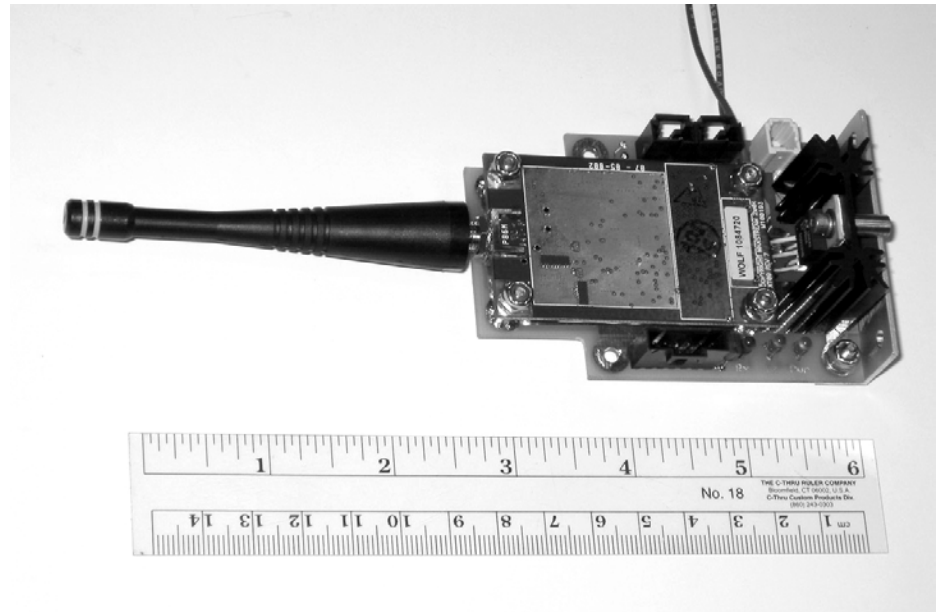
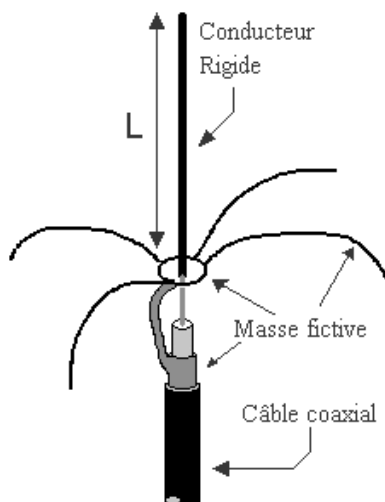


photo 2 - règle en inches (haut) et en cm (bas)

- a) la longueur de l'antenne est d'environ 3 cm
- b) cette antenne est taillée pour une longueur d'onde d'environ 33 cm
- c) le module émet dans la bande ISM (Industrial, Scientific & Medical) 433-434 MHz
- d) le module émet dans la bande ISM (Industrial, Scientific & Medical) 902-928 MHz

| | Vrai | Faux |
|----|--------------------------|--------------------------|
| a) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

9 On veut construire une antenne quart-d'onde pour un récepteur de télécommande à 433,92 MHz :



- a) la longueur d'onde de travail est de 6,91 cm
- b) l'antenne doit avoir une longueur de $L = 6,91$ cm
- c) l'antenne doit avoir une longueur de $L = 69,1$ cm
- d) cette antenne rayonne surtout horizontalement

| | Vrai | Faux |
|----|--------------------------|--------------------------|
| a) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |



Réponses

| N° | Réponses justes | Commentaires |
|----|-----------------|---|
| 1 | a, c, d, e | <p>b) une antenne peut, en général, servir à l'émission et à la réception, sauf pour les émissions de forte puissance qui nécessitent des antennes supportant des courants importants</p> <p>f) on installe les antennes à l'extérieur pour éviter les pertes dues à l'absorption de l'onde par les murs</p> <p>g) l'impédance d'une antenne dépend de la fréquence, elle ne vaut 50Ω qu'à sa fréquence de travail, il faut donc mesurer son impédance à cette fréquence et pas en continu comme le ferait un ohmmètre</p> |
| 2 | b, d, g | <p>a) une OEM est toujours composée d'un champ E et d'un champ B</p> <p>c) E et B sont en phase</p> <p>e) une antenne ne rayonne jamais de la même façon dans toutes les directions</p> <p>f) $\lambda = c/f = 75 \text{ m}$</p> |
| 3 | a, b, c, d | e) il resterait les OEM créées par tous les circuits électriques (installations 50Hz, équipements non blindés, installations industrielles ...) et celles créées par le soleil, les planètes comme Jupiter et les étoiles |
| 4 | b, c | <p>a) la fréquence de la lumière bleue est de 750 000 GHz</p> <p>b) le soleil, le corps humain, un fer à repasser émettent des infrarouges qui font aussi partie des OEM</p> <p>c) le corps est sensible à la lumière (yeux) et aux infrarouges (peau)</p> |
| 5 | a, c, d | <p>b) $E = 17,3 \text{ mV/m}$</p> <p>e) la portée dépend de la sensibilité du récepteur et n'a rien à voir avec la longueur d'onde</p> |
| 6 | a, b, e, f | <p>c) $-24,5 \text{ dBm} = 13,3 \text{ mV}$</p> <p>d) la réception est possible puisque le niveau du signal reçu est bien supérieur à la sensibilité du récepteur</p> |
| 7 | b, d | <p>a) un brin vertical rayonne le maximum de puissance dans le plan horizontal très peu vers le haut et vers le bas</p> <p>c) d) la longueur du brin actif et des brins constituant le plan de masse est de l'ordre de 2,5 cm, ce qui correspond à $\lambda = 10 \text{ cm}$ environ, soit une fréquence de travail de l'ordre de 3 GHz</p> |
| 8 | b, d | <p>a) b) on mesure $\lambda/4 \approx 8 \text{ cm}$, soit $\lambda \approx 32 \text{ cm}$</p> <p>c) d) l'antenne est donc taillée pour une fréquence $f = c/\lambda \approx 900 \text{ MHz}$</p> |
| 9 | d | a) b) c) $\lambda = c/f = 69,1 \text{ cm}$ l'antenne de type quart-d'onde doit donc avoir une longueur $L = \lambda/4 = 17,3 \text{ cm}$ |