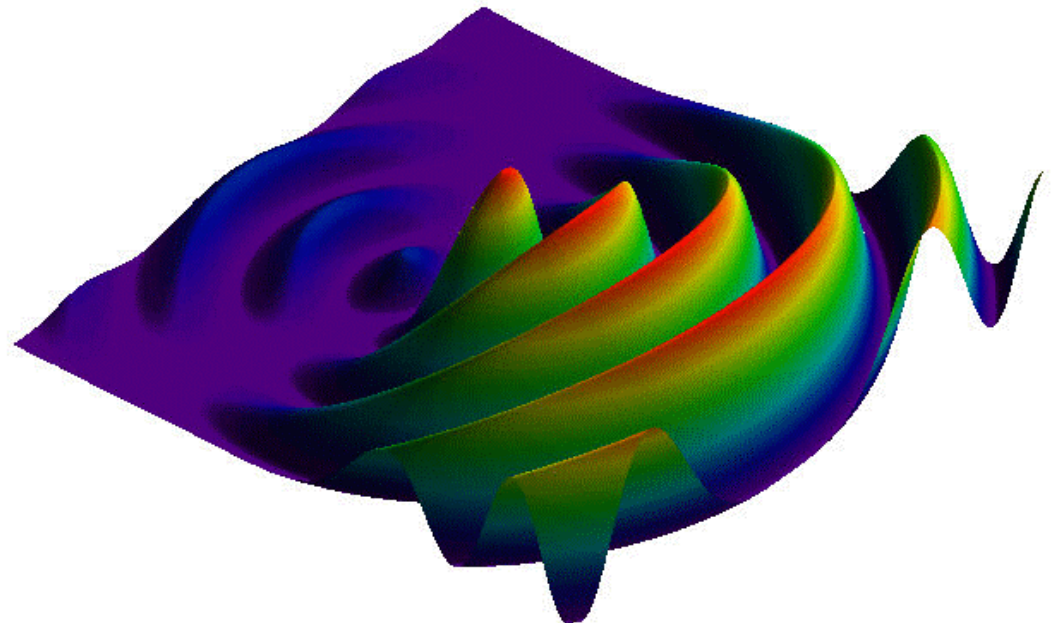




# Les antennes

- fonctionnement et propriétés
- les différents modèles





## ■ Première partie : fonctionnement et propriétés

- 1- Le rôle de l'antenne
- 2- Courant dans une antenne
- 3- Que rayonne une antenne ?
- 4- La longueur d'onde
- 5- Faut-il une antenne pour émettre ?
- 6- Rayonnement et blindage
- 7- Caractéristiques d'une onde plane
- 8- Rayonnement d'une antenne isotrope
- 9- Gain d'une antenne directive
- 10- Les diagrammes de directivité
- 11- Critères de choix d'une antenne
- 12- Champ créé par une antenne directive
- 13- Bilan de puissance d'une liaison
- 14- Exemple de calcul de tension reçue
- 15- La PIRE d'un satellite
- 16- Portée d'un émetteur
- 17- Exemple de calcul de portée
- 18- L'antenne en réception

## ■ Deuxième partie : les différents modèles

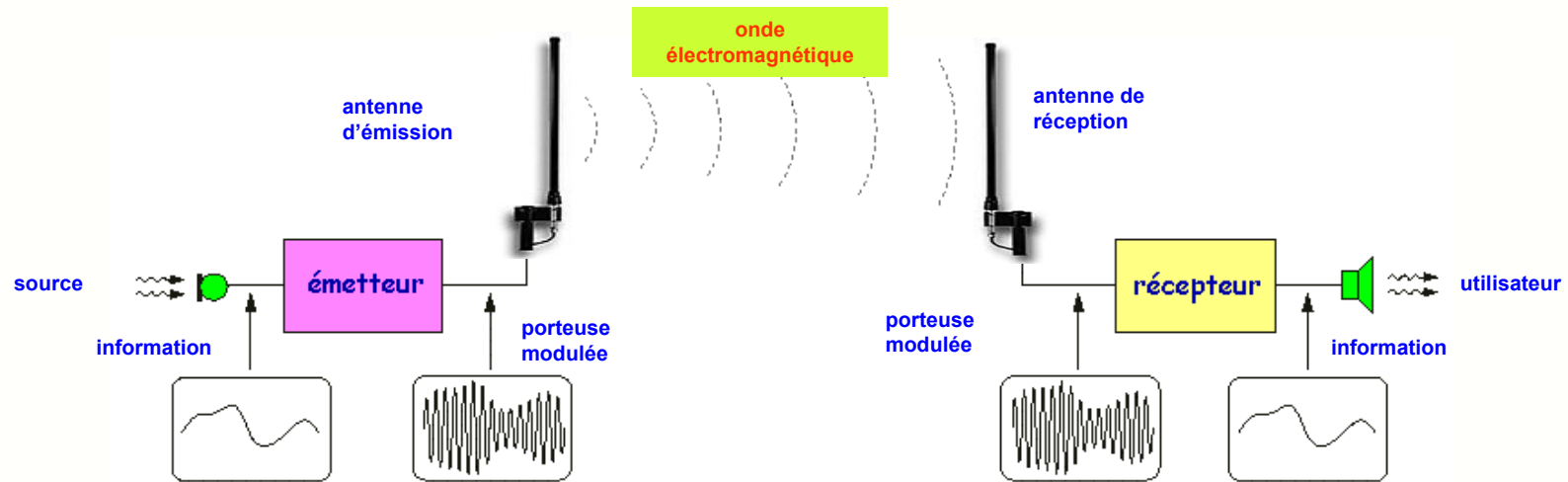
- 19- L'antenne dipôle demi-onde
- 20- Caractéristiques électriques du dipôle
- 21- Influence de la longueur des brins
- 22- Champ créé par l'antenne dipôle
- 23- Diagramme de rayonnement du dipôle
- 24- L'antenne Yagi
- 25- Le dipôle replié
- 26- L'antenne dipôle avec réflecteur
- 27- L'antenne quart-d'onde
- 28- Le rôle du plan de masse
- 29- L'antenne ground-plane
- 30- Les antennes quasi quart-d'onde
- 31- Champs créés par une antenne quart-d'onde
- 32- L'antenne guide d'onde
- 33- Liaison radio avec une antenne guide d'onde
- 34- L'antenne à cornet
- 35- L'antenne à réflecteur parabolique
- 36- Réalisations d'antennes paraboliques
- 37- L'antenne cadre aux basses-fréquences
- 38- Antenne filaire ou antenne cadre ?
- 39- Les antennes patch
- 40- Les assemblages de patches
- 41- Répartition des courants dans une antenne patch
- 42- Champ magnétique produit par une antenne patch
- 43- Autres types d'antennes



# 1- Le rôle de l'antenne



Un système de communication radio transmet des informations par l'intermédiaire d'une onde électromagnétique (OEM) :



- l'antenne d'émission reçoit le signal électrique de l'émetteur et produit l'onde électromagnétique
- cette OEM se propage dans l'espace autour de l'antenne d'émission
- en fonction du type et de la forme d'antenne utilisées, certaines directions de propagation peuvent être privilégiées
- la puissance produite par l'émetteur et appliquée à l'antenne se disperse dans l'espace
- l'antenne de réception capte une faible partie de cette puissance et la transforme en signal électrique
- ce signal électrique est appliqué à l'entrée du récepteur qui en extrait l'information transmise

**Remarque :** les phénomènes physiques mis en jeu dans l'antenne étant réversibles, le même dispositif peut servir pour l'émission et pour la réception, sauf dans le cas des émissions de forte puissance.



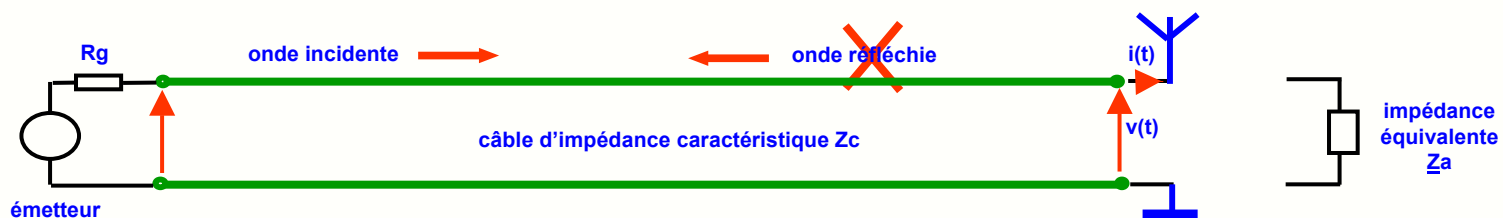
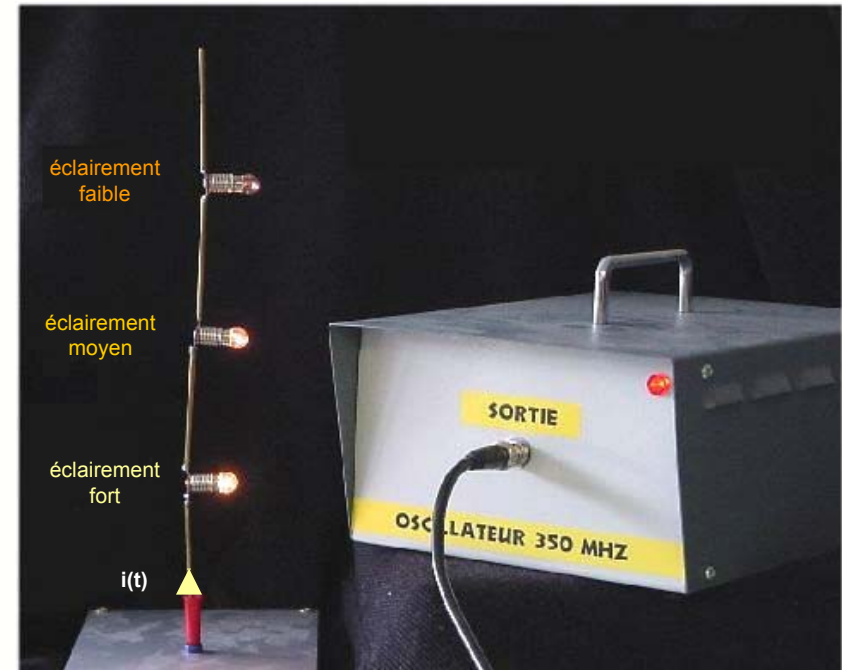
## 2- Courant dans une antenne



L'émetteur produit une **porteuse sinusoïdale** modulée à la fréquence  $f$  qui est conduite à l'antenne par un câble coaxial.

L'antenne est alors parcourue par un courant  $i(t)$  ayant les caractéristiques suivantes :

- le courant  $i(t)$  est sinusoïdal à la fréquence de la porteuse
- le courant n'a pas la même intensité en tout point
- ce courant peut occasionner des pertes Joule si les matériaux utilisés sont de mauvaise qualité
- alimentée par la tension  $v(t)$  et absorbant un courant  $i(t)$ , l'antenne présente donc une **impédance équivalente  $Z_a$**
- cette impédance dépend toujours de la fréquence, elle est **résistive** pour certaines longueurs uniquement
- pour que toute la puissance fournie par l'émetteur soit rayonnée, il faut **adapter** le câble en sortie, ce qui supprime l'onde réfléchie
- souvent le câble a une impédance  $Z_c = 50$  ohms, on s'efforce donc de fabriquer des **antennes d'impédance 50 ohms**



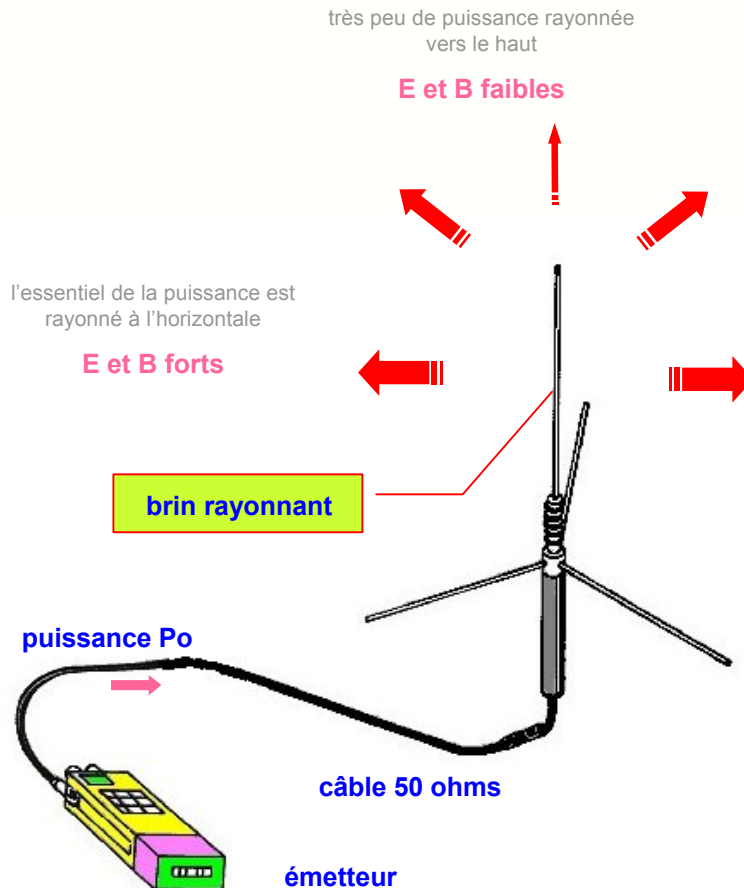


### 3- Que rayonne une antenne ?

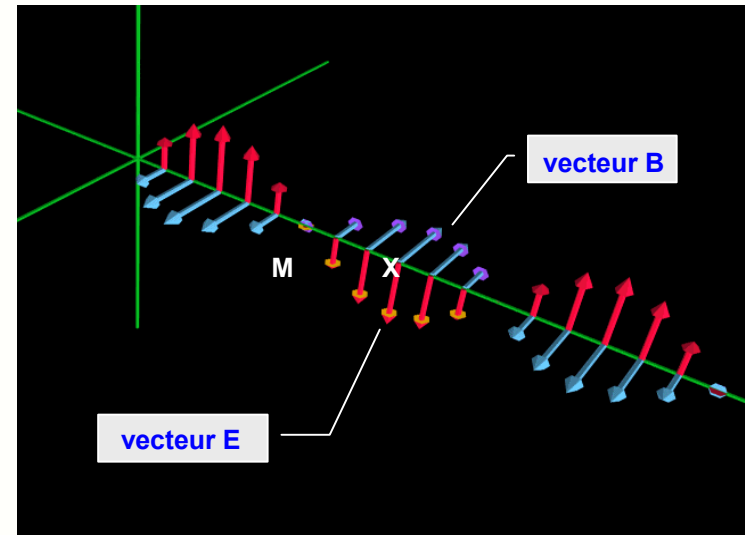


Le courant qui circule dans le brin rayonnant produit dans son voisinage une onde électromagnétique :

- l'OEM est constituée d'un **champ électrique E** et d'un **champ magnétique B**
- les vecteurs E et B existent en tout point M autour de l'antenne et oscillent au rythme du courant et donc de la porteuse
- leur module n'est pas le même partout et dépend du type d'antenne utilisé et de la position du point de mesure M



Vidéo : variations de E et B le long d'un axe





## 4- La longueur d'onde



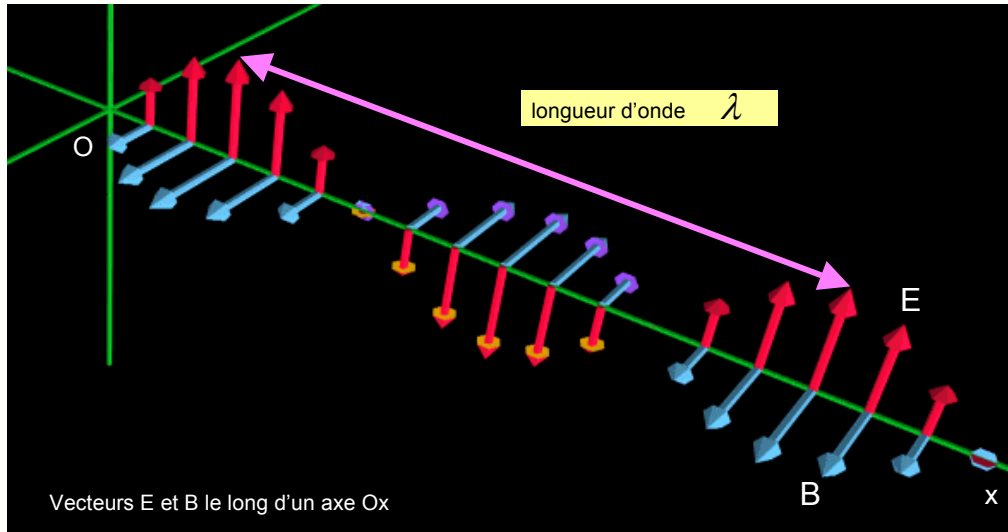
A un instant donné, la répartition des champs le long d'un axe est sinusoïdale, et la distance entre deux maxima est la **longueur d'onde** :

La longueur d'onde est liée à la fréquence  $f$  de la porteuse par :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

avec

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 300000 \text{ km/s}$$

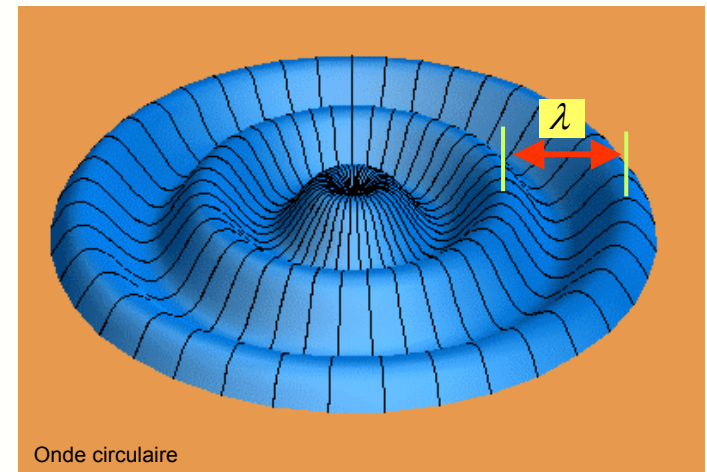


E et B sont deux ondes progressives :

$$\begin{cases} E(t) = E \cos \omega(t - \frac{x}{c}) \\ B(t) = B \cos \omega(t - \frac{x}{c}) \end{cases}$$

Quelques repères :

- fréquence : **1 kHz**      longueur d'onde : **300 km**
- fréquence : **1 MHz**      longueur d'onde : **300 m**
- fréquence : **100 MHz**      longueur d'onde : **3 m**
- fréquence : **10 GHz**      longueur d'onde : **3 cm**



**Remarque** : si la **longueur d'onde** n'a rien à voir avec la **portée** d'un émetteur, elle est par contre liée aux **dimensions** de l'antenne



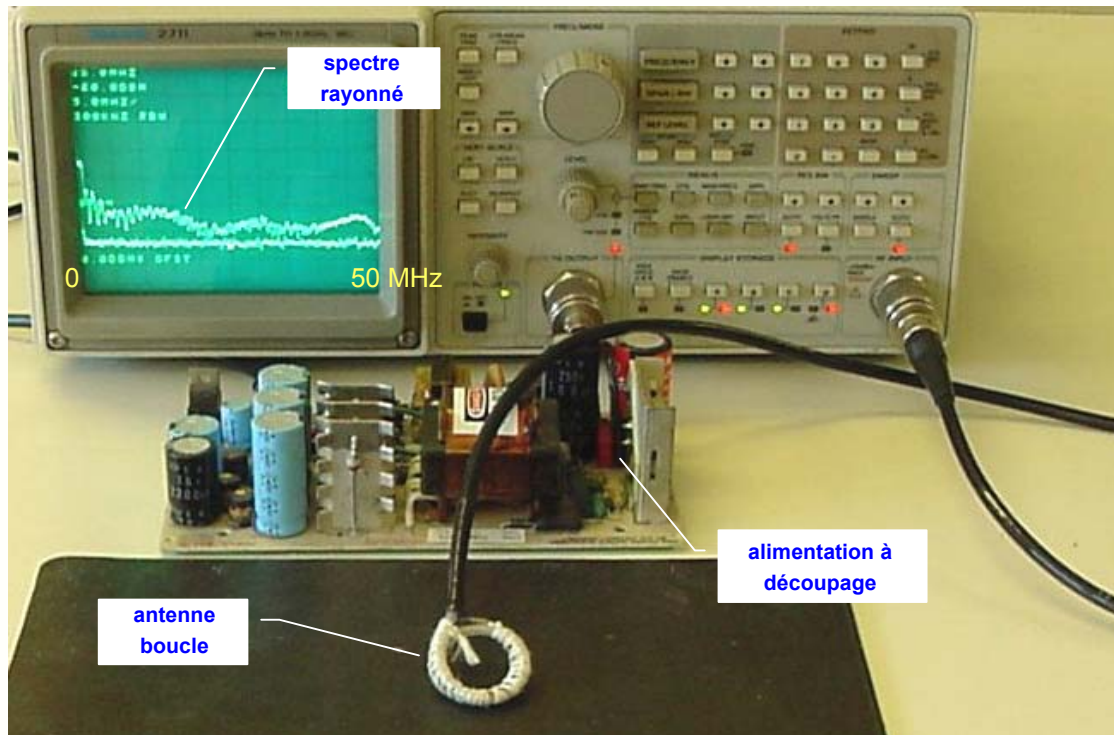
## 5- Faut-il une antenne pour émettre ?



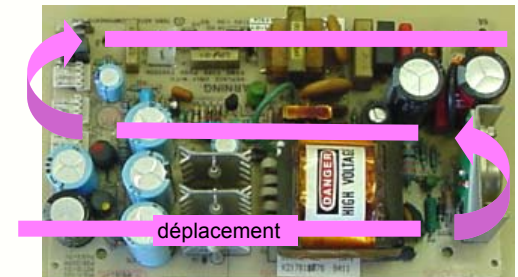
En calculant les tensions et les courants dans un montage, on s'intéresse à ce qui se passe **dans le circuit**, et on oublie souvent les phénomènes importants qui se passent **autour du circuit**, or :

- chaque portion d'un circuit placée à un certain potentiel crée un **champ électrique** en son voisinage
- chaque branche d'un circuit parcourue par un courant constant produit un **champ magnétique** en son voisinage
- chaque portion d'un circuit parcourue par un courant variable produit un **champ électromagnétique** en son voisinage

**Résultat** : un montage électronique produit donc toujours en son voisinage une onde électromagnétique



- l'antenne boucle formée de 2 spires est sensible au champ magnétique B
- en déplaçant la boucle à quelques cm au-dessus du montage, on visualise le rayonnement d'une zone du circuit



- ce rayonnement parasite doit toujours être rendu minimal par le concepteur de la carte

**Vidéo** : spectre rayonné par l'alimentation à découpage entre 0 et 50 MHz en fonction de la position de la sonde

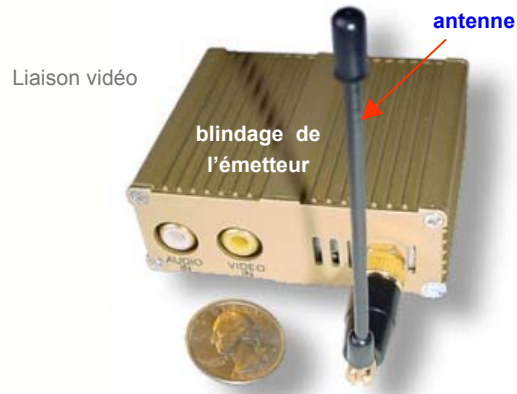


## 6- Rayonnement et blindage

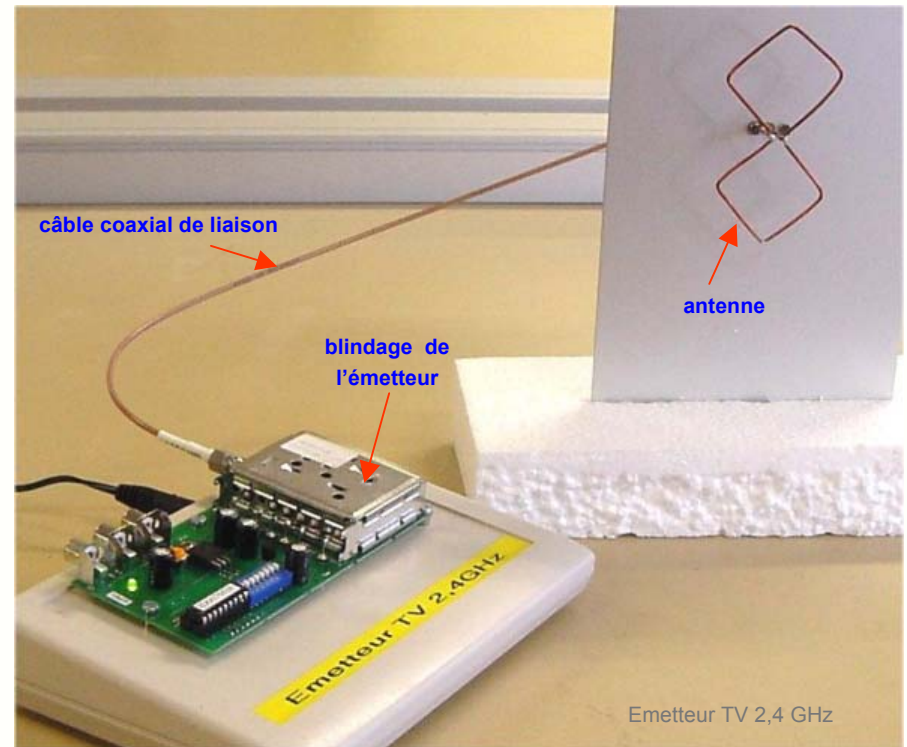


Dans un système de transmission radio, c'est **l'antenne qui doit rayonner** l'onde électromagnétique :

- les circuits d'émissions sont donc placés dans un boîtier métallique servant de **blindage** et empêchant tout rayonnement parasite
- ce rayonnement parasite est inutile et risque de perturber les autres parties de l'équipement, en particulier les circuits logiques
- ce blindage isole aussi l'émetteur des influences extérieures qui pourraient affecter la fréquence ou le niveau de l'émission
- si l'antenne est déportée, la porteuse modulée y est conduite à l'antenne par un **câble coaxial** qui ne rayonne pas non plus



Module Bluetooth



**Règle :** on évite les fuites d'OEM au niveau du circuit émetteur et on blinde soigneusement le chemin du signal jusqu'à l'antenne



## 7- Caractéristiques d'une onde plane



Si on se trouve dans une zone située assez loin de l'antenne, les champs E et B ont des propriétés simples :

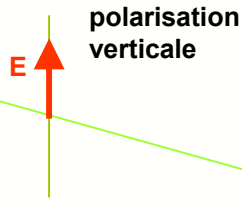
- le vecteur E a le même **module en tout point d'un plan** perpendiculaire à la propagation, E et B sont liés par :
- le vecteur **E est perpendiculaire à B**, l'onde est dite **plane**
- les 2 vecteurs E et B sont perpendiculaires à la direction de propagation
- E et B varient **en phase**, les plans où E et B sont maximum avancent à la **vitesse c de la lumière**

$$E = c \cdot B$$

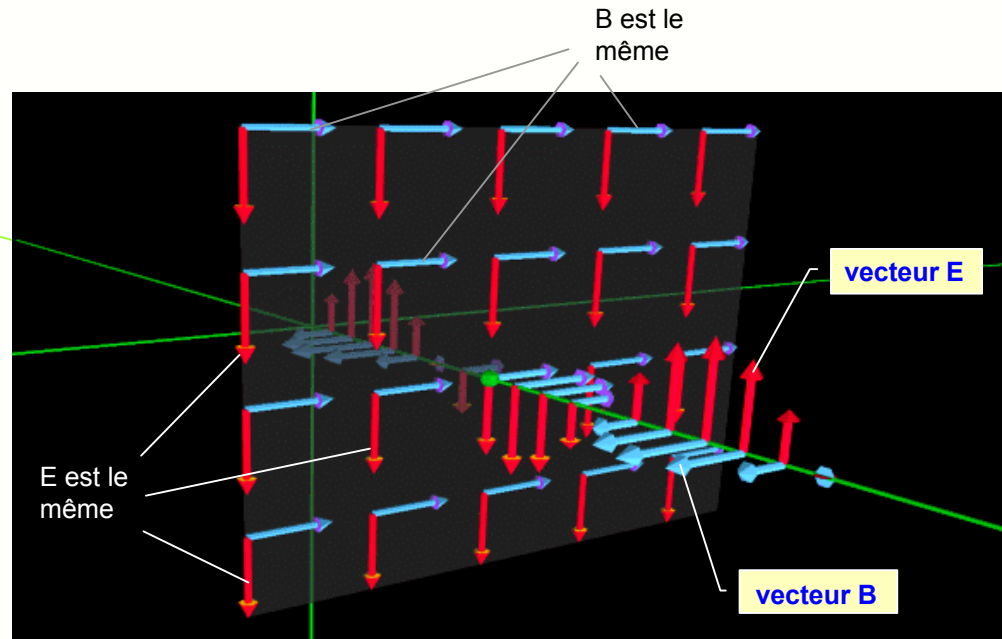
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



antenne d'émission



direction de propagation



**Remarque** : la direction du brin rayonnant correspond à celle du champ électrique et est appelée **polarisation**. Avec l'antenne verticale de la figure ci-dessus, la polarisation est **verticale**.

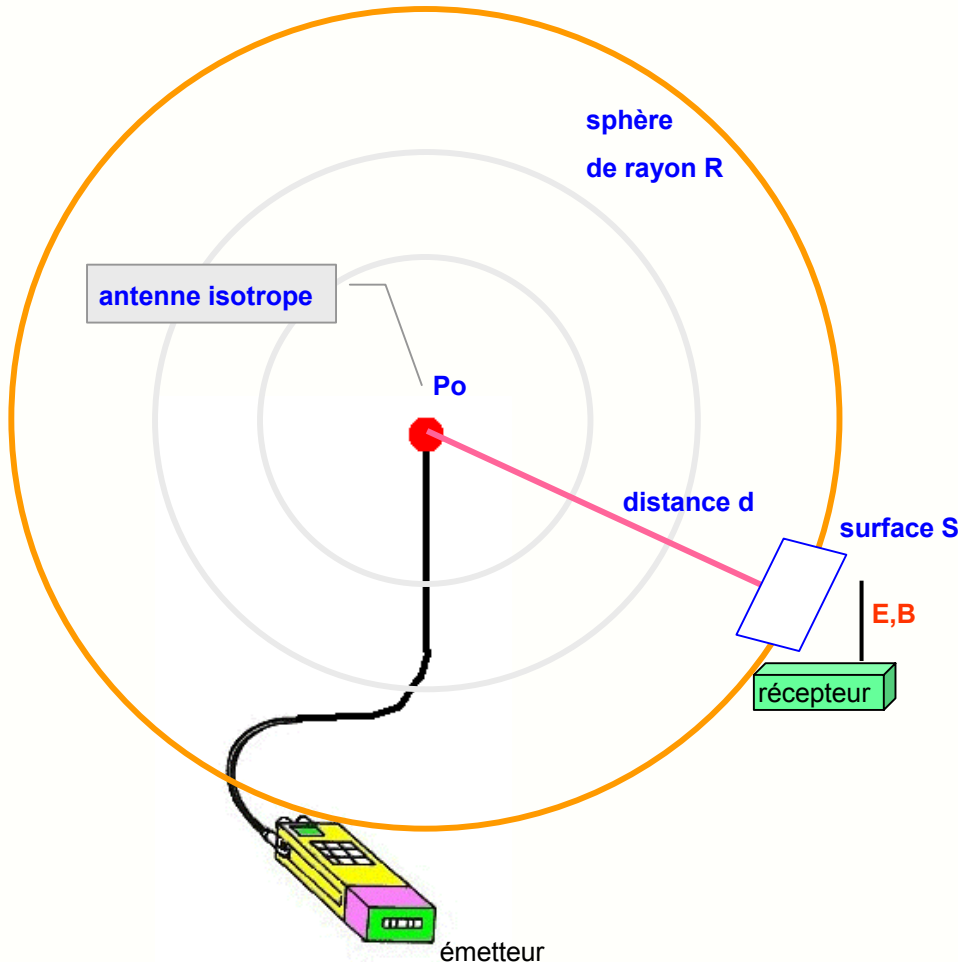


## 8- Rayonnement d'une antenne isotrope



L'antenne qui rayonne la puissance  $P_0$  de l'émetteur uniformément dans toutes les directions s'appelle **antenne isotrope**.

On **ne sait pas réaliser** une telle antenne en pratique, mais elle est commode pour servir d'étalon pour tester les antennes réelles.



- la surface  $S$  de la sphère de rayon  $d$  s'écrit :

$$S = 4\pi d^2$$

- la puissance émise  $P_0$  se répartissant sur cette sphère, une surface  $S$  reçoit 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 la densité de puissance en un point est liée au module du champ électrique  $E$  par :

$$P = \frac{E^2}{120\pi}$$

- on en déduit donc le champ  $E$  au niveau du récepteur :

$$E = \sqrt{120\pi P} = \frac{\sqrt{30 \cdot P_0}}{d} \quad \text{en } V/m$$

**Application** : un émetteur de 10W produit à 5 km un champ

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_0}}{d} = \frac{\sqrt{30 \cdot 10}}{5000} = 3,46 \text{ mV/m}$$

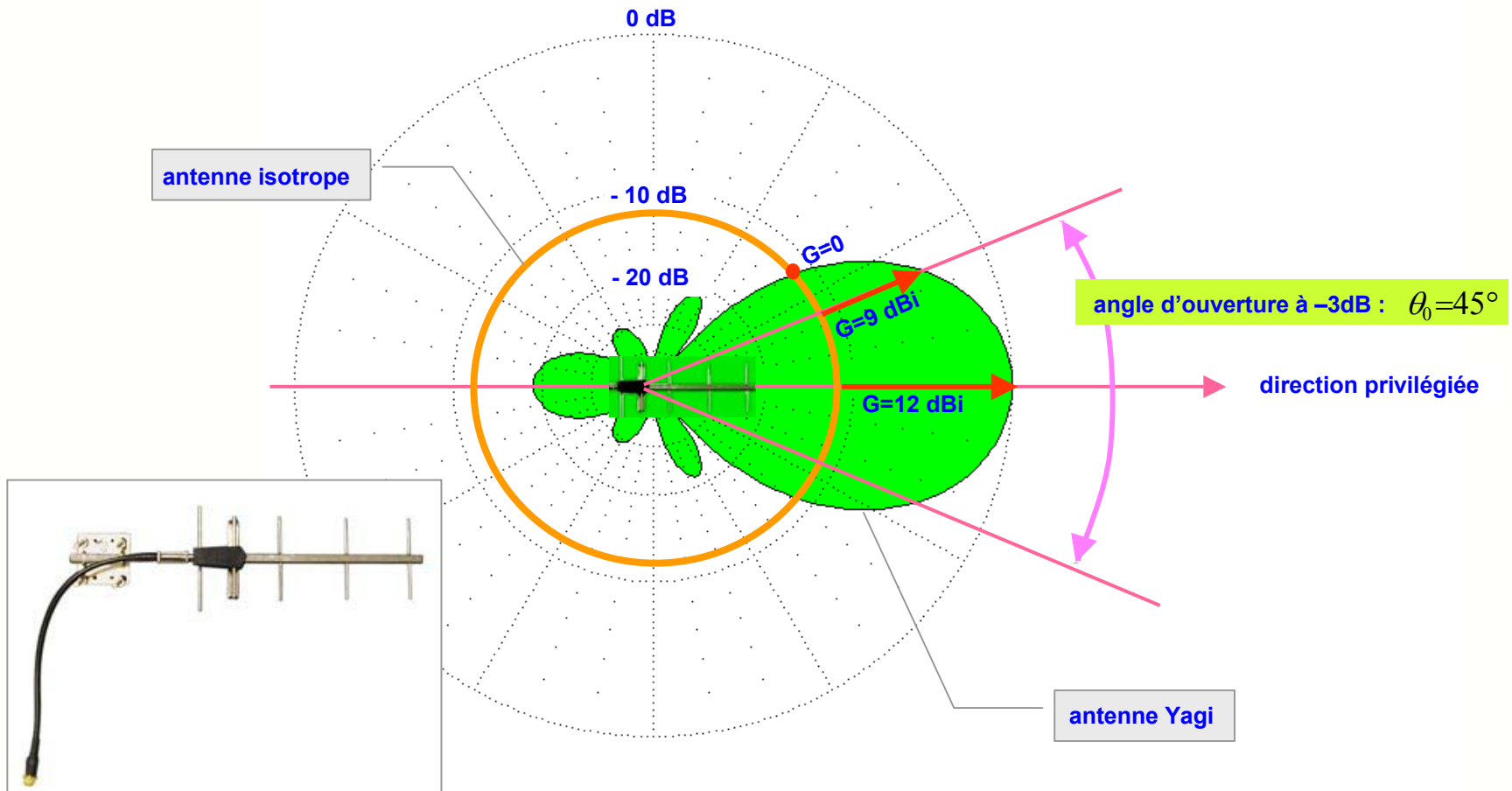


## 9- Gain d'une antenne directive



Une antenne est un composant passif, elle ne peut donc pas amplifier le signal. Mais par une disposition particulière des brins rayonnants, elle peut **concentrer** la puissance  $P_o$  émise dans une direction privilégiée :

- une antenne directive a un **gain G positif** par rapport à une antenne isotrope dans la direction privilégiée
- ce gain G est mesuré par rapport à l'antenne isotrope et est exprimé en **dBi**
- la directivité est caractérisée par **l'angle d'ouverture à -3dB**



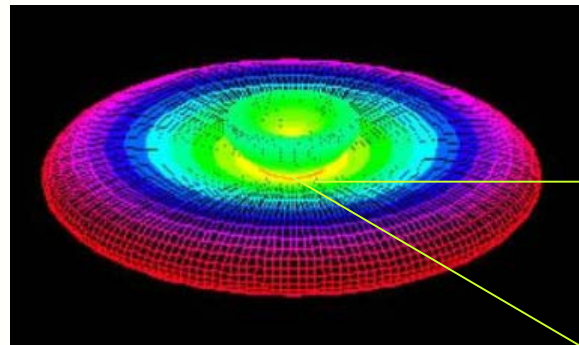
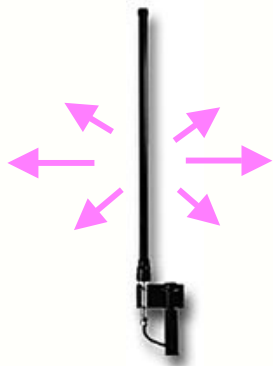


## 10- Les diagrammes de directivité



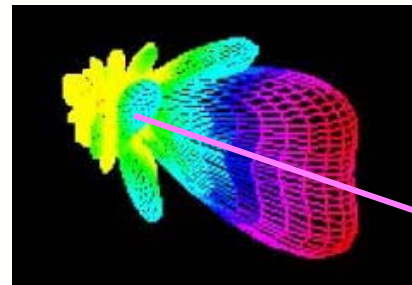
Chaque type d'antenne est caractérisé par une courbe de rayonnement spécifique qui peut être :

- **omnidirectionnelle** pour les liaisons d'une base vers des récepteurs mobiles ( radiodiffusion, téléphone GSM ... )
- **directive** pour les liaisons point-à-point ( faisceau hertzien, liaison satellite-station terrestre ... )



émission privilégiée dans le plan horizontal

- un brin vertical rayonne sur **360 °**
- une Yagi pour la TV terrestre a un angle d'ouverture entre **10 et 30 °**
- la parabole a un angle d'ouverture de **quelques degrés** seulement



direction d'émission privilégiée

**Remarque** : les antennes à **gain élevé** sont toujours **très directives**, puisqu'elles concentrent le faisceau dans une zone très limitée.

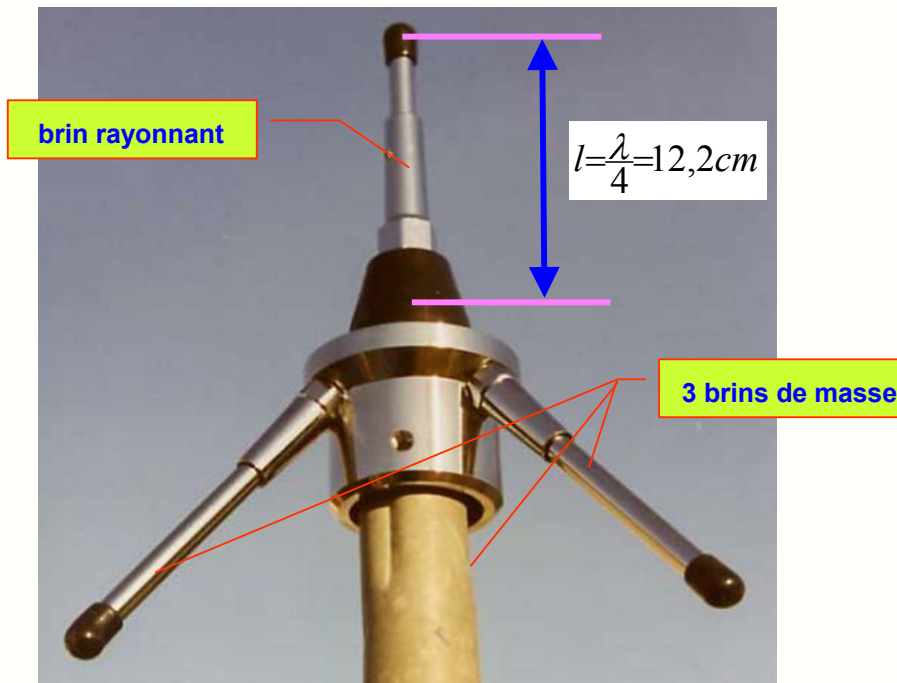


# 11- Critères de choix d'une antenne



Pour choisir un modèle d'antenne pour une application donnée, il faut veiller aux principaux points suivants :

- **fréquence de travail** : une antenne est construite pour une fréquence ou une gamme de fréquences donnée
- **directivité** : elle peut être omnidirectionnelle (brin vertical) ou directive (Yagi, parabole...)
- **gain** : les meilleurs gains sont obtenus avec des antennes très directives, jusqu'à plus de 50 dB pour les grandes paraboles
- **impédance** : adaptée à celle du câble soit en général 50 ohms sauf pour la télévision qui travaille en 75 ohms
- **puissance** : pour l'émission, l'antenne doit accepter la puissance de l'émetteur sans trop de pertes Joule



## Caractéristiques :

- **type** : Ground Plane ¼ d'onde
- **fréquence** : 616 MHz
- **impédance** : 50 ohms
- **rayonnement** : omnidirectionnel (dans un plan horizontal)
- **gain** : 2,15 dBi
- **polarisation** : verticale
- **puissance maximale** : 200 W
- **ROS** : < 1,2
- **connecteur** : UHF femelle
- **masse** : 0,9 kg

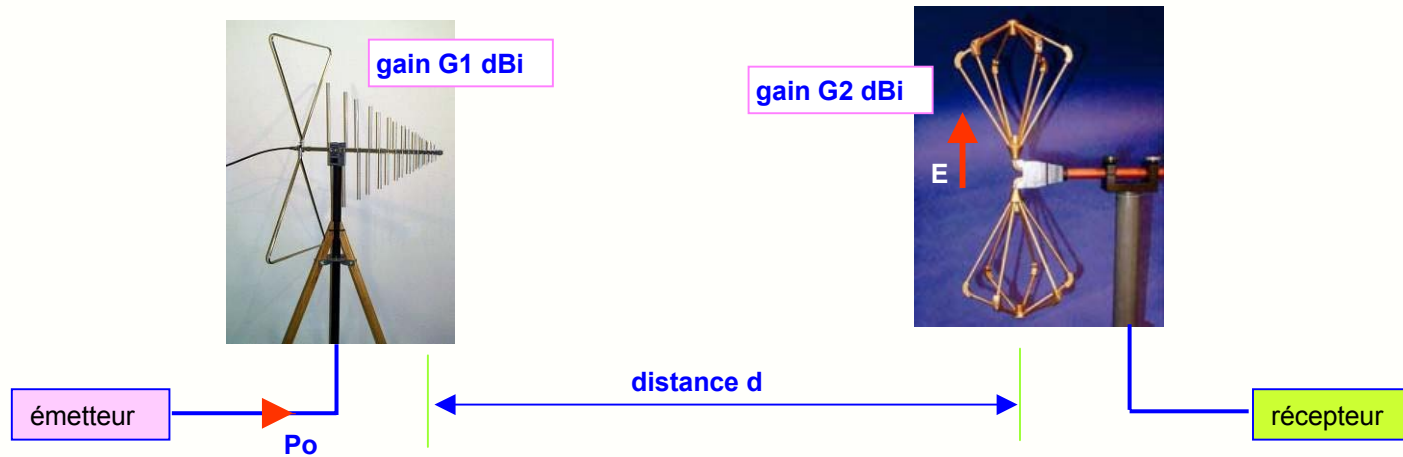
**Remarque** : si le constructeur donne un **R**apport d'**O**ndes **S**tationnaires, c'est que l'impédance ne vaut pas rigoureusement 50 ohms.



## 12- Champ créé par une antenne directive



Lorsqu'on établit une liaison radio entre deux points éloignés d'une distance  $d$ , on peut évaluer l'intensité du champ électrique  $E$  au niveau de l'antenne de réception :



- avec une antenne d'émission isotrope, une surface  $S$  au niveau du récepteur reçoit une densité de puissance :

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

- comme l'antenne d'émission a un gain  $G_1$  dans la direction utile, la densité de puissance devient :

$$P = \frac{G_1 P_0}{S} = \frac{G_1 P_0}{4\pi d^2}$$

- le champ électrique  $E$  au niveau du récepteur devient donc :

$$E = \sqrt{120\pi P} = \frac{\sqrt{30 \cdot G_1 P_0}}{d} \text{ en } V/m$$

**Application** : avec un gain  $G_1 = 12 \text{ dBi} = 15,8$  un émetteur de 10W produit à 5 km un champ

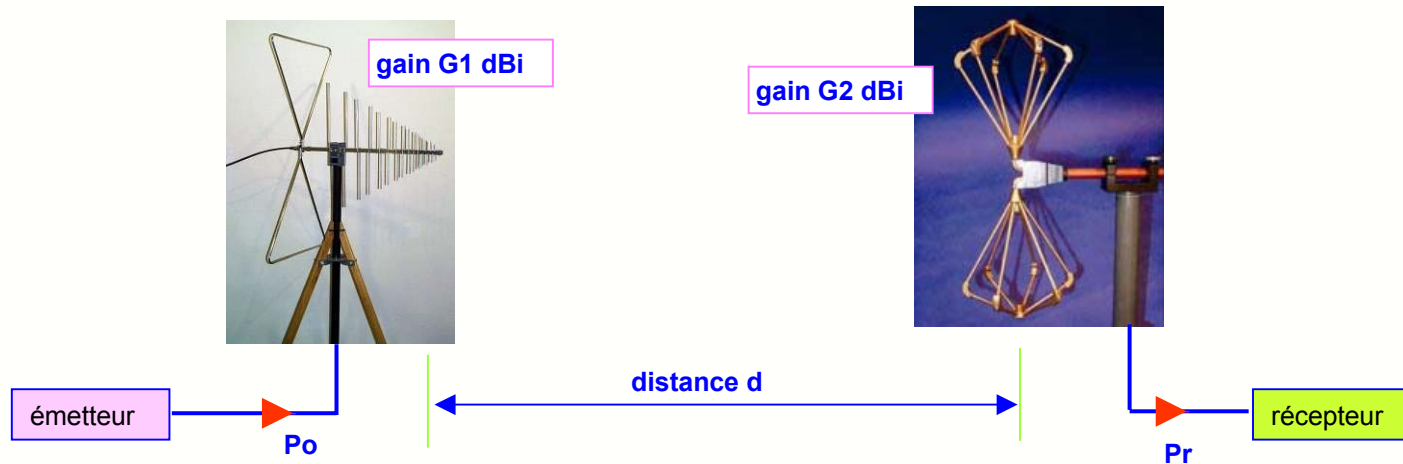
$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot 15,8 \cdot 10}}{5000} = 13,8 \text{ mV/m}$$



# 13- Bilan de puissance de la liaison



La puissance  $P_r$  du signal capté par l'antenne et envoyée à l'entrée du récepteur se calcule grâce à la **formule de Friis** :



la densité de puissance au niveau de l'antenne de réception s'écrit :  $P = \frac{G_1 P_o}{S} = \frac{G_1 P_o}{4\pi d^2}$  en  $W/m^2$

l'antenne de réception caractérisée par sa surface effective  $A_2$  reçoit une puissance :  $P_r = A_2 \cdot P$  avec  $A_2 = G_2 \frac{\lambda^2}{4\pi}$

la puissance reçue  $P_r$  vaut donc :  $P_r = G_1 \cdot G_2 \cdot P_o \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2$  en  $W$  c'est la **formule de Friis**

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

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

↑ en dBm   
 ↑ en dBi   
 ↑ en Hz   
 ↑ en m



## 14- Exemple de calcul de tension reçue



Le satellite géostationnaire Météosat situé à  $d = 36000 \text{ km}$  d'altitude au-dessus du golfe de Guinée émet vers l'Europe des images de la couverture nuageuse :

- le satellite émet une puissance  $P_0 = 6 \text{ W} = 37,8 \text{ dBm}$
- il est équipé d'une antenne de gain  $G_1 = 11 \text{ dBi} = 12,6$
- la parabole de réception a un gain  $G_2 = 25 \text{ dBi}$
- la fréquence d'émission est  $f = 1691 \text{ MHz}$  (canal 1)

- la **densité de puissance  $P$**  au niveau du sol est de :

$$P = \frac{G_1 P_0}{4\pi d^2} = \frac{12,6 \cdot 6}{4\pi (36 \cdot 10^3)^2} = 4,65 \text{ fW}$$

- le **champ électrique  $E$**  à l'antenne de réception vaut :

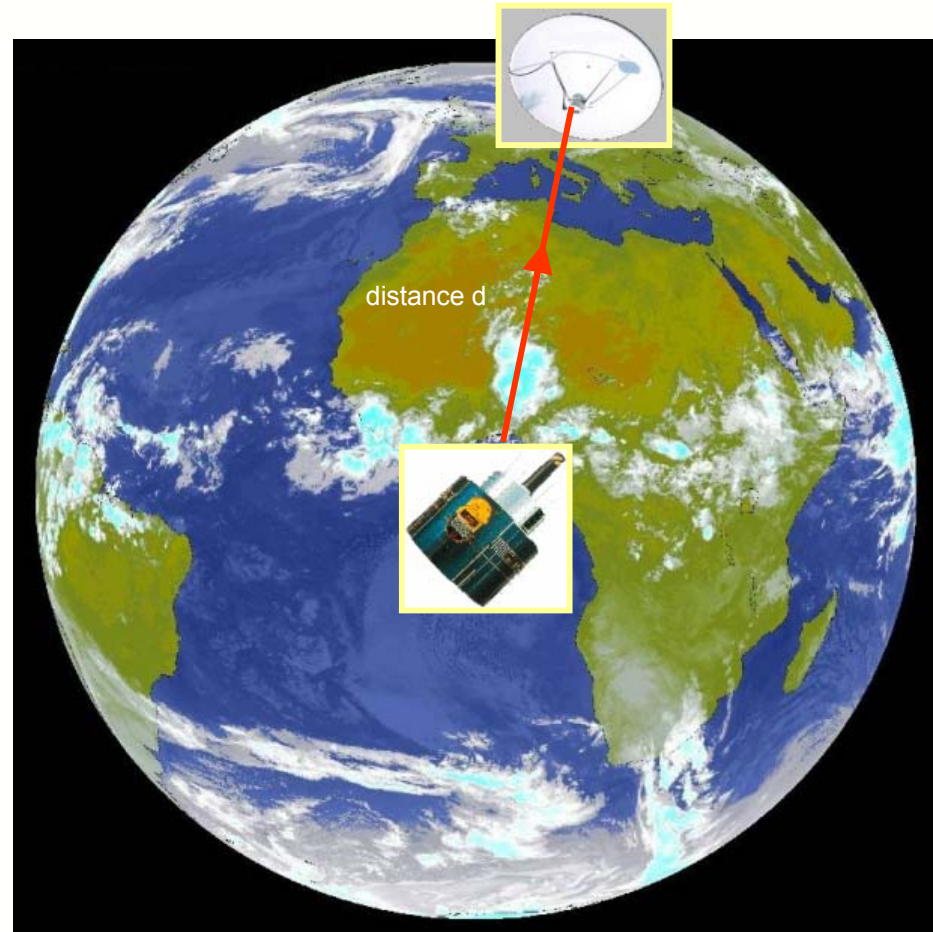
$$E = \sqrt{120\pi P} = 1,3 \text{ } \mu\text{V/m}$$

- la **puissance  $P_r$  captée** par la parabole de réception s'écrit :

$$P_r = 37,8 + 11 + 25 - 184,6 - 151,1 + 147,5 = -114,4 \text{ dBm}$$

- la **tension  $V_r$**  correspondante sur 50 ohms vaut alors :

$$V_r = \sqrt{P_r \cdot R} = \sqrt{3,6 \cdot 10^{-15} \cdot 50} = 0,43 \text{ } \mu\text{V}$$





## 15- La PIRE d'un satellite



Un satellite géostationnaire de météorologie ou de télédiffusion pointe son antenne parabolique vers le sol et émet une **puissance  $P_0$**  avec une antenne de **gain  $G_1$**  :

- la **densité de puissance  $P$**  au niveau du sol est de :

$$P = \frac{G_1 P_0}{4\pi d^2}$$

- on appelle **Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente** ou **PIRE** la quantité :

$$PIRE = G_1 P_0$$

- la **densité de puissance  $P$**  au sol s'écrit alors :

$$P = \frac{PIRE}{4\pi d^2}$$

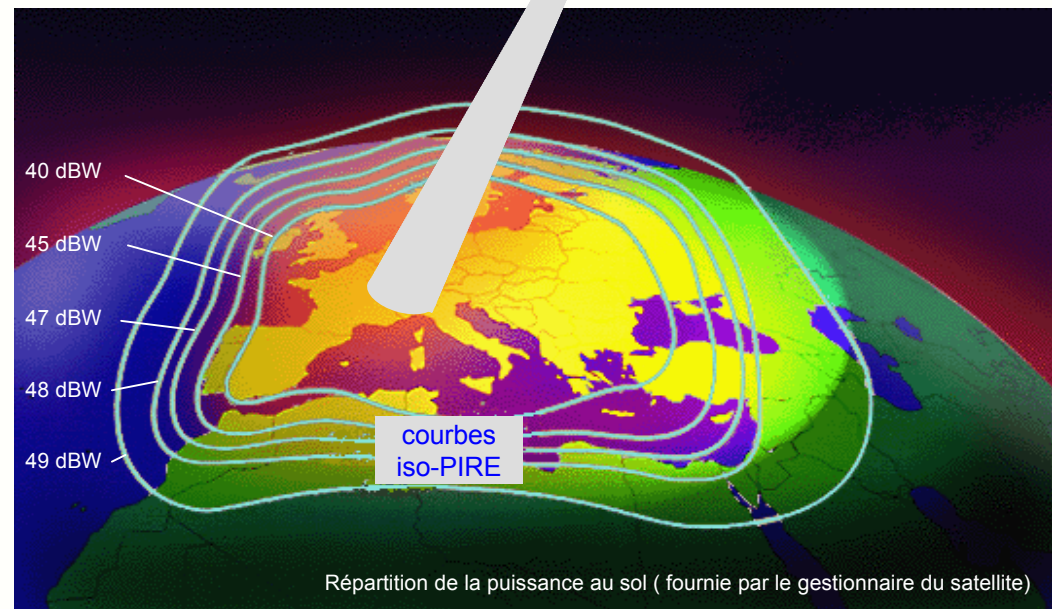
Le satellite ci-contre, pour une réception en France :

- a une PIRE de :

$$PIRE = 40dBW = 10kW$$

- et produit au sol une densité :

$$P = \frac{PIRE}{4\pi d^2} = 0,61pW/m^2$$



**Résultat :** le satellite émettant une puissance  **$P_0$**  avec une antenne très directive de **gain  $G_1$**  est donc équivalent vu du sol à une **source isotrope** émettant une **puissance beaucoup plus élevée égale à sa PIRE**.



## 16- Portée d'un émetteur



Calculer la portée d'un émetteur est une tâche difficile, car elle dépend d'un grand nombre de facteurs :

- les **facteurs qu'on maîtrise** : puissance d'émission, gain des antennes, disposition des antennes ...
- les **facteurs qu'on ne maîtrise pas** : obstacles, réflexions, conditions atmosphériques, qualité du récepteur, parasites ...

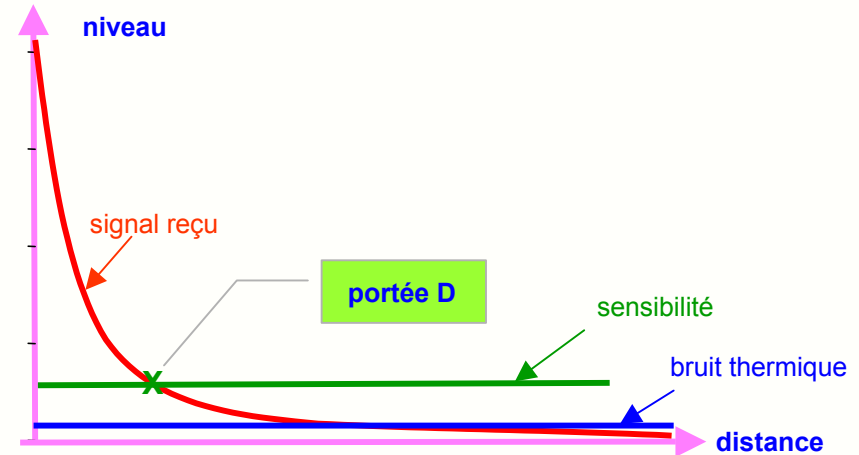
- le **niveau reçu**  $P_r$  est donné par la formule de Friis :

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

- le **bruit thermique** capté par l'antenne et limité à la bande passante  $B$  du récepteur s'écrit :

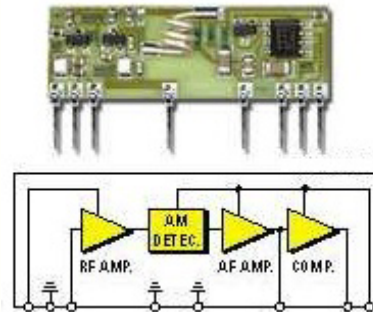
$$P_B = k \cdot T \cdot B \quad \text{avec} \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23}$$

- le **bruit propre de l'électronique** du récepteur vient s'ajouter à ce bruit thermique. La **sensibilité**  $S$  d'un récepteur tient compte de ce bruit propre et précise le signal minimal nécessaire à l'entrée du récepteur pour une bonne réception.



### Récepteur Aurel BCNB3V3

- fréquence  $f = 433,92 \text{ MHz}$
- sensibilité  $S = 5 \text{ microvolts}$
- résistance d'entrée  $R = 50 \text{ ohms}$
- bande passante  $B = 2,5 \text{ kHz}$



- sensibilité

$$S = 5 \text{ } \mu\text{V} = -93 \text{ dBm}$$

- bruit thermique

$$P_B = k \cdot T \cdot B = 10^{-17} \text{ W} = -140 \text{ dBm}$$

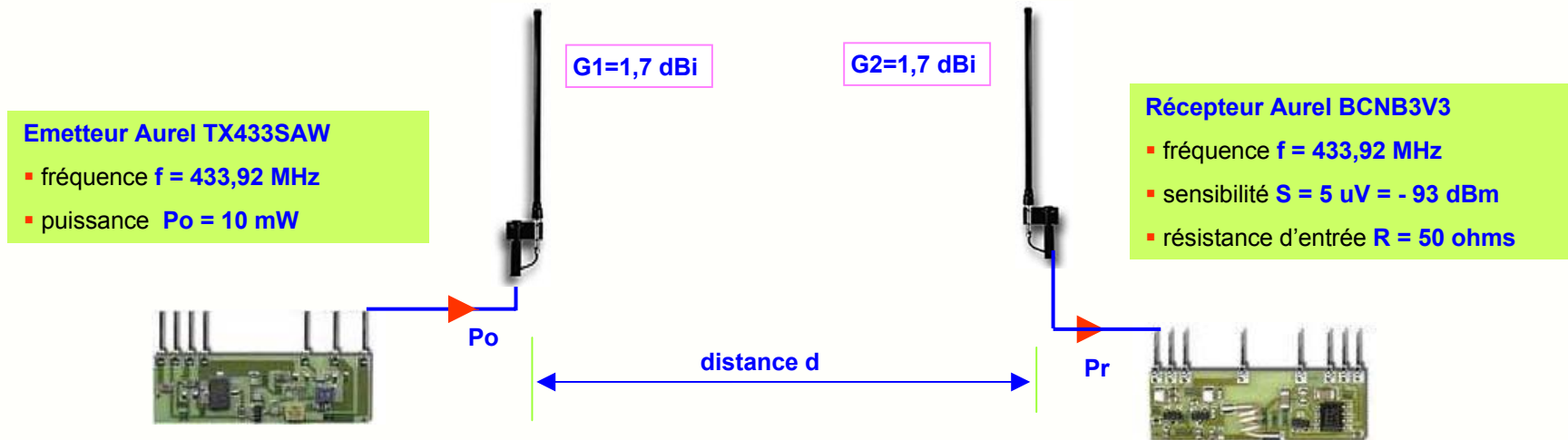
**Résultat** : en pratique, la **limite de portée** est atteinte lorsque le niveau du signal reçu est égal à la sensibilité du récepteur soit **-93 dBm**.



## 17- Exemple de calcul de portée



Le calcul de la portée d'une liaison radio est simple si on se place dans une **situation idéale**, sans obstacles ni parasites :



- la **puissance reçue**  $P_r$  donnée par la formule de Friis correspond à une **tension reçue**  $V_r$  sur la résistance d'entrée  $R$  du récepteur :

$$P_r = G_1 \cdot G_2 \cdot P_o \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 = \frac{V_r^2}{R} \quad \text{soit} \quad V_r = \frac{\lambda}{4\pi d} \sqrt{R \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot P_o}$$

- la distance limite théorique ou **portée  $d=D$**  est atteinte lorsque la tension reçue est égale à la sensibilité :

$$V_r = \frac{\lambda}{4\pi D} \sqrt{R \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot P_o} = S \quad \text{soit} \quad D = \frac{\lambda}{4\pi S} \sqrt{R \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot P_o} = 11,5 \text{ km}$$

**Remarque importante** : ce calcul donne toujours une portée très optimiste et la portée réelle sera  $D' = k \cdot D$  avec  $k < 1$

- en présence d'arbres ou de collines, on pourra prendre  $k = 0,3$  à  $0,6$  soit environ  $D' = 4 \text{ km}$
- en milieu urbain,  $k = 0,1$  à  $0,4$  et peut descendre jusqu'à  $0,02$  à l'intérieur d'un immeuble en béton armé soit  $D' = 250 \text{ m}$
- avec 2 antennes « bout de fil » ( $G=0,3$ ) et dans un immeuble ( $k=0,02$ ), la portée calculée ainsi se réduit à  $D' = 45 \text{ m}$  !

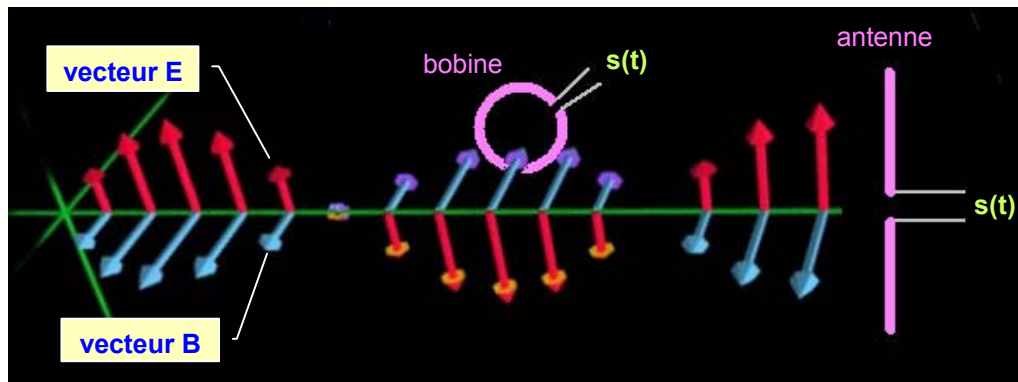


## 18- L'antenne en réception



Au niveau du récepteur, il faut transformer les variations de champ en tension ce qui peut se faire de deux manières :

- par une **antenne** qui donne une tension  $s(t)$  proportionnelle au **champ électrique E** :  $s(t) = K_1 \cdot E(t)$
- le coefficient  $K_1$  appelé **facteur d'antenne** dépend du type d'antenne choisi et de sa longueur
- par une **bobine** qui donne une tension  $s(t)$  proportionnelle au **champ magnétique B** :  $s(t) = K_2 \cdot B(t)$
- le coefficient  $K_2$  dépend du diamètre de la bobine, du nombre de spires et augmente fortement avec un noyau en ferrite



- aux fréquences inférieures à 1 MHz environ, les dimensions des antennes deviennent importantes, et on leur préfère les bobines (récepteurs AM, DCF ...)
- pour une réception optimale, **l'axe de la bobine** doit être **aligné avec le champ magnétique**, ce qui permet des applications de localisation radio (radiogoniométrie)
- pour une réception optimale, **l'antenne** doit être **alignée avec le champ électrique**, la polarisation produite par l'antenne d'émission doit être en théorie respectée



Récepteur de signaux horaires DCF à 77 kHz



Récepteur FM

**Remarque :** en pratique, la **polarisation change** chaque fois que l'OEM se **réfléchit**. Sauf pour la réception de signaux satellites, le respect de la polarisation n'est donc pas critique dans les environnements réfléchissants habituels.



## ■ Première partie : fonctionnement et propriétés

- 1- Le rôle de l'antenne
- 2- Courant dans une antenne
- 3- Que rayonne une antenne ?
- 4- La longueur d'onde
- 5- Faut-il une antenne pour émettre ?
- 6- Rayonnement et blindage
- 7- Caractéristiques d'une onde plane
- 8- Rayonnement d'une antenne isotrope
- 9- Gain d'une antenne directive
- 10- Les diagrammes de directivité
- 11- Critères de choix d'une antenne
- 12- Champ créé par une antenne directive
- 13- Bilan de puissance d'une liaison
- 14- Exemple de calcul de tension reçue
- 15- La PIRE d'un satellite
- 16- Portée d'un émetteur
- 17- Exemple de calcul de portée
- 18- L'antenne en réception

## ■ Deuxième partie : les différents modèles

- 19- L'antenne dipôle demi-onde
- 20- Caractéristiques électriques du dipôle
- 21- Influence de la longueur des brins
- 22- Champ créé par l'antenne dipôle
- 23- Diagramme de rayonnement du dipôle
- 24- L'antenne Yagi
- 25- Le dipôle replié
- 26- L'antenne dipôle avec réflecteur
- 27- L'antenne quart-d'onde
- 28- Le rôle du plan de masse
- 29- L'antenne ground-plane
- 30- Les antennes quasi quart-d'onde
- 31- Champs créés par une antenne quart-d'onde
- 32- L'antenne guide d'onde
- 33- Liaison radio avec une antenne guide d'onde
- 34- L'antenne à cornet
- 35- L'antenne à réflecteur parabolique
- 36- Réalisations d'antennes paraboliques
- 37- L'antenne cadre aux basses-fréquences
- 38- Antenne filaire ou antenne cadre ?
- 39- Les antennes patch
- 40- Les assemblages de patches
- 41- Répartition des courants dans une antenne patch
- 42- Champ magnétique produit par une antenne patch
- 43- Autres types d'antennes

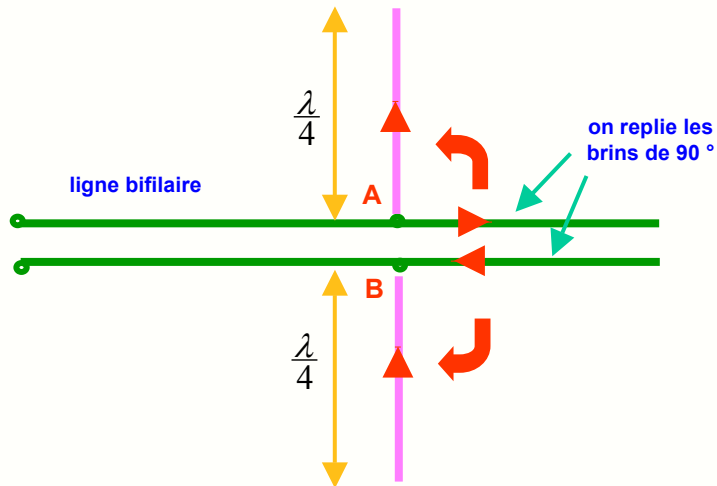


## 19- L'antenne dipôle demi-onde



Le dipôle est **l'antenne de référence** en radiocommunications et est largement utilisée tel quel ou en association avec d'autres conducteurs pour former une antenne Yagi.

Le dipôle a une longueur totale d'une **demi-longueur d'onde** :



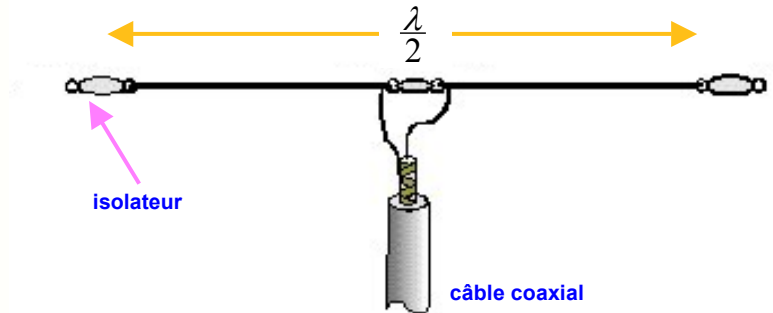
Si on replie les brins d'une ligne sur un quart de la longueur d'onde :

- les courants dans les 2 brins circulent dans le même sens
- les champs E et B créés par les 2 tronçons ouverts s'additionnent
- la ligne rayonne et on a réalisé une **antenne demi-onde ou dipôle**

### Exemples :

- pour  $f_0 = 100 \text{ MHz}$  la longueur sera  $L = c/2f_0 = 1,5 \text{ m}$
- pour  $f_0 = 1 \text{ GHz}$  la longueur sera  $L = c/2f_0 = 15 \text{ cm}$

réalisation pratique



dipôles verticaux d'un émetteur FM

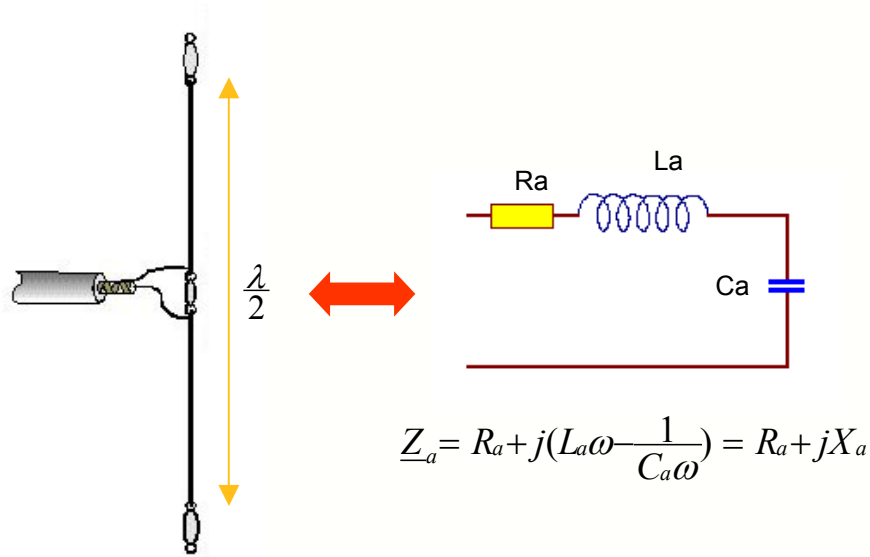




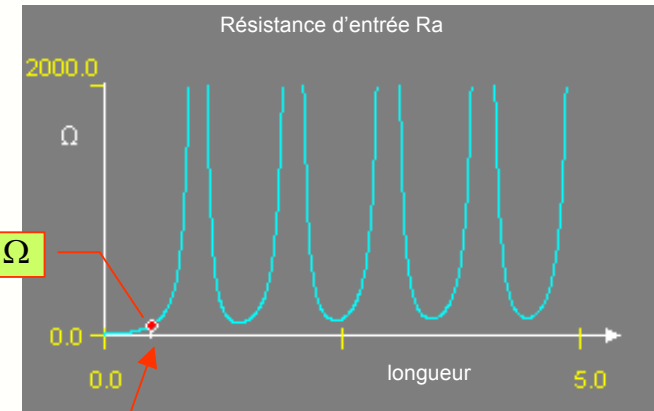
## 20- Caractéristiques électriques du dipôle



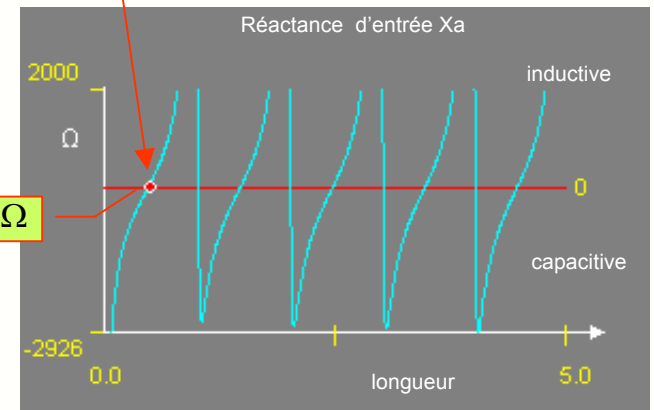
Le dipôle est une antenne résonante qui se comporte comme un **circuit R,L,C série** :



- à la fréquence de travail on a :  $\underline{Z}_a = 73 + j42 \, \Omega$
- son gain vaut :  $G = 1,64 = 2,1 \, dBi$
- la tension s fournie à la réception :  $S = K_1 \cdot E = \frac{\lambda}{\pi} \cdot E$
- sa bande passante :  $B \approx 0,1 \, f$



$$L = \frac{\lambda}{2}$$



**Remarque :** en raccourcissant légèrement l'antenne, on peut rendre son impédance **purement résistive**.



## 21- Influence de la longueur des brins



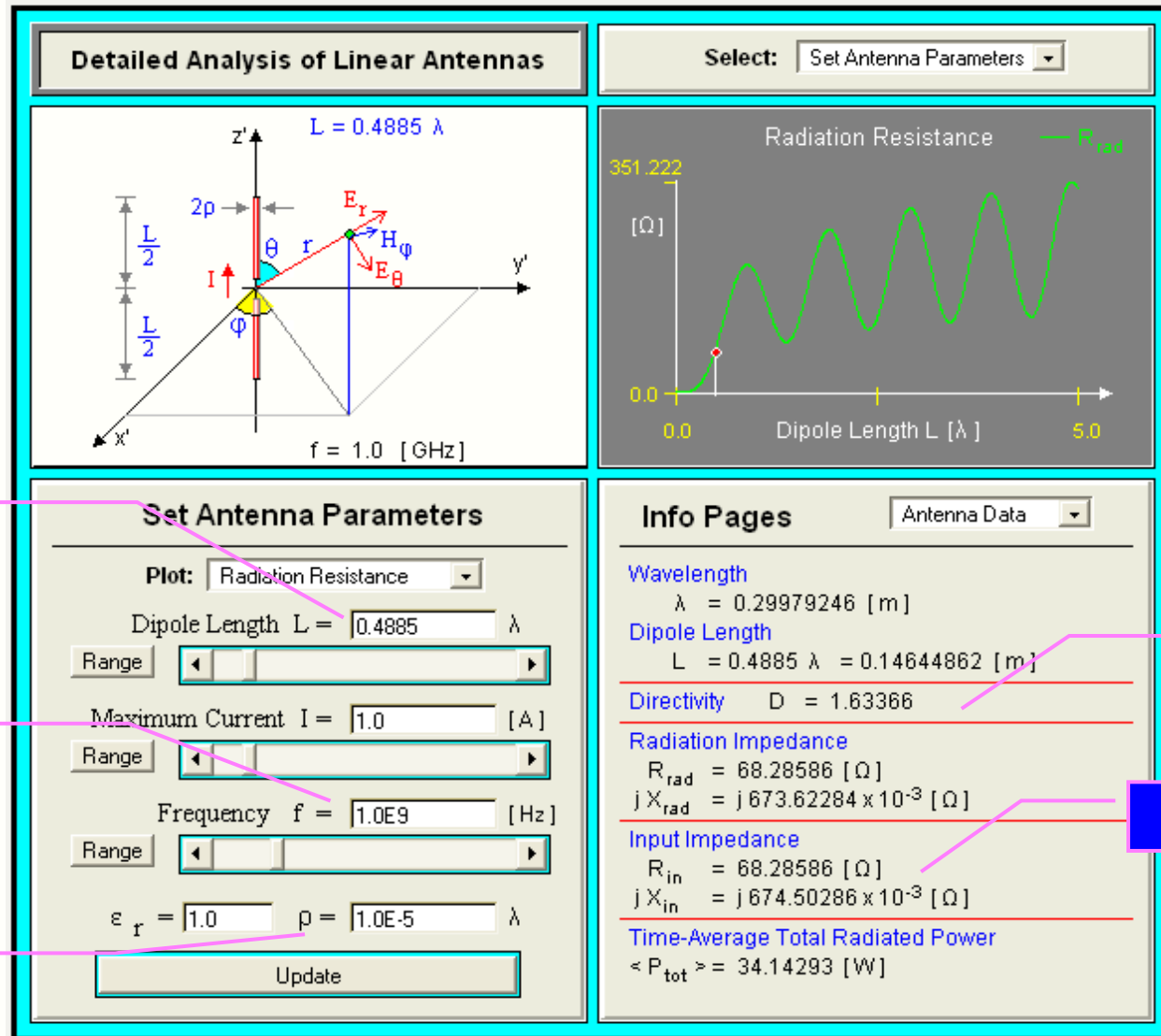
Si on veut une antenne **purement résistive** :

- longueur optimale

$$L = 0,4885 \lambda$$

- résistance

$$R_a = 68 \Omega$$



longueur de l'antenne

fréquence de travail

rayon du brin

gain

impédance résistive

**Applet** : permet de voir l'influence de la longueur des brins sur les caractéristiques du dipôle

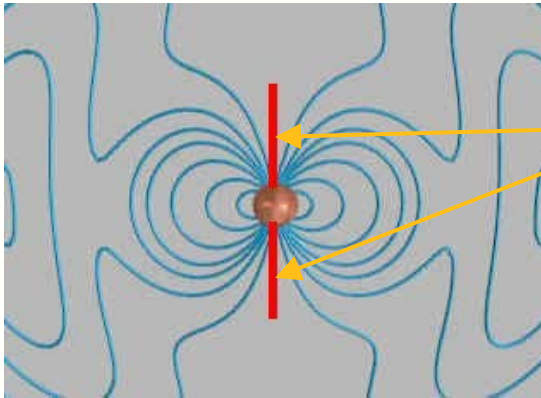


## 22- Champ créé par l'antenne dipôle

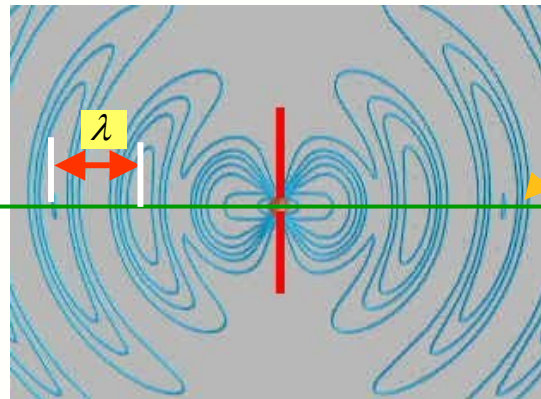


La structure de l'onde électromagnétique créée par un dipôle est assez complexe à proximité de la source, mais lorsqu'on s'éloigne d'une dizaine de longueurs d'onde on peut assimiler l'onde à une **onde plane**.

Lignes de champ magnétique B



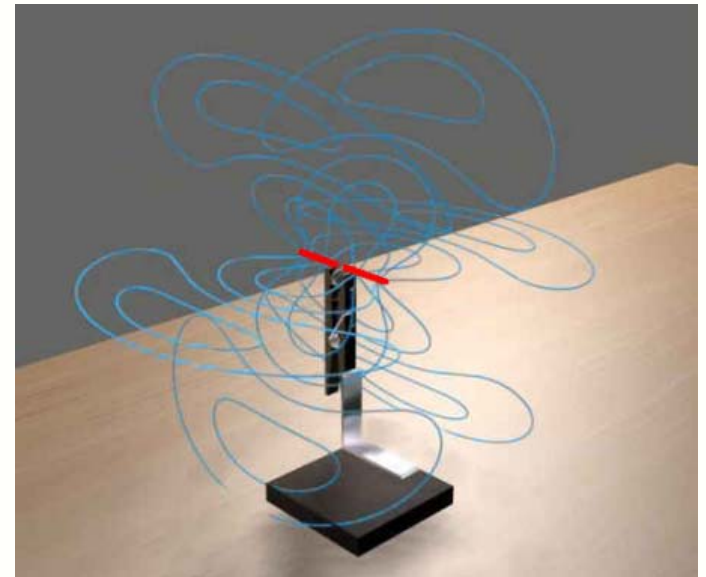
antenne dipôle



l'onde se rapproche d'une onde plane

plan où l'émission est maximale

Lignes de champ magnétique autour du dipôle



[Vidéo](#) : dipôle en champ proche

[Vidéo](#) : dipôle en champ lointain

[Vidéo](#) : dipôle en rotation

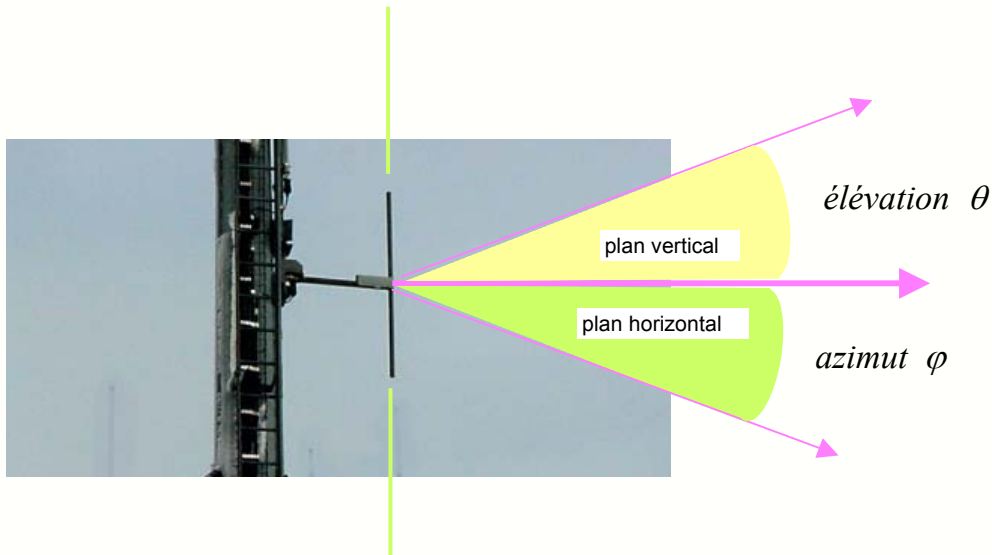


## 23- Diagramme de rayonnement du dipôle



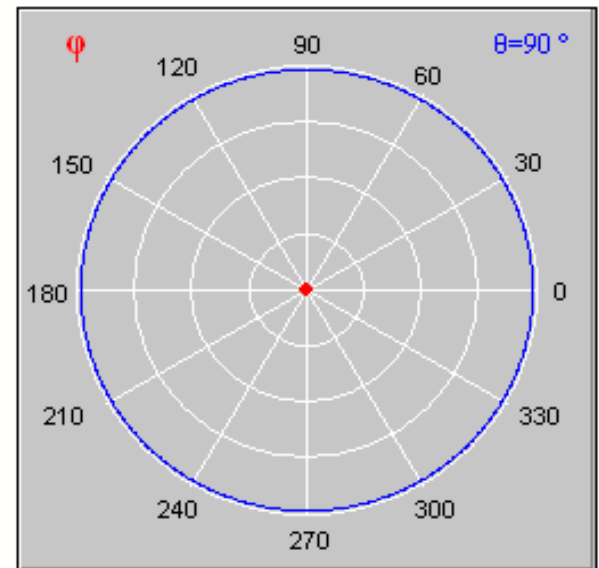
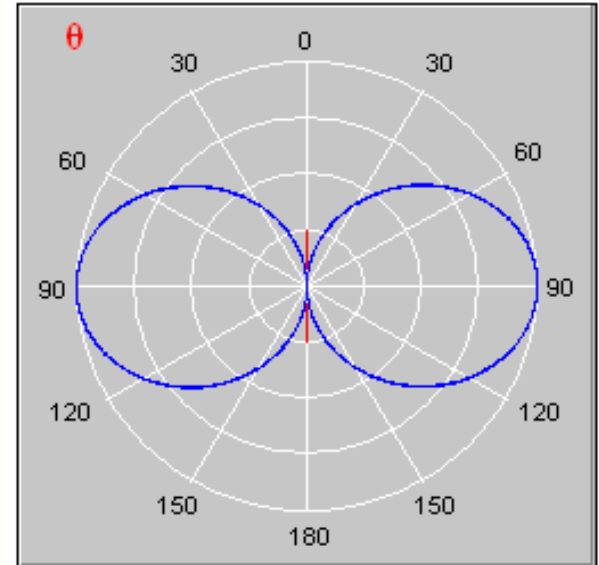
L'antenne dipôle est très utilisée en radiodiffusion car :

- c'est une antenne simple à réaliser et peu encombrante
- elle rayonne de manière omnidirectionnelle dans un plan horizontal
- elle rayonne peu d'énergie dans la direction de son axe
- son diagramme de directivité est bien adapté à la couverture d'un territoire



Si on rallonge le dipôle, son diagramme de directivité devient plus complexe avec un nombre de lobes plus important.

**Applet : influence de la longueur des brins sur le rayonnement du dipôle**



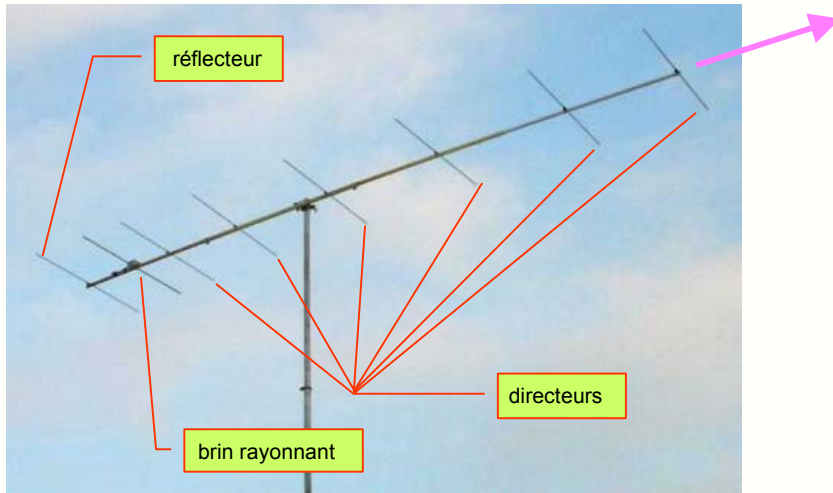


## 24- L'antenne Yagi



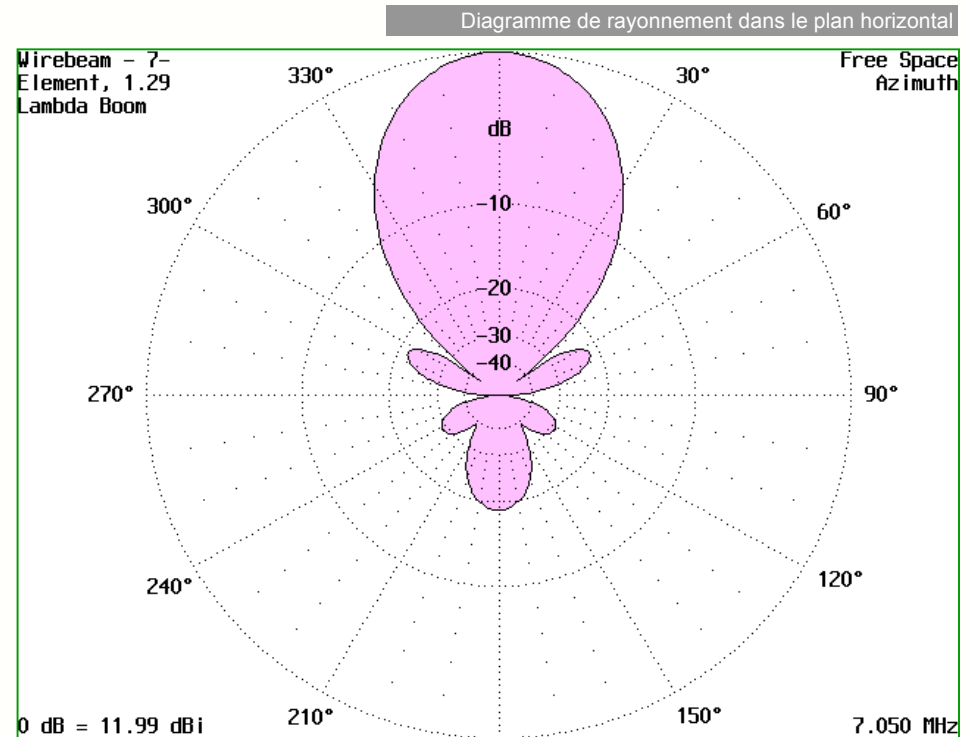
Le dipôle est souvent utilisé en association avec des brins purement passifs qui permettent de rendre le diagramme plus directif :

- un **brin réflecteur** légèrement plus long que le brin actif ou une surface réfléchissante
- plusieurs **brins directeurs** un peu plus courts



- avec un gain  $G$ , elle fournit en réception la tension :

$$S = K_1 \cdot E = \frac{\lambda}{\pi} \cdot G \cdot E$$



**Remarque :** on trouve des antennes Yagi comportant plus de 40 éléments dont le gain dépasse les 30 dBi

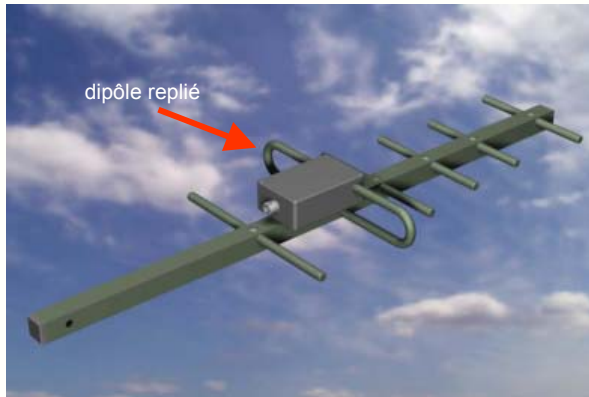
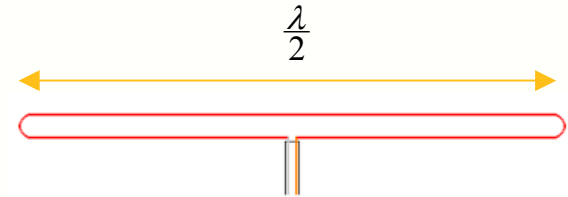


## 25- Le dipôle replié



Le dipôle est souvent utilisé sous une forme un peu différente appelée **dipôle replié** ou **trombone** :

- il est constitué d'un dipôle ordinaire, relié à un second dipôle placé à faible distance
- l'ensemble est ainsi **plus robuste** qu'un dipôle simple
- le diagramme de rayonnement est identique au dipôle
- sa résistance est 4 fois supérieure à celle du dipôle soit :  $R_a = 4.73 \approx 300 \Omega$
- la **bande passante est beaucoup plus grande** que celle du dipôle



### Remarques :

- parce que sa bande passante est importante, le dipôle replié est souvent utilisé comme brin actif dans les **antennes Yagi à large bande**
- si les deux brins ont des diamètres différents, la résistance  $R_a$  est modifiée, ce qui permet de fabriquer des antennes **Yagi 75 ohms** pour la télévision

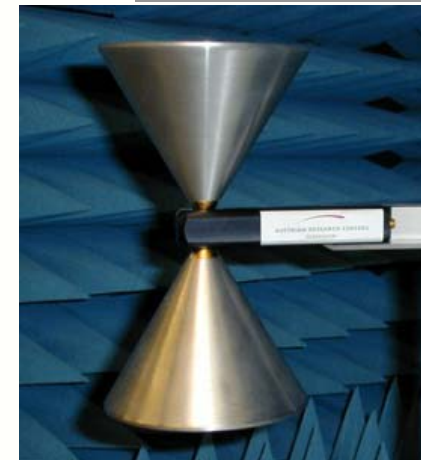
Une autre évolution du dipôle est l'antenne **bicône**, formée d'une multitude de dipôles reliés en parallèle :

- la bande passante devient **très importante**
- le bon choix de l'angle des brins permet d'avoir  **$R_a = 50 \text{ ohms}$**
- elle est idéale pour les **tests** de compatibilité électromagnétique

antenne bicône



bicône 30 MHz – 1 GHz



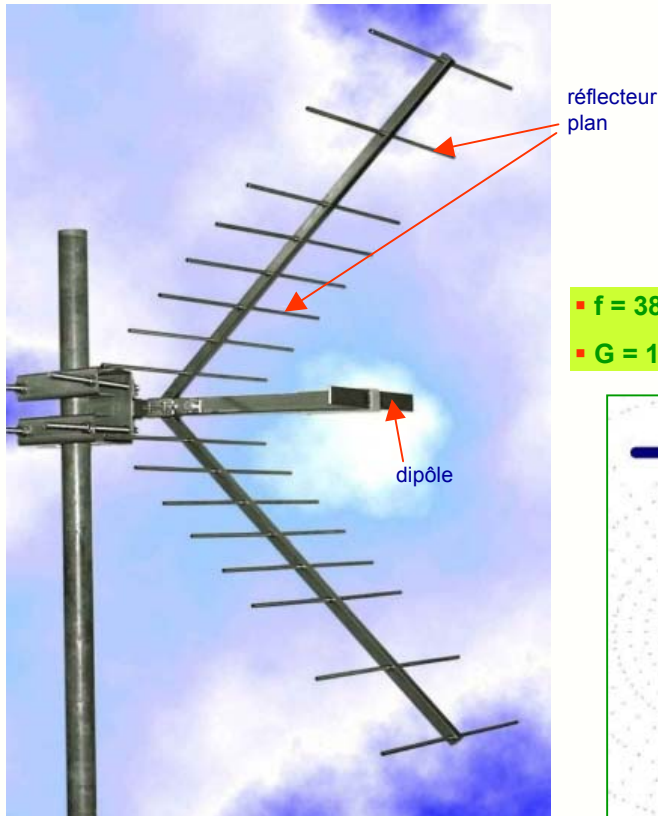


## 26- L'antenne dipôle avec réflecteur

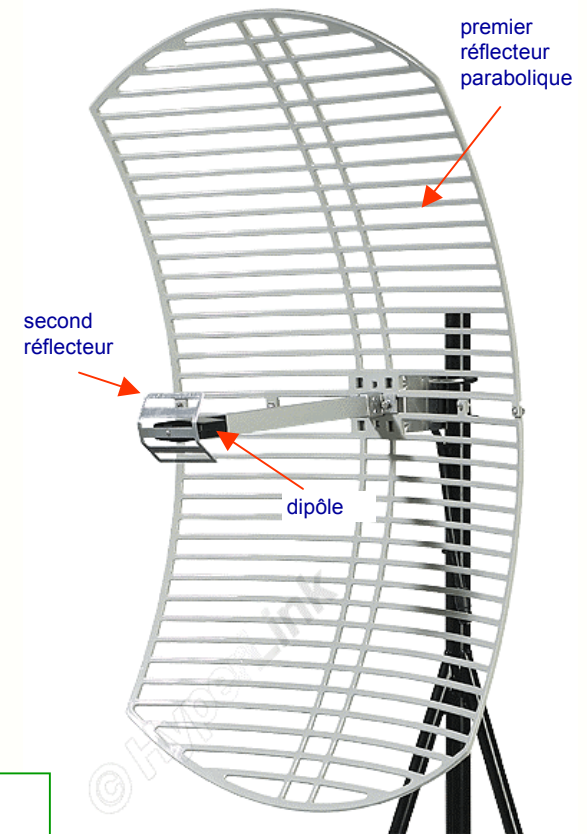
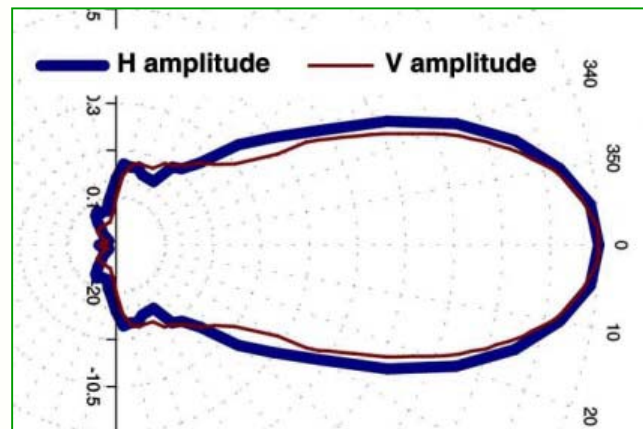


Pour rendre un dipôle directif, on peut aussi l'associer à une **surface réfléchissante plane ou parabolique** :

- la forme du réflecteur joue sur la directivité du dipôle
- sa position joue sur l'impédance du dipôle
- l'impédance est en général de **50 ohms** et le gain varie entre **10 et 30 dBi**
- ce type d'antenne a des dimensions acceptables **au-dessus de 1 GHz**



- **f = 380-530 MHz**
- **G = 10 dBi**



- **f = 2,4 GHz**
- **G = 24 dBi**

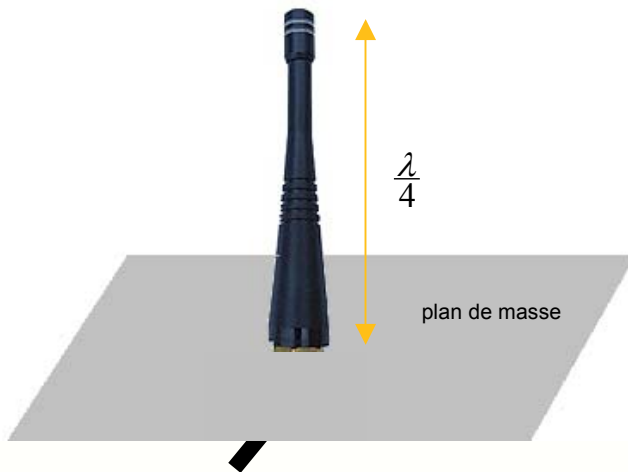


## 27- L'antenne quart-d'onde

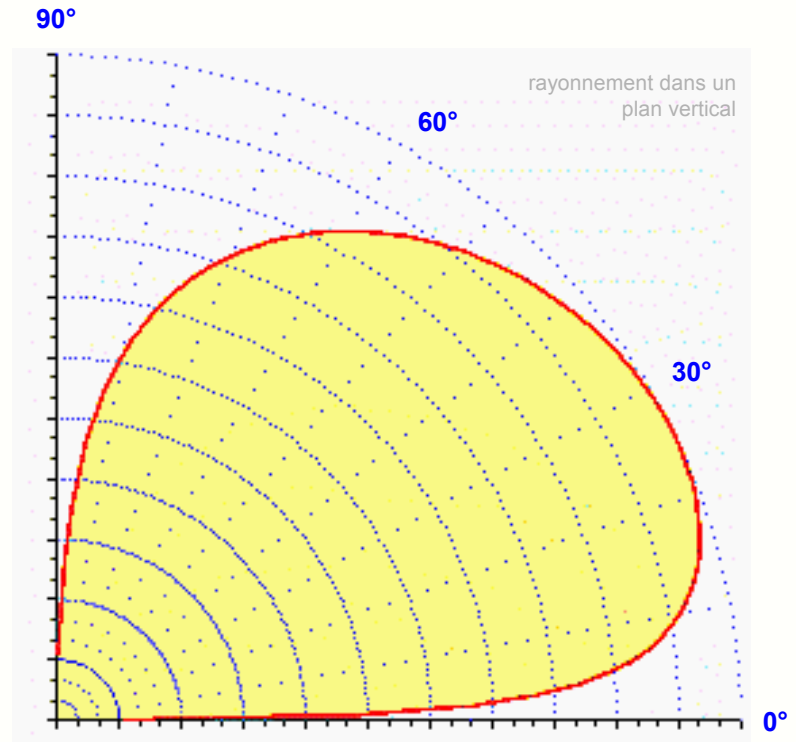


L'antenne qui ne comporte qu'un seul brin rayonnant associé à un plan de masse est l'antenne **quart-d'onde** ou **Marconi**.

- c'est aussi une antenne résonante qui se comporte également comme un **circuit R,L,C série**
- le plan de masse **conducteur**, en théorie infini, doit au moins avoir des dimensions égales à celles de l'antenne
- à la résonance, elle a une impédance moitié de celle du dipôle, soit environ  **$R_a = 36 \text{ ohms}$**



- à la fréquence de travail on a :  $R_a = 36 \Omega$
- son gain vaut :  $G = 1,3 \text{ à } 1,6 = 1,14 \text{ à } 2 \text{ dBi}$
- la tension x fournie en réception :  $S = K_1 \cdot E = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot E$



**Remarque :** il est rarement possible d'avoir sous l'antenne un plan de masse infini et on se contente souvent de la **masse métallique** du **boîtier** de l'émetteur ou du récepteur . Cela modifie l'impédance de l'antenne et son diagramme de rayonnement.

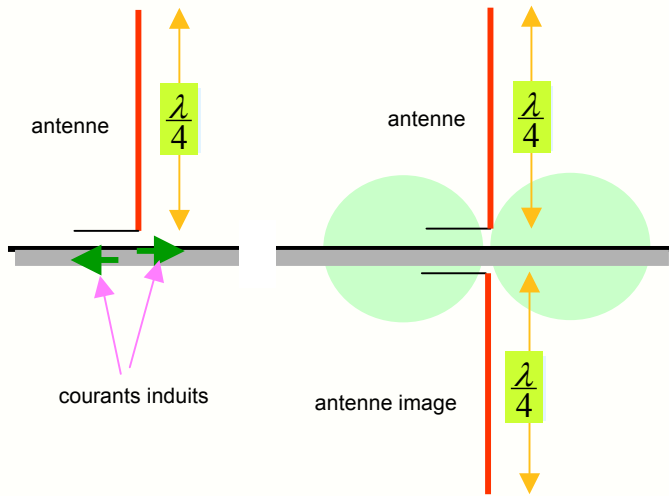


## 28- Le rôle du plan de masse



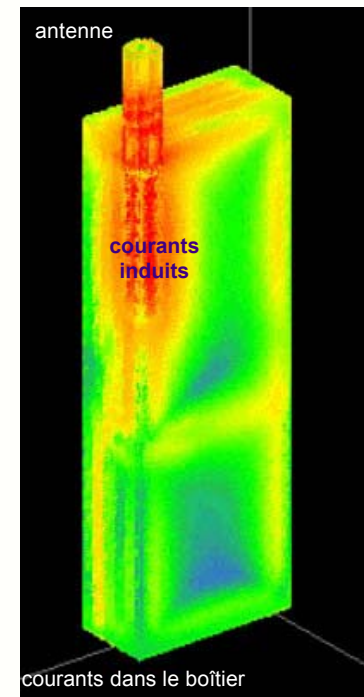
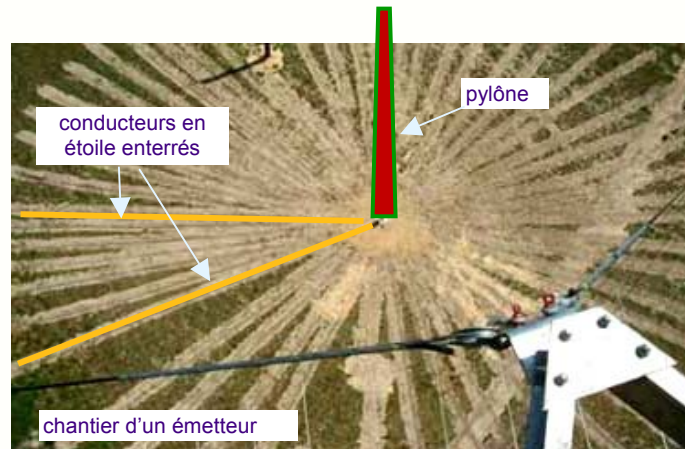
Le plan de masse joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'antenne quart-d'onde qui n'est en réalité qu'une **demi-antenne** :

- en réalité, les courants circulant dans l'antenne produisent des **courants induits dans le plan de masse**
- le champ créé par ces courants induits s'ajoute à celui créé par les courants de l'antenne
- le champ résultant est le même que celui créé par un dipôle : on dit que le plan de sol crée une **antenne image** par effet miroir



**Résultat** : pour un rayonnement optimal, il faut :

- au mieux, un **plan métallique** parfaitement conducteur
- au moins des **conducteurs en étoile** autour de l'antenne
- au minimum un **boîtier bon conducteur**



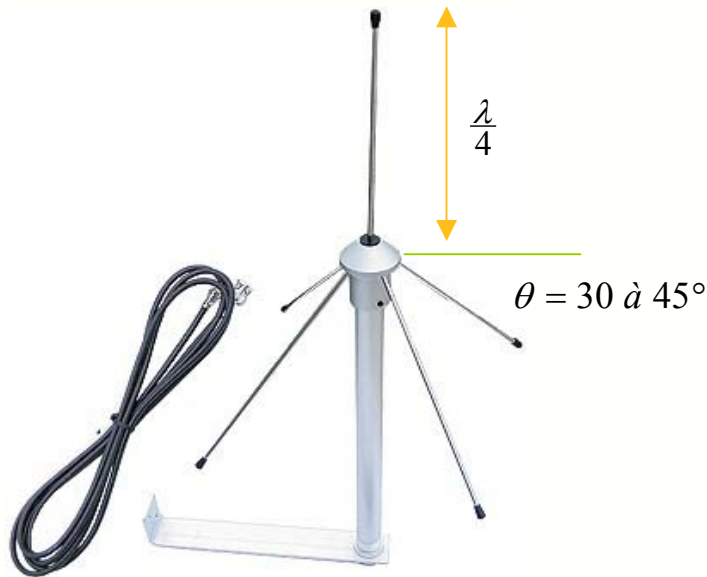


## 29- L'antenne ground-plane



Le plan de masse de l'antenne quart-d'onde peut être astucieusement remplacé par 3 ou 4 brins pour former une antenne **ground plane** :

- c'est une antenne facile à réaliser, omnidirectionnelle dans le plan horizontal
- les brins de masse sont appelés **radiants**, ils ont la même longueur que le brin actif
- en inclinant les radiants vers le bas de 30 à 45°, on peut ramener l'impédance à **R = 50 ohms**



- son gain est identique à celui de l'antenne quart-d'onde

$$G = 1,3 \text{ à } 1,6 = 1,14 \text{ à } 2 \text{ dBi}$$

- tension s fournie en réception :

$$S = K_1 \cdot E = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot E$$



## 30- Les antennes quasi quart-d'onde



Si on constate souvent dans la pratique une réduction importante du plan de masse, il faut se souvenir que :

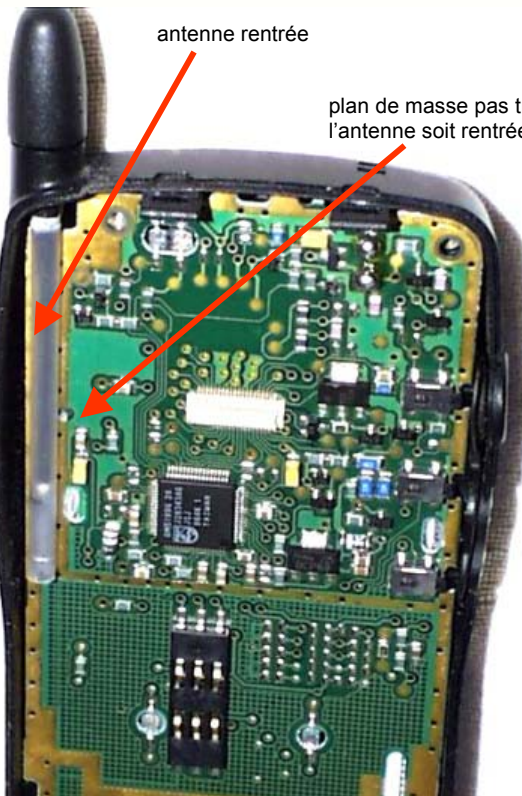
- sans plan de masse, la résistance d'une antenne même achetée pour cette valeur ne sera **pas de 50 ohms**
- le transfert de puissance entre l'émetteur et l'antenne ne sera pas optimal, et la **puissance émise réduite**
- sans plan de masse, le gain de l'antenne sera moindre et la **portée plus faible**
- si la masse n'est pas une surface plane, le **diagramme de rayonnement sera irrégulier**
- en réception, l'antenne fournira un **signal plus faible**

pas de plan  
de masse



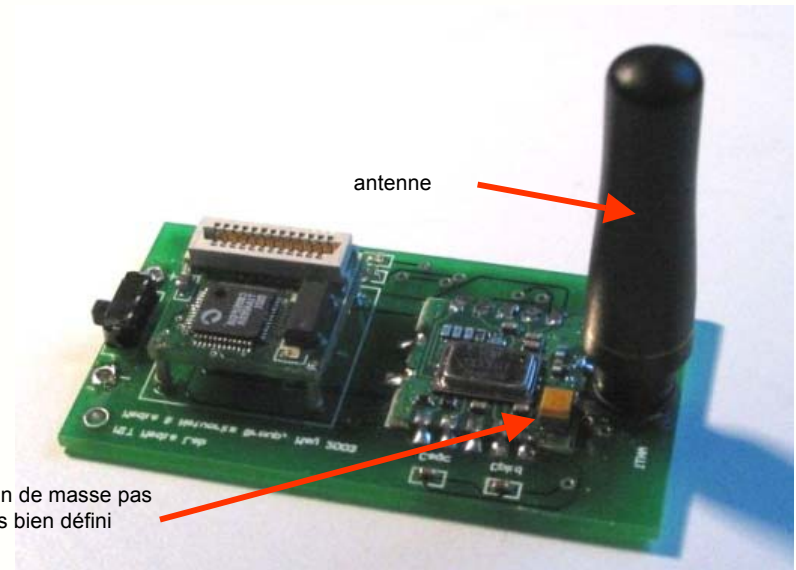
antenne rentrée

plan de masse pas très bien défini, que  
l'antenne soit rentrée ou sortie



antenne

plan de masse pas  
très bien défini





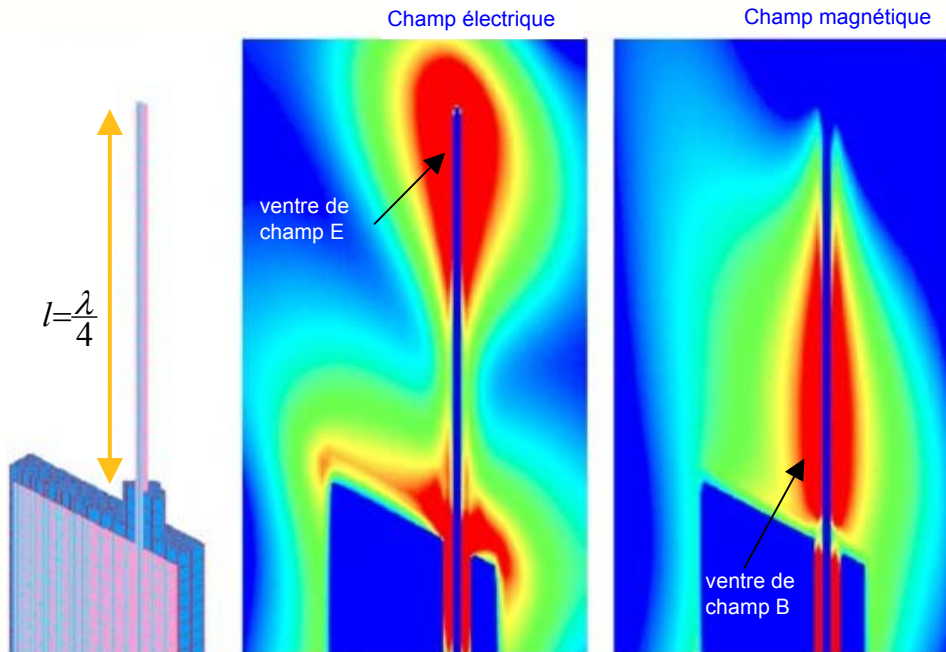
## 31- Champs créés par une antenne quart-d'onde



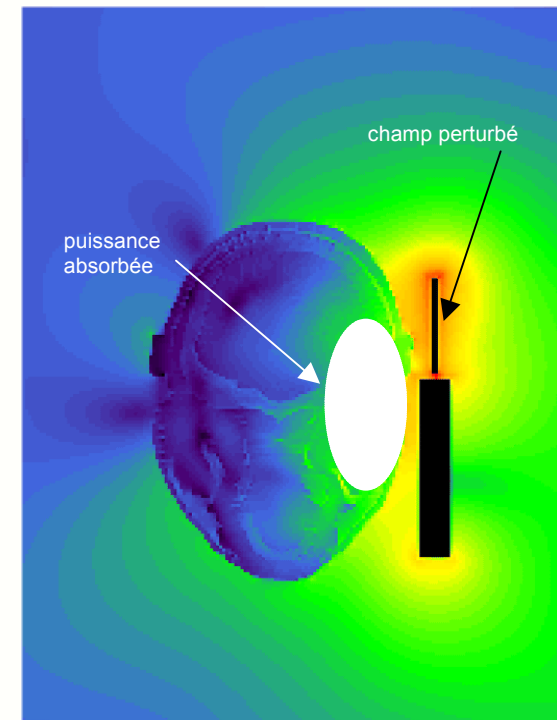
L'antenne quart-d'onde est une antenne résonante et est donc le siège d'ondes stationnaires de tension et de courant :

- la tension est maximale à son extrémité, le champ E présente un **ventre** à son voisinage
- le courant est important à sa base, le champ B présente un **ventre** à son voisinage
- la présence d'un objet au voisinage perturbe la répartition des champs
- si l'objet est un mauvais conducteur, sa présence introduit des **pertes par absorption**

- rouge = champ intense
- bleu = champ faible



Champs électrique et magnétique créé par une antenne Marconi



Champ électrique créé par un téléphone GSM

[Vidéo](#) : champ E au voisinage de l'antenne ( vue de dessus )

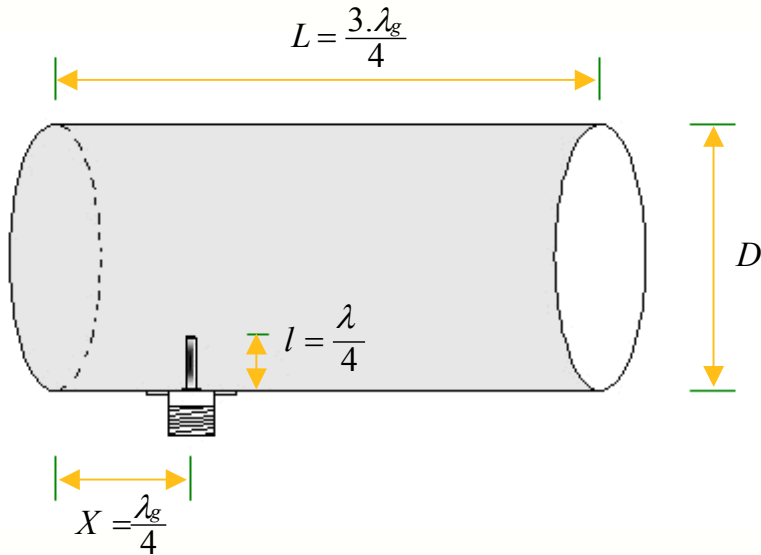
[Vidéo](#) : champ E au voisinage de l'antenne ( vue de profil )



## 32- L'antenne « guide d'onde »



On peut rendre une antenne quart-d'onde **directive** en la plaçant dans une portion de **guide d'onde** :



### Exemple de réalisation :

- fréquence **f = 2,45 GHz**
- longueur d'onde dans l'air :  $\lambda = c/f = 12,2 \text{ cm}$
- diamètre **D = 11 cm**
- longueur d'onde de coupure :  $\lambda_c = 1,706 \cdot D = 18,8 \text{ cm}$
- longueur d'onde dans le guide :  $\lambda_g = 16 \text{ cm}$
- longueur **L = 12 cm**
- position du brin **X = 4 cm**, longueur du brin **l = 3,05 cm**

- le guide circulaire a une longueur d'onde de coupure qui s'écrit :

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

- la longueur d'onde dans le guide est plus longue que dans l'air :

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

- son gain est de l'ordre de :  $G \approx 9 \text{ à } 11 \text{ dBi}$



antenne « boîte de conserve »

**Remarques** : il faut un choisir **D suffisant** pour avoir  $\lambda_c > \lambda$ ; au delà de 1 GHz, le fournisseur du cornet peut être le **Super U** du coin !

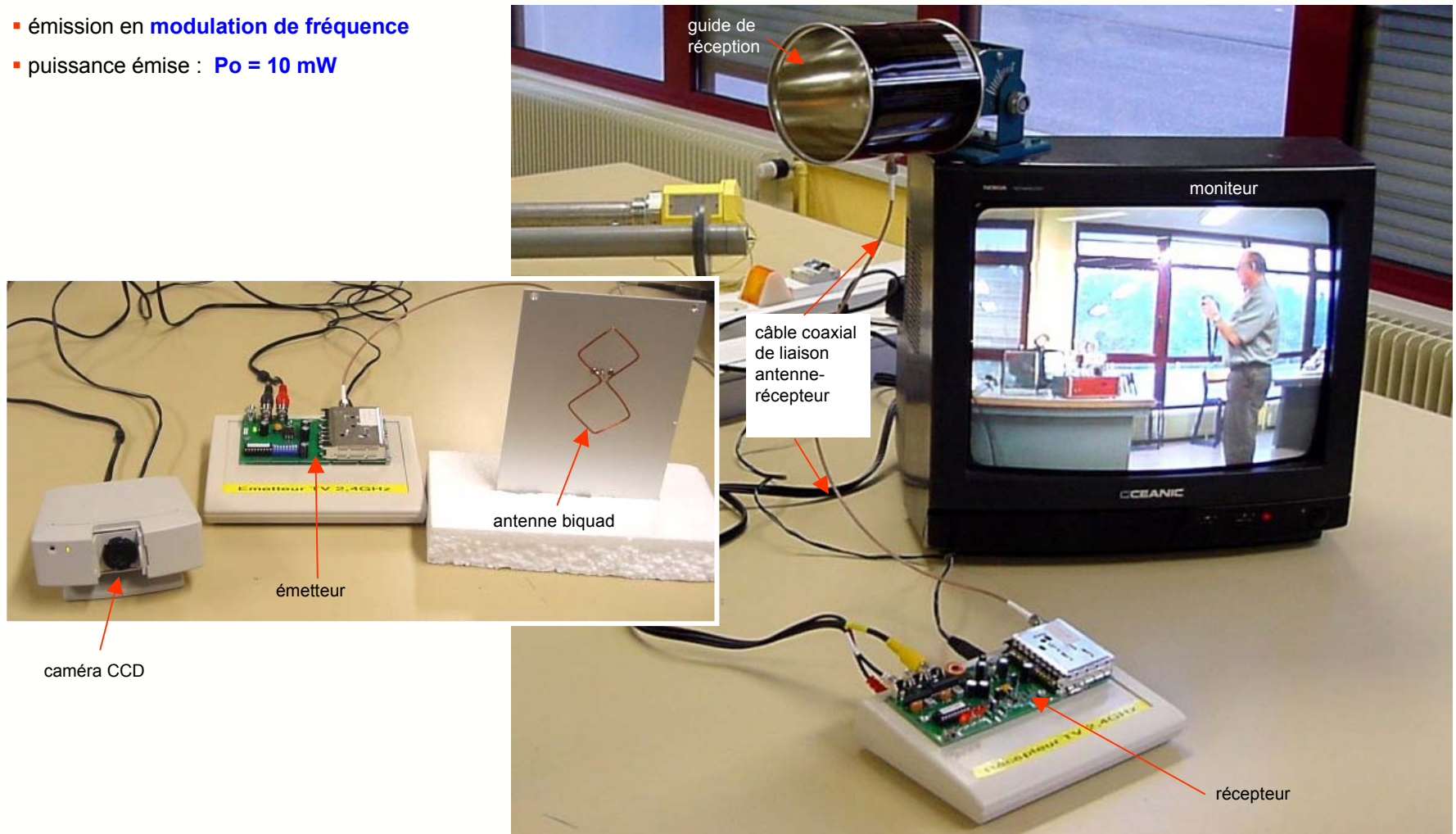


## 33- Liaison radio avec antenne « guide d'onde »



L'illustration présente une liaison vidéo à 2,4 GHz avec une antenne biquad à l'émission et une **antenne cornet à la réception**.

- fréquence  $f = 2,4 \text{ GHz}$
- émission en **modulation de fréquence**
- puissance émise :  $P_o = 10 \text{ mW}$

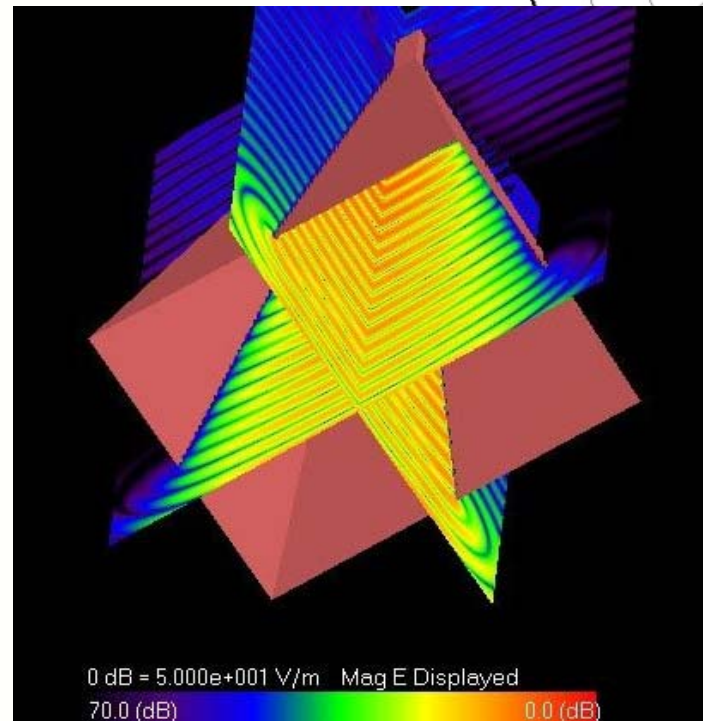
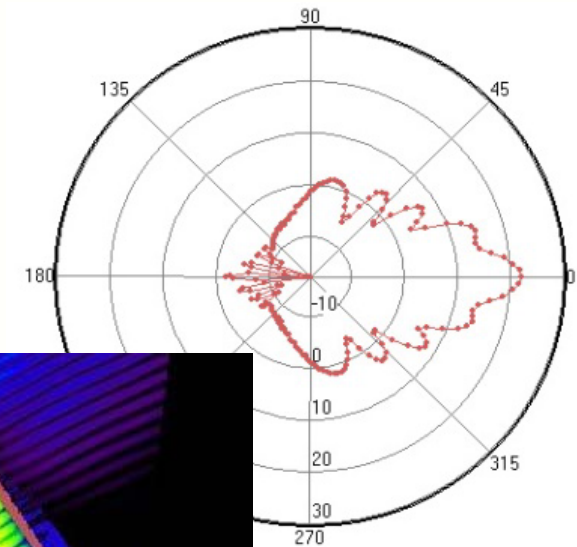
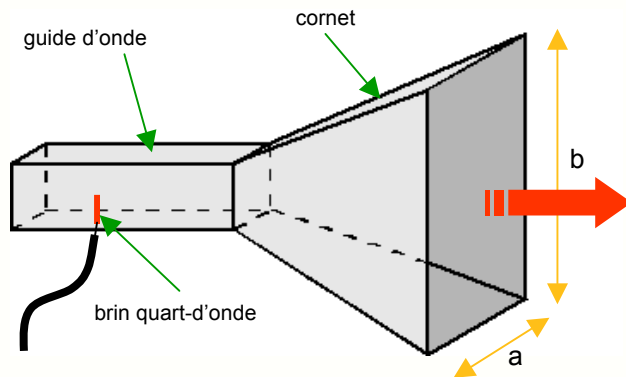




## 34- L'antenne à cornet



La directivité du guide peut être considérablement améliorée en lui ajoutant un **cornet** :



### Exemple de simulation :

- fréquence **f = 9,3 GHz**
- **longueur d'onde** dans l'air :  $\lambda = c/f = 3,22 \text{ cm}$
- largeur de l'ouverture **a = 18,5 cm**
- longueur de l'ouverture **b = 14,5 cm**
- gain **G = 22,1 dB**
- **angle d'ouverture**  $\theta = 12^\circ$

structure du  
champ E



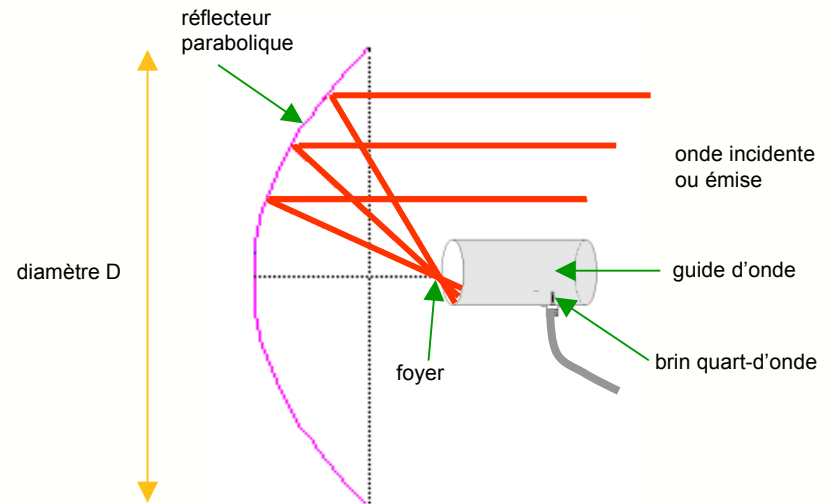
## 35- L'antenne à réflecteur parabolique



La directivité et le gain du cornet peuvent encore être améliorés en l'associant à un **réflecteur parabolique**. L'antenne qui en résulte, appelée ordinairement parabole, est une des meilleurs antennes directives et donc très utilisée au-delà de 1 GHz.

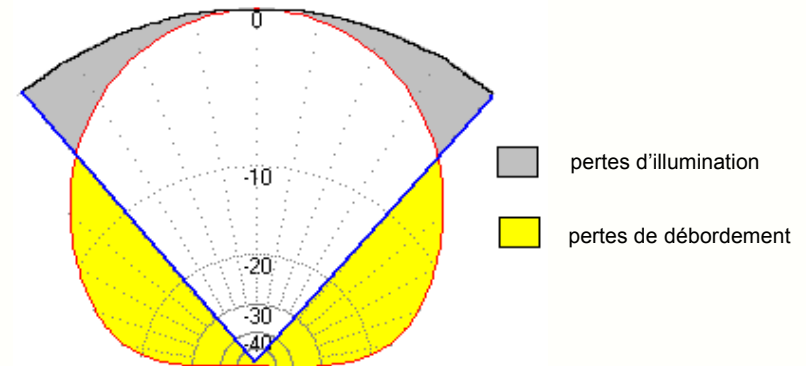
- l'onde se réfléchit sur la parabole et se **concentre au foyer**
- l'embouchure du guide d'onde est placée au voisinage du foyer
- le diamètre du réflecteur parabolique est D

- le **gain** de l'antenne augmente avec son diamètre :  $G = 6 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^2$
- l'**angle d'ouverture** diminue si le gain augmente:  $\theta = 70 \frac{\lambda}{D}$



L'utilisation d'un réflecteur parabolique pose un certain nombre de problèmes que le constructeur doit résoudre :

- une partie de la puissance sortant du guide tombe à côté du réflecteur (pertes de débordement)
- le centre du réflecteur reçoit plus d'énergie que sa périphérie (pertes d'illumination)
- le guide d'onde se trouve sur le trajet de l'onde et vient diminuer d'autant la surface de la parabole
- le mauvais état de surface de la parabole peut apporter des pertes supplémentaires



**Remarque** : le réflecteur peut être **ajouré** pour diminuer sa prise au vent, il suffit que la taille des trous soit petite par rapport à

$\lambda$



## 36- Réalisations d'antennes paraboliques

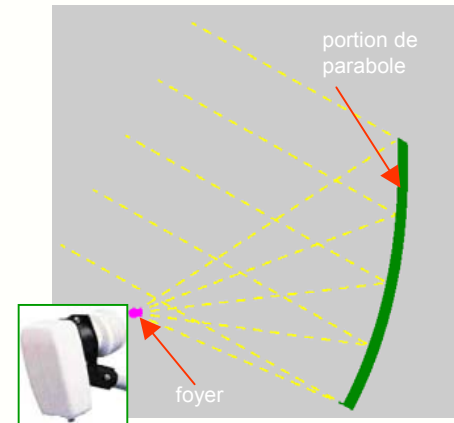


Dans l'antenne **offset**, le sommet de la parabole (au sens mathématique) n'est pas le centre du réflecteur. Cette disposition permet de placer le guide hors du trajet de l'onde, ce qui **améliore légèrement le gain** de l'antenne.

### Antenne de communication Inmarsat :

- type : **classique**
- fréquence de travail **f = 1550 MHz**
- diamètre **D = 2,3 m**
- gain annoncé par le constructeur : **G = 29 dB**
- gain théorique calculé :

$$G = 6 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^2 = 6 \left( \frac{2,3}{0,193} \right)^2 = 852 = 29,3 \text{ dBi}$$



### Antenne de réception TV satellite :

- type : **offset**
- fréquence de travail **f = 10 à 12 GHz**
- diamètre **D = 1,2 m**
- gain théorique calculé : **G = 41,4 dBi**
- angle d'ouverture calculé : **1,5 °**

## 37- L'antenne cadre aux basses fréquences

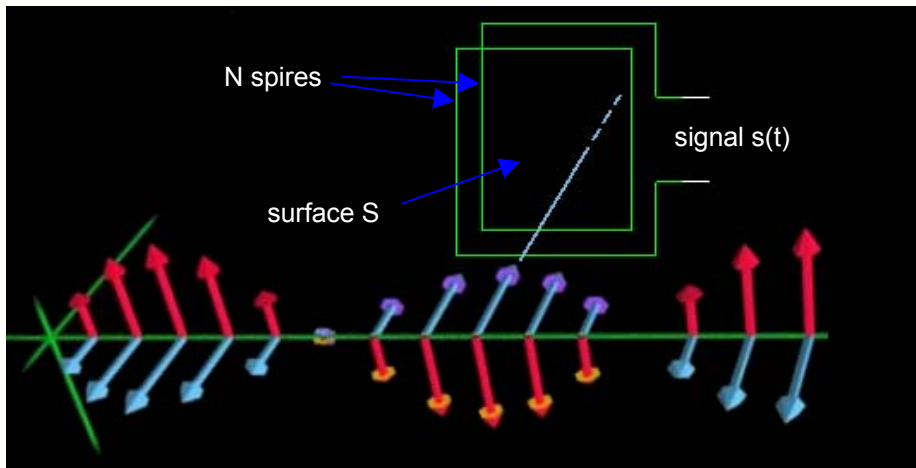


Pour les **fréquences inférieures à 10 MHz**, on utilise souvent, surtout en réception, les **antennes cadres**, mises au point dès les débuts de la radio mais toujours actuelles :

- l'impédance de l'antenne est inductive :  $\underline{Z}_a = R_a + jL_a\omega$
- sa résistance est très faible et s'écrit :  $R_a = 31000 \cdot N \left[ \frac{S}{\lambda^2} \right]^2$
- on compense souvent la partie inductive à l'aide d'un condensateur



En réception, l'antenne cadre est **sensible au champ magnétique** et fournit un signal  $s(t)$  maximal lorsqu'elle est perpendiculaire à  $B$  :



- le champ magnétique est sinusoïdal :

$$B(t) = B \cos \omega(t - \frac{x}{c})$$

- la tension apparaissant dans la bobine s'écrit alors :

$$s(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -NS \frac{dB(t)}{dt} = NS\omega B \sin(\omega t)$$

- ce qui correspond à une amplitude :

$$S = NS\omega B = \frac{2\pi}{c} NSfE$$

- et avec un noyau en **ferrite** de perméabilité  $\mu_r$  :

$$S = \mu_r NS\omega B = \frac{2\pi}{c} \mu_r NSfE$$



## 38- Antenne filaire ou antenne cadre ?



Pour recevoir les **fréquences inférieures à 10 MHz**, les dipôles et quart-d'onde sont peu utilisés et remplacés par des cadres : **pourquoi ?**

**Exemple** : on souhaite recevoir un signal radio de fréquence **f = 1 MHz** (  $\lambda = 300 \text{ m}$  ) avec une intensité de champ **E = 1V/m**

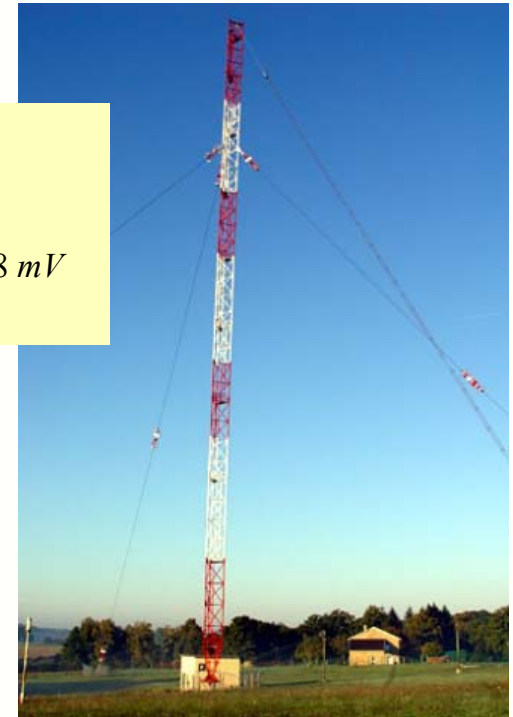
**Première solution** : l'antenne quart-d'onde

- l'antenne a une longueur de **L = 75 m !!**
- cette longueur est irréalisable
- la tension fournie par l'antenne vaut :  $S = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot E = 48 \text{ mV}$
- avec une longueur réduite à **7,5 m** on aurait **S = 4,8 mV**



**Seconde solution** : l'antenne cadre 1m X 1m

- le cadre comporte **N = 50 spires**
- la tension fournie par l'antenne vaut :  $S = \frac{2\pi}{c} N S f E = 1 \text{ mV}$
- l'encombrement est acceptable



**Troisième solution** : l'antenne cadre ferrite

- le cadre comporte **N = 300 spires**
- la ferrite a un diamètre de 2 cm et une perméabilité de 4000
- la tension fournie par l'antenne vaut :  $S = \frac{2\pi}{c} \mu_r N S f E = 7,9 \text{ mV}$
- l'encombrement est très faible, c'est en général la meilleure solution

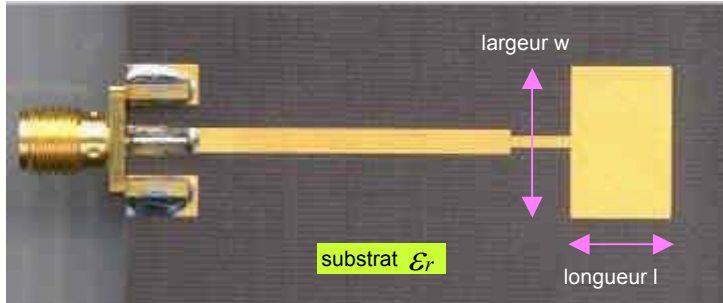




## 39- Les antennes patch

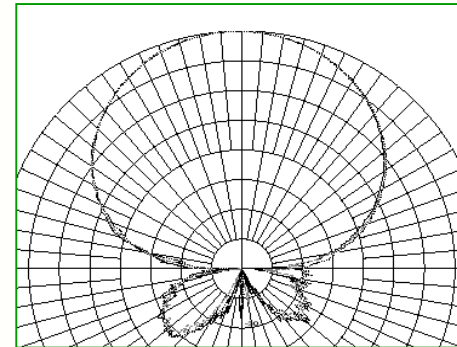


Si le dipôle demi-onde est une structure résonante filaire très utilisée, on sait aussi réaliser des **structures résonantes en surface**. Une des plus simples est le **rectangle conducteur** associé à son plan de masse :



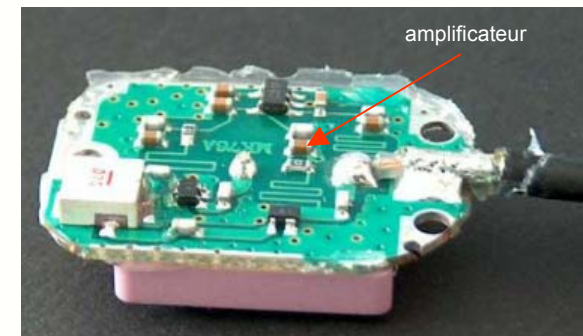
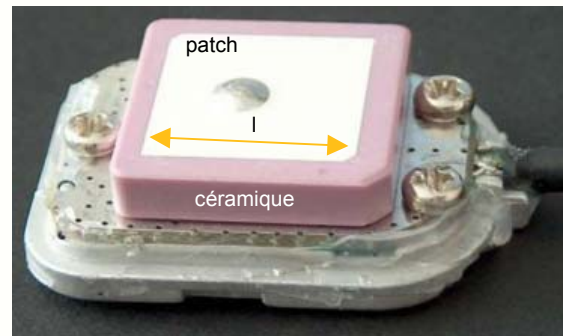
- la vitesse est plus faible que dans l'air :  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} < c$
- la longueur d'onde vaut donc :  $\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} < \lambda_0$
- il y a **résonance** si  $l = \frac{\lambda}{2}$  et  $w = 0,5.l \text{ à } 2.l$
- la largeur **w** joue sur l'**impédance** de la structure à la résonance

- le rayonnement est perpendiculaire à la surface du patch
- le diagramme de rayonnement est presque **circulaire**
- l'angle d'ouverture est compris entre 50 et 80 °



### Antenne GPS :

- type : **patch**
- fréquence de travail **f = 1575 MHz**
- céramique de permittivité relative  $\epsilon_r = 40$
- longueur du patch : **l = 1,5 cm**
- gain avec amplification : **G = 28 dB**
- alimentation : **3 à 5 V, 14 mA**



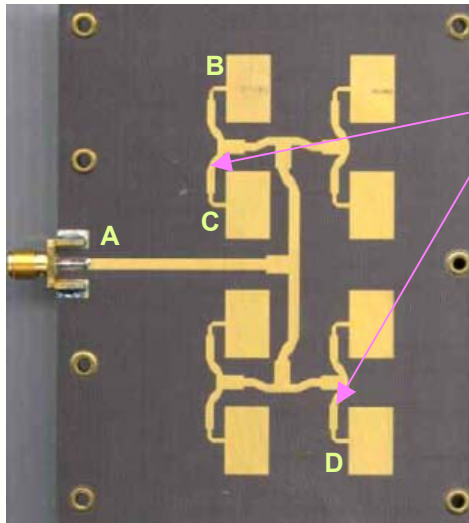


## 40- Les assemblages de patches



L'assemblage de patches sur une même surface permet de réaliser le **diagramme de directivité qu'on souhaite** :

- la **directivité** et donc le **gain augmentent** avec le nombre de patches
- tous les patches doivent être alimentés en phase, ce qui impose une **longueur de trajet identique** pour le signal



arrangement 2 X 4

trajets identiques  
 $AB=AC=AD=...$

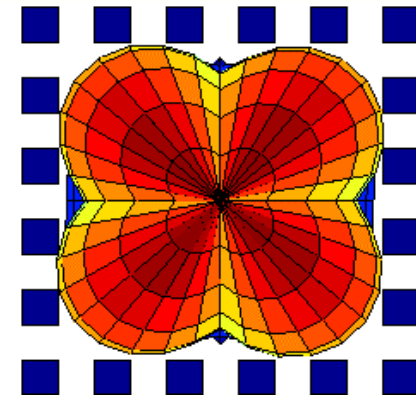
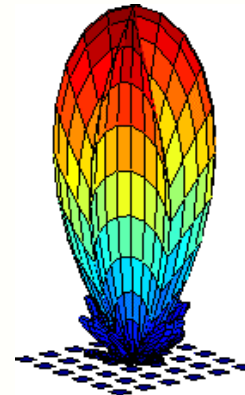
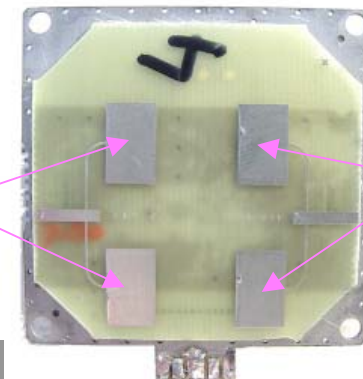


diagramme de directivité pour un arrangement 6 X 6



émetteur-récepteur 35 GHz

patches  
d'émission



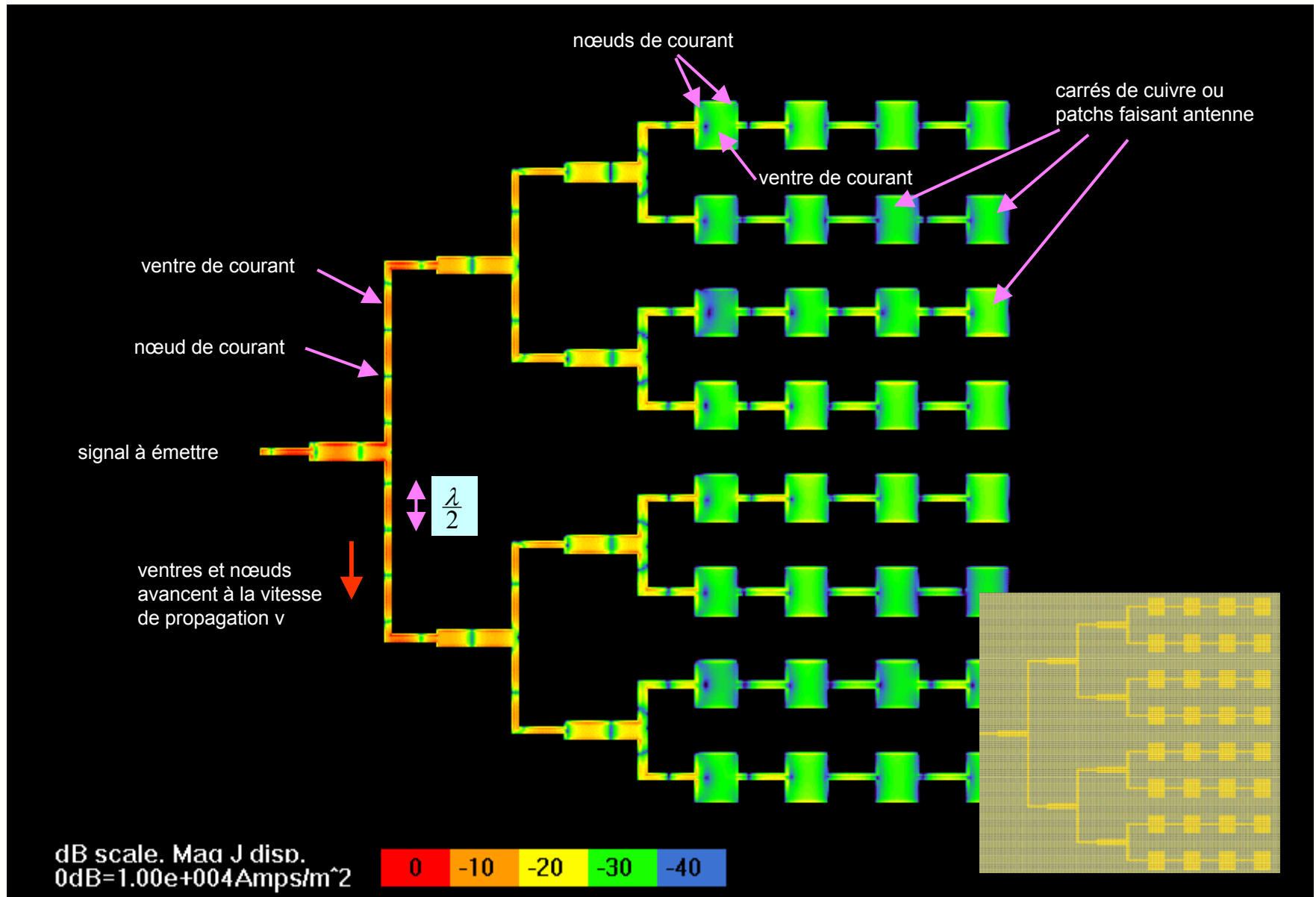
patches de  
réception

module radar 9,9 GHz

**Remarque** : l'assemblage d'un grand nombre de patches permet de réaliser des antennes planes aussi directives qu'une parabole

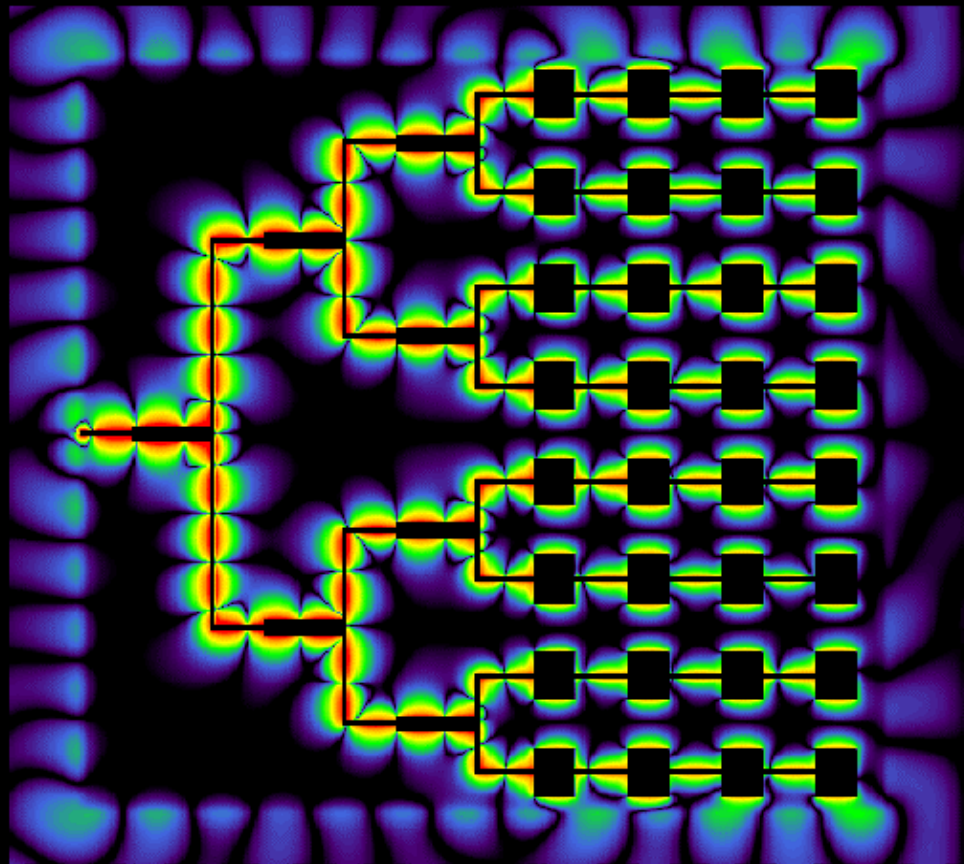


## 41 - Répartition des courants dans une antenne patch

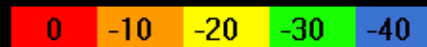




## 42- Champ magnétique produit par une antenne patch



dB scale. Hz displayed  
0dB=1.00e+000A/m





## 43- D'autres types d'antennes

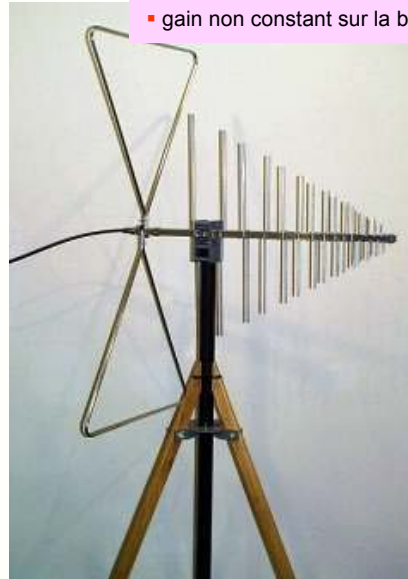


Les antennes décrites précédemment sont les plus courantes, mais voici quelques exemples d'autres modèles, ayant chacun des propriétés particulières de **bande passante**, de **directivité**, d'**impédance** et d'**encombrement** :



**Antenne plaque résonante pour GSM**

- faible encombrement, bi-bande, gain faible
- nécessite un logiciel de conception



**Antenne log-périodique**

- très large bande passante
- gain non constant sur la bande



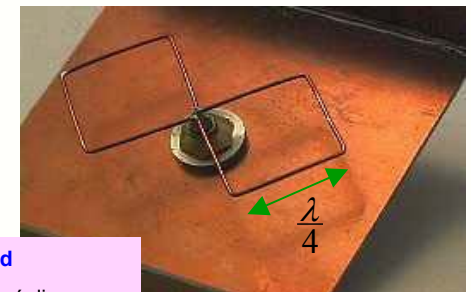
**Assemblage de 4 antennes hélices**

- polarisation circulaire
- bande passante moyenne, gain intéressant



**Antenne cadre ferrite pour transpondeur**

- très petite, implantable sous la peau
- gain intéressant



**Antenne biquad**

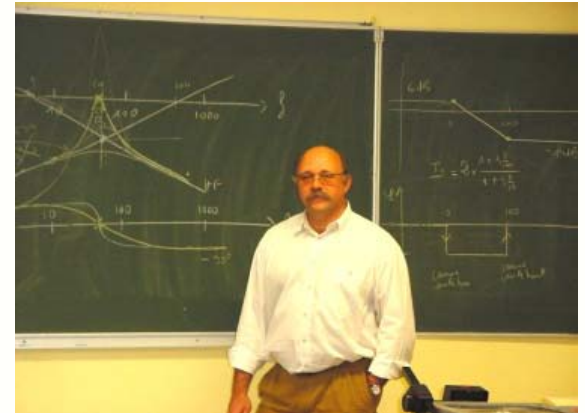
- petite, facile à réaliser
- gain intéressant



Le plus beau cornet du monde !



C'est grâce à cette antenne que pour la première fois, le soir du 11 juillet 1962, des images télévisées ont été transmises en direct des Etats-Unis via le satellite Telstar.



# FIN