

# SUPPORT DE TRANSMISSION RADIO

MR GHAZI AZIZ  
SUPMANAGEMENT



MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## Communication sans fil partout



GSM 900 MHz  
DCS 1800 MHz  
UMTS 2 GHz

Analogique 800 MHz  
DECT ~1900 MHz



Radar anticollision ~80 GHz  
Télépéage ~6 GHz  
Ouverture à distance:  
433 MHz-868MHz



Wifi/Bluetooth /UWB  
2.4 à 6 GHz



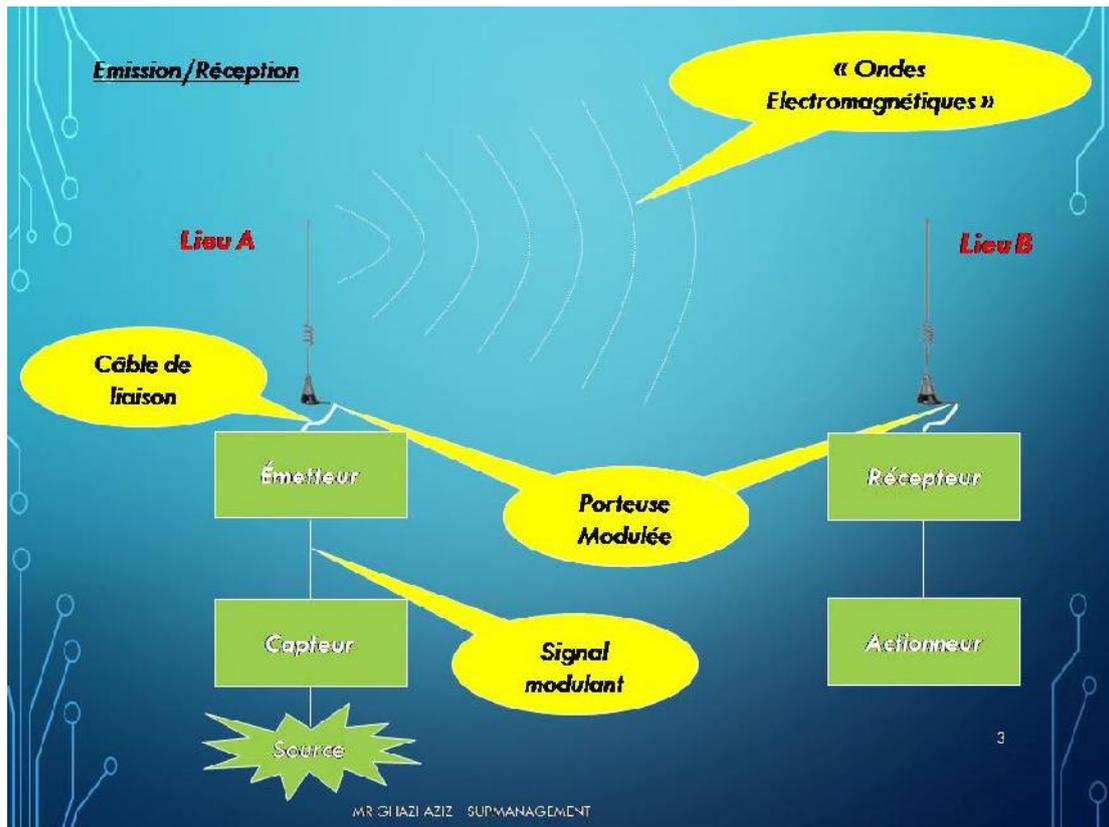
MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT



TV terrestre  
500 MHz

Systèmes satellites 1 à 45 GHz (Ex :  
Télévision 12 GHz, GPS 1.5 GHz)



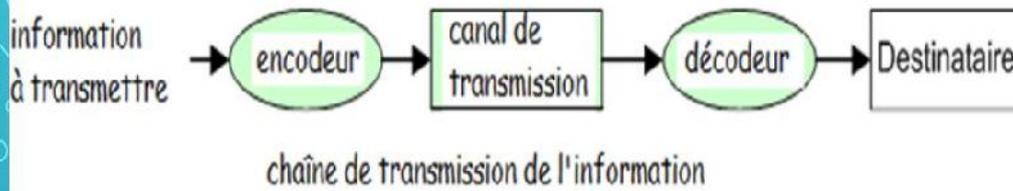


## LA CHAÎNE DE TRANSMISSION DE L'INFORMATION

La chaîne de transmission de l'information correspond à l'ensemble des éléments permettant de transférer des informations d'un point à un autre. Cette chaîne contient:

- **un encodeur** qui code l'information à transmettre
- **un canal de transmission** composé d'un émetteur qui envoie l'information codée et d'un récepteur qui reçoit l'information
- **un décodeur** qui décode l'information.

## EXEMPLE DE CHAÎNE DE TRANSMISSION



Prenez le cas du téléphone mobile (cellulaire)

- l'information à transmettre est la voix
- l'encodeur transforme les ondes sonores en signal analogique (tension électrique) par l'intermédiaire du microphone du téléphone. Le signal analogique est numérisé.
- le canal de transmission est composé de l'émetteur (antenne du téléphone émetteur) et du récepteur (antenne du téléphone récepteur). L'émetteur transforme le signal numérisé en ondes électromagnétiques qui sont envoyées vers des antennes-relais. Les OEM sont ensuite envoyées vers l'antenne du téléphone récepteur.
- le décodeur transforme les OEM en signal numérisé puis analogique qui est convertit en onde sonore.

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## PROPAGATION LIBRE ET GUIDÉE

La propagation du signal peut se faire de 2 manières:

### 1) propagation guidée:

les signaux utilisent une ligne de transmission entre l'émetteur et le récepteur.

Les câbles électriques sont utilisés pour transmettre des informations. Ce type de ligne est utilisé pour les courtes distances car l'amortissement du signal est important et les champs électromagnétiques déforment le signal transmis. On utilise également des fibres optiques. Les informations sont transmises sous forme d'OEM visibles ou proche du visible.

### 2) propagation libre:

les OEM (ondes hertziennes) peuvent se déplacer dans toutes les directions (cas des OEM émises puis reçues par une antenne). On les utilise, par exemple, dans la téléphonie mobile.

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

# QUALITÉ DE LA TRANSMISSION

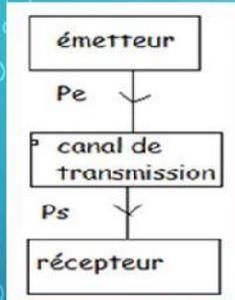
## 1) atténuation d'un signal

Toute transmission de signal s'accompagne d'une perte de puissance.

L'atténuation  $A$  d'un signal se propageant dans un câble ou une fibre optique est égale à:

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_e}{P_s}$$

- $P_e$ : puissance fournie par l'émetteur en watt (W)
- $P_s$ : puissance reçue par le récepteur en watt (W)
- $A$ : atténuation en décibel (dB)



Le coefficient d'atténuation linéique est égale au rapport de l'atténuation  $A$  sur la longueur du fil:

$$\alpha = \frac{A}{L}$$

Exemple: fibre optique =  $2 \times 10^{-4}$  dB.m<sup>-1</sup>; câble coaxial utilisé pour les antennes satellites = 0,2 dB.m<sup>-1</sup>

MR. GHAZI AZIZ - SUPMANAGEMENT

## EXERCICE

- **Exercice** : un canal de transmission a un coefficient d'atténuation de  $8,0$  dB.km<sup>-1</sup> ; la puissance mesurée en entrée est  $P_e = 100$  mW ; le récepteur pour fonctionner impose que la puissance de sortie  $P_s = 3,8$  μW. Quelle est la longueur  $L_{\max}$  maximale de la ligne permettant de transmettre l'information ?

## RÉPONSE :

$$\alpha = \frac{A}{L}$$

$$A = 10 \cdot \log(P_s/P_e)$$

$$L_{\max} = \frac{A}{\alpha} = \frac{10 \cdot \log \frac{P_e}{P_s}}{\alpha}$$

$$L_{\max} = \frac{10 \cdot \log \frac{100 \times 10^{-3}}{3,8 \times 10^{-6}}}{8,0}$$

$$L_{\max} = 5,5 \text{ km}$$

MR GHAZI AZIZ - SUFMANAGEMENT

9

## PROPAGATION EN ESPACE LIBRE HISTORIQUE

- 1819: Oersted champ magnétique créé par un courant électrique
- 1831: Faraday champ électrique créé par un champ magnétique variable
- 1865: Maxwell théorie des ondes électromagnétiques
- 1888: Hertz expérience sur la propagation des ondes électromagnétiques
- 1896: Marconi réception d'ondes électromagnétiques (liaison transatlantique)
- 1895: Röntgen découverte des rayons X

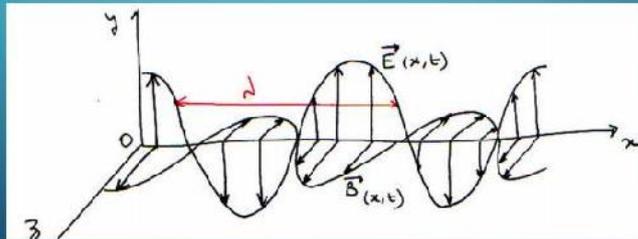
MR GHAZI AZIZ - SUFMANAGEMENT

10

# ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

- Définition

Une onde électromagnétique est la combinaison du champ électrique et du champ magnétique. Le champ électrique est dû au courant circulant dans l'antenne, le champ magnétique est quant à lui dû au déplacement des électrons dans l'antenne.



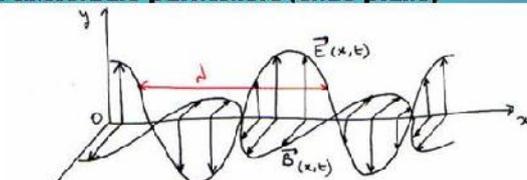
MR GHAZI AZIZ SUFMANAGEMENT

11

# CARACTÉRISTIQUES DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

- Pas de support matériel
- Propagation d'une variation d'un champ électrique E, associée à une variation d'un champ magnétique B
- Vitesse de propagation dans le vide c, vitesse de la lumière
- B et E Les normes des champs E et B sont reliées entre elles par :  $B = E/c$

Exemple d'une OEM sinusoïdale particulière (onde plane)



$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cos 2\pi f \left( t - \frac{x}{C} \right) \vec{j}$$

$$\vec{B}(x, t) = B_0 \cos 2\pi f \left( t - \frac{x}{C} \right) \vec{k}$$

Comme pour les ondes générales, les OEM sont définies par T, f,  $\omega$ , k,  $\lambda$

Avec  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$

12

## PROPRIÉTÉS DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par 3 paramètres, étroitement liés, qui permettent de les classer et qui déterminent aussi leur utilisation technologique et leur impact sur l'environnement. Il s'agit de :

- leur longueur d'onde  $\lambda$ , qui est le trajet parcouru par l'onde durant une période T :

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

- leur fréquence, mesurée en Hertz (Hz), et qui est le nombre de longueurs d'onde compris dans 1 seconde.
- La densité de puissance surfacique qui est le flux énergétique reçu par unité de surface, s'exprimant en Watt/m<sup>2</sup>. Elle est donnée par la relation:

E : champ électrique

$$P = \frac{E^2}{377}$$

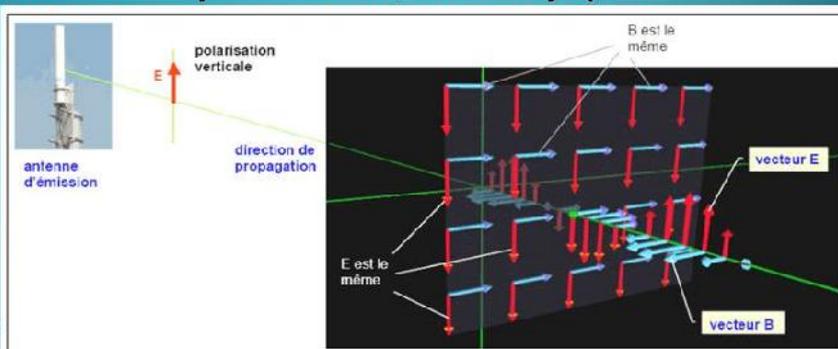
NB: l'énergie transportée par une onde électromagnétique est d'autant plus grande que sa fréquence est grande, ou, ce qui revient au même, que sa longueur d'onde est petite.

## PROPRIÉTÉS DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

A ces trois principales propriétés, nous pouvons ajouter :

La polarisation qui est la direction de son champ électrique E.

- si E garde une direction constante, on dit que la polarisation est rectiligne (il s'agit du cas le plus courant)
  - si E est horizontal (polarisation horizontale)
  - ou vertical (polarisation verticale)
- il existe aussi des polarisations circulaires et elliptiques.



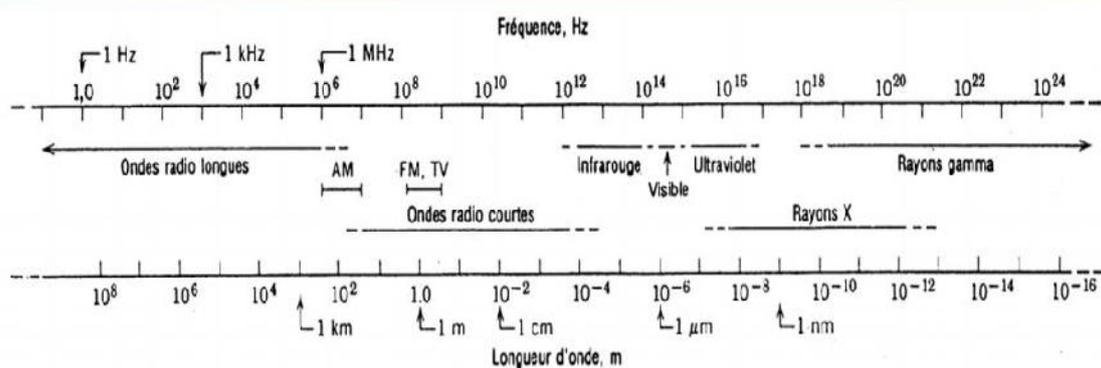
# GESTION INTERNATIONALE DU SPECTRE DES OEM

- Les ondes électromagnétiques, dont le spectre utile s'étend de quelques kHz à plusieurs dizaines de GHz, se propagent dans l'espace sans tenir compte des frontières des états. L'utilisation des fréquences doit donc faire l'objet d'une concertation internationale et doit être strictement réglementée.
- L'Union Internationale des Télécommunications (ITU) est une organisation internationale, basée à Genève, dont le rôle est de coordonner les réseaux et les services de télécommunication entre les gouvernements des états membres et les acteurs économiques du secteur.



## LE SPECTRE DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie.



## LE SPECTRE DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

(1) Les ondes radios : leurs longueurs d'onde vont de quelques kilomètres à 0,3 m. Leur domaine de fréquence s'étend de quelques Hz jusqu'à  $10^9$  Hz. L'énergie des photons va pratiquement de 0 à  $10^{-5}$  eV. Les ondes qui sont utilisées pour les transmissions radio et télévision sont produites par des dispositifs électroniques, essentiellement des circuits oscillants.

(2) Les micro-ondes : leurs longueurs d'onde vont de 0,3 m à  $10^{-3}$  m. Leur domaine de fréquence s'étend de  $10^9$  Hz à  $3 \times 10^{11}$  Hz. L'énergie des photons va  $10^{-5}$  eV à  $10^{-3}$  eV. Ces ondes sont utilisées dans les radars et d'autres systèmes de communication, les téléphones cellulaires, les fours à micro ondes, et aussi dans l'analyse très fine des détails très fins des structures atomiques et moléculaires. Elles sont également produites par des dispositifs électroniques. La région des micro-ondes est également désignée par le sigle UHF (ultra-hautes fréquences par rapport aux fréquences radio)

## LE SPECTRE DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

(3) Le spectre infrarouge : celui-ci couvre les longueurs d'ondes de  $10^{-3}$  m à  $7,8 \times 10^{-7}$  m. Le domaine de fréquence s'étend de  $3 \times 10^{11}$  Hz à  $4 \times 10^{14}$  Hz et l'énergie des photons va de  $10^{-3}$  eV à environ 1,6 eV. Ces ondes sont produites par les molécules et les corps chauds. Elles ont de nombreuses applications dans l'industrie, la médecine, l'astronomie.

(4) Le spectre visible ou lumière : c'est une bande étroite formée par les longueurs d'onde auxquelles notre rétine est sensible. Il s'étend en longueur d'onde de  $7,8 \times 10^{-7}$  m à  $3,8 \times 10^{-7}$  m et en fréquence de  $4 \times 10^{14}$  Hz à  $8 \times 10^{14}$  Hz. L'énergie des photons va de 1,6 eV à 3,2 eV. La lumière est produite par les atomes et les molécules par suite des réajustements internes des mouvements de leurs composants principalement des électrons. Il n'est pas nécessaire d'insister sur l'importance de la lumière dans notre existence.

## LE SPECTRE DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

(5) Les rayons ultra-violet : ils vont de  $3,8 \times 10^{-7}$  m à environ  $6 \times 10^{-10}$  m en longueur d'onde et de  $8 \times 10^{14}$  Hz à environ  $3 \times 10^{17}$  Hz en fréquence. L'énergie des photons correspondants va de 3 eV à  $2 \times 10^3$  eV. Ces ondes sont produites par des atomes et des molécules dans des décharges électriques. Leur énergie est de l'ordre de grandeur de l'énergie mise en jeu dans de nombreuses réactions chimiques. Ce qui rend de beaucoup de leurs effets chimiques. Le soleil est une source très intense de rayonnement ultra-violet et c'est ce facteur qui est essentiellement responsable du brunissement de la peau.

(6) Les rayons X : cette partie du spectre électromagnétique s'étend de  $10^{-9}$  m à environ  $6 \times 10^{-12}$  m en longueur d'onde ou entre  $3 \times 10^{17}$  Hz et  $5 \times 10^{19}$  Hz en fréquence. L'énergie des photons va de  $1,2 \times 10^3$  eV à  $2,4 \times 10^5$  eV. Cette partie du spectre électromagnétique a été découverte en 1895 par le physicien allemand W. Roentgen au cours de l'étude des rayons cathodiques. Les rayons X sont produits par les électrons les plus fortement liés des couches internes des atomes.

## LE SPECTRE DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

(7) Les rayons gamma : ces ondes électromagnétiques sont d'origine nucléaire. Elles recouvrent la limite supérieure du spectre des rayons X. Leurs longueurs d'onde s'étendent de  $10^{-10}$  m à en dessous de  $10^{-14}$  m ce qui correspond à un domaine de fréquence  $3 \times 10^{18}$  Hz à jusqu'à plus de  $3 \times 10^{22}$  Hz. Les énergies des photons vont de  $10^4$  eV jusqu'à environ  $10^7$  eV. Ces énergies sont du même ordre que celles mises en jeu dans les processus nucléaires et l'absorption des rayons  $\gamma$  peut donc produire des modifications du noyau. Ces rayons sont produits par de nombreuses substances radioactives et sont présents en grande quantité dans les réacteurs nucléaires.

# LE SPECTRE DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

CEM	fréquence	$\lambda$	Applications
rayons X	de 30 PHz à 30 EHz	de 10 nm à 10 pm	imagerie médicale, radiographie (THz = Tera Hertz $10^{12}$ , PHz = Peta $10^{15}$ Hertz, EHz = Exa Hertz $10^{18}$ )
rayons UV	de 750 THz à 30 PHz	de 400 nm à 10 nm	lumière solaire
visible	de 430 THz à 750 THz	de 700 nm à 400 nm	vision humaine, photosynthèse
infrarouges	de 400 GHz à 430 THz	de 3 mm à 700 nm	chauffage, détecteurs de présence
EHF	30 à 300 GHz	10 cm à 1 mm	radars, communication par satellite, micro-onde
SHF	3 à 30 GHz	10 à 1 cm	radars, armes anti-missile
UHF	300 MHz 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 CO, 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, électromagnétisme
quasi statiques	0 à 3 Hz	> 1000 km	champs électrique et magnétique terrestre

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## ÉNERGIES TRANSPORTÉES PAR LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

La densité d'énergie transportée par une OEM sinusoïdale est:

$$e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2\mu_0} B_0^2 \quad J/m^3 \quad (J : \text{Joule})$$

L'intensité moyenne (flux de puissance) associée à l'onde est:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 C E_0^2 = \frac{1}{2\mu_0} C B_0^2 \quad W/m^2 \quad (W : \text{Watt})$$

Permittivité du vide  $\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$  SI (système international)

Perméabilité du vide  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  SI

Lien avec la vitesse de propagation C : 
$$C = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

## VITESSE DE PROPAGATION DANS UN MILIEU

Si la propagation se fait dans un milieu dont l'indice de réfraction est  $n$ , la vitesse de propagation est  $v = C/n$

- Vide  $n = 1$
- Air (conditions normales)  $n = 1,00029$
- Gaz  $\text{CO}_2$   $n = 1,00045$
- Eau  $n = 1,33$
- Verre  $n = 1,5$  à  $1,7$

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow n = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot \mu}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}$$

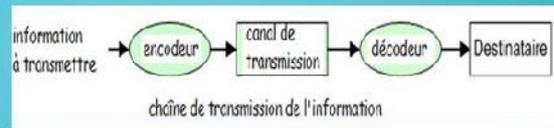
On remplace:  $\epsilon_0$  par  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  et  $\mu_0$  par  $\mu = \mu_0 \mu_r$   
où  $\epsilon_r$  et  $\mu_r$  sont les permittivité et perméabilité relatives du milieu

$$C = nv \text{ et } C = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \text{ et } v = \sqrt{\frac{1}{\epsilon \mu}} \text{ donc } n = \frac{C}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} \Rightarrow v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

## RÉCAPITULATIF

1. Quels sont les composants d'une chaîne de transmission de l'information ? Quelles sont les deux manières de la propagation d'un signal ?
2. Donnez la formule de calcul de l'atténuation d'un signal ? Et le coefficient d'atténuation linéique ?
3. Donnez les découvertes effectuées aux années 1865, 1888 et 1896 pour les O.E.M ?
4. Donnez la définition d'une onde électromagnétique ?
5. Quelles sont les principales caractéristiques d'une O.E.M ?
6. Donnez les propriétés d'une O.E.M ?
7. Donnez la formule de la densité d'énergie transportée par une O.E.M. sinusoïdale ? De même pour l'intensité moyenne de puissance ?
8. Donnez la formule de la vitesse de propagation dans un milieu d'indice  $n$  ? Calculer cette vitesse pour le verre  $n = 1,7$ , et l'air  $n = 1,00029$  ?

# SOLUTION



**1. Chaîne de transmission**

**2. propagation guidée propagation en espace libre**

**3. Atténuation :**  $A = 10 \cdot \log \frac{P_e}{P_s}$        $\alpha = \frac{A}{L}$

**4. 1865: Maxwell théorie des ondes électromagnétiques**

- **1888: Hertz expérience sur la propagation des ondes électromagnétiques**

- **1896: Marconi réception d'ondes électromagnétiques (liaison transatlantique)**

**5. Définition :** Une onde électromagnétique est la combinaison du champ électrique et du champ magnétique. Le champ électrique est dû au courant circulant dans l'antenne, le champ magnétique est quant à lui dû au déplacement des électrons dans l'antenne.

**6. Pas de support matériel - Propagation d'une variation d'un champ électrique E, associée à une variation d'un champ magnétique B - Vitesse de propagation dans le vide c, vitesse de la lumière - B et E Les normes des champs E et B sont liées entre elles par : B = E/c**

**7. longueur d'onde - Fré**  $e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2\mu_0} B_0^2 \quad J/m^3$        $I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2 = \frac{1}{2\mu_0} c B_0^2 \quad W/m^2$

**8. Densité d'énergie**

l'intensité moyenne de puissance

25

**9. Vitesse de propagation dans un milieu d'indice n :**

$v = c/n$     donc  $v(\text{verre}) = c/1.7 = 1.76 \times 10^8 \text{ m/s}$  et  $v(\text{air}) = c/1.00029 = 2.999 \times 10^8 \text{ m/s}$

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## RELATION ENTRE CHAMP ÉLECTRIQUE ET CHAMP MAGNÉTIQUE, IMPÉDANCE INTRINSÈQUE DU VIDE

- A plusieurs longueurs d'ondes de l'antenne le rapport entre l'amplitude des champs magnétiques et électriques est constant et égal à l'impédance intrinsèque du milieu de propagation :

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

avec :

$Z_0$  : impédance intrinsèque du milieu de propagation en ohms

E : amplitude du champ électrique en V/m

H : amplitude du champ magnétique en H/m

$\mu$  : perméabilité du milieu

$\epsilon$  : permittivité du milieu

$B = \mu H$  (B: induction magnétique)

- Si le milieu de propagation est le vide ou l'air on a :

L'impédance intrinsèque du vide, paramètre important de la propagation des ondes, est de 377 ohms.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{8,85 \cdot 10^{-12}}} = 376,819 = 120 \cdot \pi$$

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

# LES ÉQUATIONS DE MAXWELL

e : excitation électrique  
 h : excitation magnétique  
 b : induction magnétique  
 d : induction électrique

Elles régissent les variations des vecteurs ( $\vec{e}, \vec{h}, \vec{d}, \vec{b}$ ) dans le temps et dans l'espace, compte tenu de l'existence de sources primaires ( $\vec{i}_p, \vec{q}_p$ ) et des courants et charges qu'elles créent ( $\vec{i}_c, \vec{q}_c$ ). En valeurs instantanées complexes on écrit :

$$\begin{aligned} \text{rot}(\vec{e}) &= -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} && \text{Équation de Maxwell-Paraday} && \text{rot}(\vec{h}) &= \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} + \vec{i}_p + \vec{i}_c && \text{Équation de Maxwell-Ampère} \\ \text{div}(\vec{d}) &= \vec{q}_p + \vec{q}_c && \text{Équation de Maxwell-Gauss} && \text{div}(\vec{b}) &= 0 && \text{Équation de Maxwell-flux} \end{aligned}$$

Elles doivent être complétées par l'équation de conservation des charges et des courants :

$$\text{div}(\vec{i}_p + \vec{i}_c) + \frac{\partial (\vec{q}_p + \vec{q}_c)}{\partial t} = 0$$

MR GI IAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## MILIEUX HOMOGÈNES ET ISOTROPES

Pour des milieux homogènes et isotropes, on obtient alors les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{rot}(\vec{e}) &= -\underline{\mu} \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} && (\vec{b} = \underline{\mu} \vec{h}) \\ \text{rot}(\vec{h}) &= \underline{\sigma} \vec{e} + \underline{\epsilon} \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} && \left( \begin{array}{l} \vec{d} = \underline{\epsilon} \vec{e} \quad \vec{i}_c = \underline{\sigma} \vec{e} \quad \vec{i}_d = \underline{\epsilon} \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} \end{array} \right) \\ \text{div}(\vec{d}) &= \vec{q}_c && \text{div}(\vec{b}) = 0 \end{aligned}$$

Courant de déplacement (négligeable dans les conducteurs)

MR GI IAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## Régime sinusoïdal

Quand on se place en régime sinusoïdal, ces équations deviennent :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\text{rot}}(\underline{\underline{\mathbf{E}}}) &= -j\omega\mu\underline{\underline{\mathbf{H}}} & \overrightarrow{\text{rot}}(\underline{\underline{\mathbf{H}}}) &= \sigma\underline{\underline{\mathbf{E}}} + j\omega\varepsilon\underline{\underline{\mathbf{E}}} \\ \text{div}(\underline{\underline{\mathbf{D}}}) &= \underline{\underline{Q_c}} & \text{div}(\underline{\underline{\mathbf{B}}}) &= 0\end{aligned}$$

$\underline{\underline{\mathbf{E}}}$ ,  $\underline{\underline{\mathbf{H}}}$ ,  $\underline{\underline{\mathbf{D}}}$ ,  $\underline{\underline{\mathbf{B}}}$ ,  $\underline{\underline{Q_c}}$  sont les amplitudes complexes des grandeurs correspondantes.

## Permittivité équivalente d'un milieu

Milieu sans perte ( $\sigma = 0$  et  $\varepsilon$  réel)

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\underline{\underline{\mathbf{H}}}) = j\omega\varepsilon\underline{\underline{\mathbf{E}}}$$

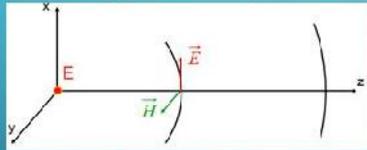
Milieu avec pertes conductrices ( $\sigma$  fini et  $\varepsilon$  réel)

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\underline{\underline{\mathbf{H}}}) = \sigma\underline{\underline{\mathbf{E}}} + j\omega\varepsilon\underline{\underline{\mathbf{E}}} = j\omega\underline{\underline{\varepsilon_e}}\underline{\underline{\mathbf{E}}}$$

avec  $\underline{\underline{\varepsilon_e}} = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega}$

## PROPAGATION D'UNE OEM

Pour réaliser une transmission sans fil, on va donc produire des champs électrique et magnétique à partir de courants et charges présents sur une antenne, elle-même alimentée par une ligne de transmission. Ces champs vont eux créer des courants et charges sur l'antenne de réception après s'être propagés dans l'espace et fournir ainsi de l'énergie à la ligne en réception.



Une source ponctuelle va rayonner dans l'espace une OEM sphérique (les points équiphase ou surface d'onde forment une sphère centrée en E).

Quand on se place suffisamment loin de la source, au niveau du  $31^{\text{e}}$  point d'observation, la surface d'onde peut être assimilée à un plan : on parle alors d'onde plane.

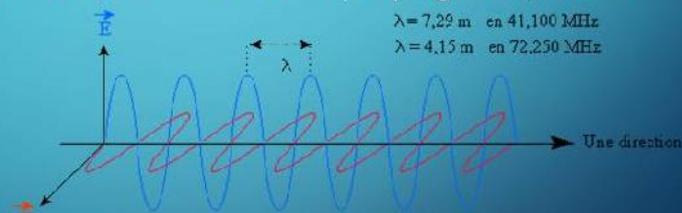
MR GHAZI AZIZ SUFMANAGEMENT

## Propagation dans des diélectriques sans pertes

Une onde OEM est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui forment un trièdre direct avec la direction de propagation; soit le vecteur unitaire de cette propagation, nous avons :

$$\vec{E} = \vec{H} \wedge \vec{u} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

$$\vec{H} = \vec{u} \wedge \vec{E} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$$



Structure de l'onde électromagnétique dans l'espace fig 15

MR GHAZI AZIZ SUFMANAGEMENT

32

# Propagation d'une OEM

$\epsilon$  et  $\mu$  sont la permittivité et la perméabilité magnétique du milieu où s'effectue la propagation. Dans le cas de l'air ou du vide :

$\epsilon = \epsilon_0 = 1/(36\pi \cdot 10^9)$  en (F/m) et  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  en (H/m)

Les équations de propagation pour les champs  $\vec{e}$  et  $\vec{h}$  et (exprimés en valeurs instantanées complexes) s'écrivent sous la forme suivante :

$$\Delta \vec{e} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{e}}{\partial t^2} = 0$$

$$\Delta \vec{h} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{h}}{\partial t^2} = 0$$

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT 2020/2021

$$\Delta \vec{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 a_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a_x}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 a_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a_y}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 a_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a_z}{\partial z^2} \end{pmatrix}$$

33

Opérateur Laplacien

## I.2. Propagation d'une OEM

Elles deviennent dans le cas où la propagation se fait selon la direction Oz :

$$\frac{\partial^2 \vec{e}}{\partial z^2} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{e}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 \vec{h}}{\partial z^2} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{h}}{\partial t^2} = 0$$

Le rapport  $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$  représente la vitesse de propagation de l'onde. Sachant que généralement on considère que  $\mu_r = 1$  (sauf milieux ionisés et magnétiques) on écrit :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{n}$$

où  $n$  est l'indice de réfraction du milieu et  $\epsilon_r$  est sa permittivité relative ou constante diélectrique.

34

## Propagation d'une OEM

En régime sinusoïdal, ces équations admettent des solutions de la forme :

$$\vec{e}(z, t) = \vec{E} \exp j(\omega t - kz) \quad \text{et} \quad \vec{h}(z, t) = \vec{H} \exp j(\omega t - kz)$$

avec :  $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$  (paramètre de phase de l'onde)

Le rapport des modules de  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  exprime l'impédance d'onde du milieu considéré (en W) :

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z \quad \text{c'est une quantité réelle.}$$

## Puissance et régime d'onde

Le vecteur de Poynting complexe  $\vec{P} = \frac{1}{2} \vec{E} \wedge \vec{H}^*$  (en W/m<sup>2</sup>) permet de déterminer la puissance transportée par une onde EM et ainsi en déduire le régime d'ondes associés :

• Pour une onde progressive pure, pour laquelle  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  sont en **phase** (leur amplitude est réelle), ce vecteur est une **quantité réelle** : cas d'un diélectrique sans perte.

## ENERGIE D'UNE O.E.M DANS LE VIDE

L'énergie électromagnétique est l'énergie du champ électromagnétique contenue dans un volume donné de l'espace, à un instant donné. Cette énergie électromagnétique extensive s'exprime en Joules (J)

D'après les équations de Maxwell, la densité d'énergie électromagnétique dans le vide ou l'énergie volumique associée à l'onde électromagnétique est :

$$w = \frac{dE_e}{dV} = \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{\mu_0} \vec{B}^2 \right)$$

MR GHIAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## EXERCICE OEM

On considère une onde électromagnétique plane, progressive et sinusoïdale de pulsation  $\omega$ , se propageant dans le vide (caractérisé par la constante de la loi de Coulomb  $\epsilon_0$ , la

perméabilité magnétique du vide  $\mu_0$  et la célérité  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ ). L'espace est rapporté à un repère cartésien Oxyz de base orthonormée. L'onde se propage dans la direction  $Oy$ . Le vecteur champ électrique  $\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - k\vec{r})\vec{u}_x$  d'amplitude  $E_0$  est parallèle à  $Ox$ .

1. Écrire, en notation réelle, les composantes du vecteur d'onde  $\vec{k}$  puis celles du vecteur champ électrique  $\vec{E}$  au point  $M$  de coordonnées  $(x, y, z)$  tel que  $\vec{r} = O\vec{M}$  et à l'instant  $t$ .
2. En utilisant les équations de Maxwell dans le vide (voir boîte à outils), établir l'équation de propagation de  $\vec{E}$  dans le vide. En déduire la relation de dispersion de cette onde dans le vide.
3. En utilisant les équations de Maxwell dans le vide (voir boîte à outils), exprimer les composantes du vecteur champ magnétique de l'onde  $\vec{B}$  au point  $M$ . Préciser en particulier l'expression de l'amplitude  $B_0$  du champ magnétique.
4. Représenter sur un schéma clair les vecteurs  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  et  $\vec{k}$ . L'onde électromagnétique étudiée est-elle longitudinale ou transversale? Justifier votre réponse.
5. Calculer la densité volumique d'énergie électromagnétique  $U$ . Exprimer sa valeur moyenne temporelle  $\langle U \rangle$  en fonction de  $E_0$  et  $\epsilon_0$ .

6. Déterminer les composantes du vecteur de Poynting  $\vec{S} = \vec{E} \wedge \frac{\vec{B}}{\mu_0}$  puis son module  $S$  et enfin sa valeur moyenne temporelle  $\langle S \rangle$  en fonction de  $E_0$ ,  $\epsilon_0$  et  $c$ . Quelle relation existe-t-il entre les valeurs moyennes de  $U$  et  $S$ ?
7. Cette onde transporte une puissance électromagnétique moyenne  $\langle P \rangle$  de  $0,5 \text{ kW}$ , évaluée à travers une surface  $\Sigma = 5 \text{ mm}^2$  normale à la direction de propagation. Calculer les valeurs numériques de  $E_0$  et  $B_0$ ?

On prendra :  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \text{ F.m}^{-1}$  et  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ .

# EQUATION DE PROPAGATION DANS LE VIDE

Dans le vide, les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\vec{H} = \vec{J}/\mu_0 \text{ et } \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0, \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$\vec{\nabla} = -\frac{\vec{u}}{c} \frac{\partial}{\partial t}$

l'opérateur nabla pour des fonctions d'ondes planes progressives :

Les équations de Maxwell-Faraday et Maxwell-Ampère donnent :

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}, \quad \vec{\nabla}^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \vec{0}$$

Ainsi, l'onde se propage avec une célérité :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

( $\epsilon_0$ : permittivité diélectrique dans le vide =  $8.85 \times 10^{-12} - \frac{10^{-9}}{36\pi}$  F/m )  
 ( $\mu_0$ : permittivité magnétique dans le vide =  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m)

39

## EXERCICE

Montrer les équations de propagation dans le **vide** à partir des équations de Maxwell-Faraday, Maxwell-Ampère et Maxwell-Gauss

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}, \quad \vec{\nabla}^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \vec{0}$$

NB: égalité vectorielle  $\vec{\operatorname{rot}} \vec{\operatorname{rot}} = \vec{\operatorname{grad}} \operatorname{div} - \Delta$   
 $\Delta = \nabla^2$

40

## SOLUTION

Partons de l'équation de Maxwell-Faraday en absence de charges électriques :  $\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ .

Calculons  $\text{rot } \text{rot } \vec{E} = \text{rot} \left( -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)$ . Or, parce que les variables sont indépendantes, je peux inverser l'ordre des dérivations et écrire  $\text{rot} \left( -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{B}$ .

L'équation de Maxwell-Ampère en l'absence de charges électriques me dit que  $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ , d'où je peux écrire que  $\text{rot } \text{rot } \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ , soit encore :

$$\text{rot } \text{rot } \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

En utilisant l'égalité vectorielle  $\text{rot } \text{rot } = \text{grad } \text{div} - \Delta$ , j'ai  $-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \text{grad}(\text{div } \vec{E}) - \Delta \vec{E}$ . L'équation de Maxwell-Gauss me dit que  $\text{div } \vec{E} = 0$  et

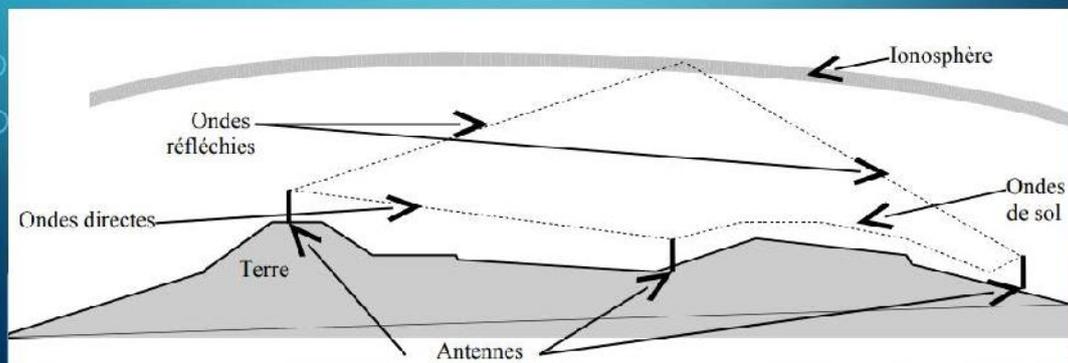
donc que  $-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\Delta \vec{E}$ . Ce qui me donne finalement l'équation :

$$\Delta \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}$$

## MODES DE PROPAGATION

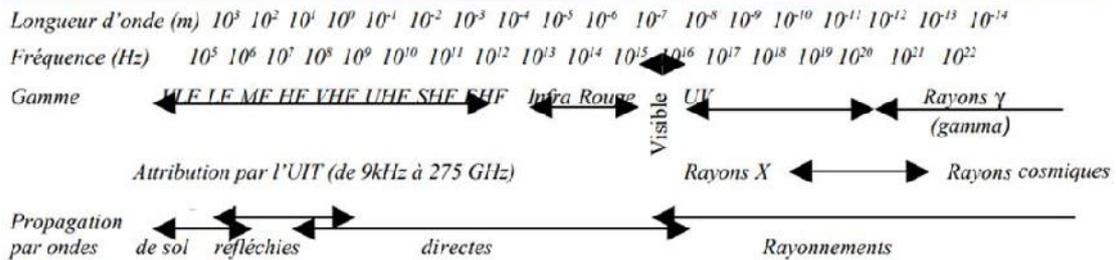
Les ondes peuvent se propager de différentes façons :

- **Ondes directes**, les antennes sont en vue l'une et l'autre.
- **Ondes de sol** les ondes suivent le relief terrestre;
- **Ondes réfléchies**, les ondes rebondissent sur les hautes couches de l'atmosphère, fortement ionisées (ionosphère, couches E et F), redescendent sur la terre



## MODES DE PROPAGATION

Fréquences	Longueurs d'onde	Ondes	Gamme	Mode de Propagation
en dessous de 30 kHz	> 10 km	Myriamétriques	TGO / VLF	Sol
30 kHz - 300 kHz	10 km - 1.000 m	Kilométriques	GO / LF	<u>Sol</u>
300 kHz - 3 MHz	1.000 m - 100 m	Hectométriques	PO / MF	Sol ; <u>Réfléchies</u>
3 MHz - 30 MHz	100 m - 10 m	Décamétriques	OC / HF	Réfléchies
30 MHz - 300 MHz	10 m - 1 m	Métriques	THF / VHF	Réfléchies ; <u>Directes</u> ;
300 MHz - 3 GHz	1 m - 10 cm	Décimétriques	UHF / UHF	<u>Directes</u>
3 GHz - 30 GHz	10 cm - 1 cm	Centimétriques	SHF / SHF	<u>Directes</u>
30 GHz - 300 GHz	1 cm - 1 mm	Millimétriques	EHF / EHF	<u>Directes</u>
au dessus de 300 GHz	< 1 mm	<i>non géré par l'UIT</i>	<i>voir ci-dessous</i>	

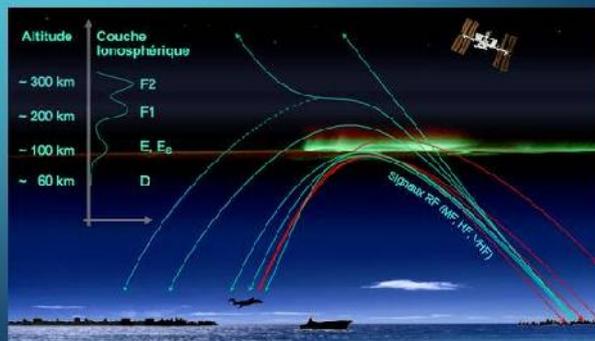
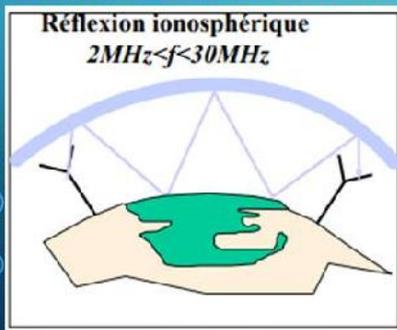


MR\_GHA71\_A717\_SLP/MANAGEMENT

## LA PROPAGATION EN ONDES RÉFLÉCHIES

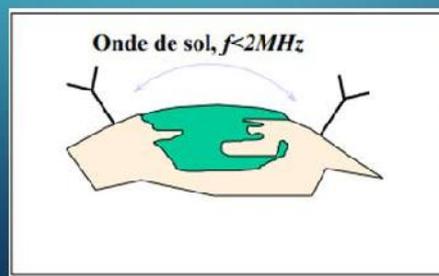
❖ L'ionosphère est la zone de l'atmosphère terrestre dans laquelle l'existence d'ions et d'électrons libres est suffisamment abondante pour influencer sur les caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques. L'ionosphère s'étend entre 50 et 2 000 km d'altitude. Elle se divise en 3 régions : D (50 à 90 km), E (90 à 130 km) et F (130 à 2 000 km).

❖ Les ondes rebondissent sur les hautes couches de l'atmosphère, fortement ionisées (ionosphère, couches E et F), redescendent sur la terre, d'où elles sont une nouvelle fois renvoyées dans l'espace. Un bond ne peut dépasser 4 000 km du fait de la courbure de la terre et de l'altitude de réflexion.



## LES ONDES DE SOL

- appelées aussi **ondes de surface**, se propagent en restant très près de la surface de la Terre. Elles y subissent très vite une forte absorption et ce, d'autant plus que leur fréquence est élevée. Bien entendu, le profil du relief entre l'antenne d'émission et celle de réception est déterminant.
- Dans les bandes LF et VLF (300 kHz et en dessous), les ondes se propagent à l'intérieur d'un guide d'ondes dont l'une des parois est la surface terrestre et l'autre paroi est la couche D de l'ionosphère
- Les espérances de distances de propagation en fonction de la fréquence sont les suivantes : 300 kHz : 2.000 km - 4 MHz : 100 km - 10 MHz : 50 km. . Mais la conductivité du sol a aussi une grande importance. Ainsi, pour un trajet maritime pour lequel la conductivité de la mer est très élevée, il est possible, à 2 MHz, d'obtenir une portée supérieure à 500 kilomètres. On voit le peu d'efficacité de l'onde de sol sur les fréquences décimétriques et au delà



45

## ONDE DIRECTE

les antennes sont en vue l'une de l'autre. Toutefois, pour les fréquences les plus basses (ondes métriques et décimétriques), il se produit un phénomène de dispersion qui permet à l'onde de suivre le relief terrestre, comme le font les ondes de sol, mais à un moindre degré : l'obstacle que forme une montagne par exemple rendra un contact hasardeux.



46

## RÉCAPITULATIF

1. Quelle est la formule de calcul de l'impédance intrinsèque de propagation dans un milieu ? quelle est sa valeur dans le cas du vide ?
2. Ecrire les équations de Maxwell qui régissent les ondes électromagnétiques dans un milieu de propagation donnée ?
3. Ecrire ces équations dans le système sinusoïdale ?
4. Ecrire les équations de propagation des champs E et H ?
5. Donnez la formule de calcul du vecteur Poynting ?
6. Donnez la formule de calcul de la densité d'énergie électromagnétique dans le vide ?
7. Listez les différents modes de propagation des OEM ?
8. Quelles sont les bandes de fréquences utilisées dans chaque mode ?

47

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## ANTENNES ET PROPAGATION

a) Différents types d'antennes (filaires, à ouvertures,...)



Caractéristiques des antennes :

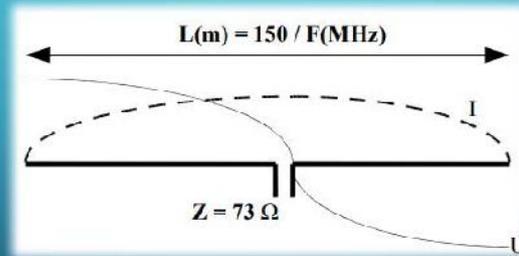
1. Diagramme de rayonnement
2. Directivité / gain
3. Polarisation du champs EM
4. ROS / impédance d'entrée

48

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## L'ANTENNE DOUBLET DEMI-ONDE (DIPÔLE)

Longueur théorique du doublet demi-onde :  $L(m) = \lambda(m)/2 = 300/2 \times F(\text{MHz}) = 150 / F(\text{MHz})$

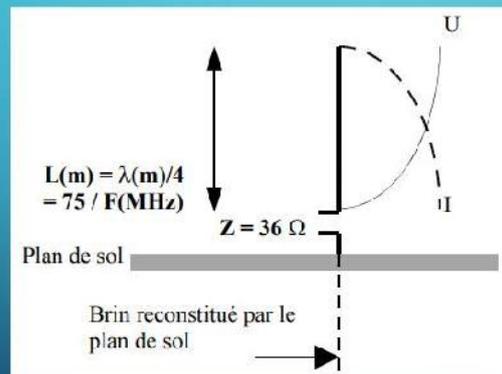


49

MR GHAZI AZIZ - SUPMANAGEMENT

## L'ANTENNE QUART D'ONDE VERTICALE

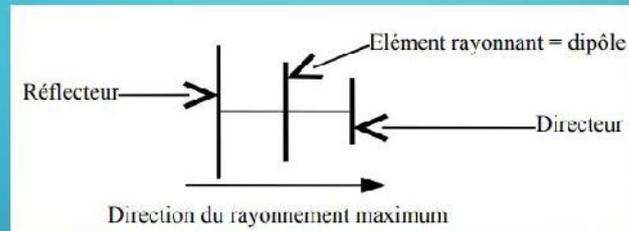
La longueur théorique du brin quart d'onde est ainsi calculée :  $L(m) = \lambda(m)/4 = 300 / 4 \times F(\text{MHz}) = 75 / F(\text{MHz})$



50

MR GHAZI AZIZ - SUPMANAGEMENT

## ANTENNE YAGI OU BEAM



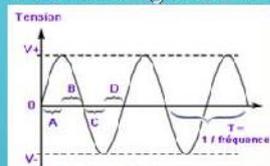
Lorsqu'on augmente le nombre d'éléments sur ce type d'antenne, son impédance diminue et son gain (son effet directif) augmente. Le gain obtenu par ce système dépend à la fois du nombre d'éléments et de la longueur du support de ces éléments (boom).

51

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

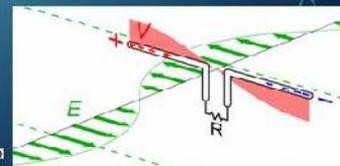
## LE FONCTIONNEMENT D'UNE ANTENNE

Tout conducteur peut servir d'antenne, c'est à dire tout objet au travers duquel un courant électrique peut circuler. Considérons un émetteur raccordé à un morceau de fil placé verticalement par rapport au sol. L'émetteur génère un signal haute fréquence.



- Pendant la zone A, le morceau de fil est parcouru par un courant qui le charge positivement. Cette charge de l'antenne crée dans son entourage un champ électrique. Autour de l'antenne
- Pendant la zone B, la tension alternative décroît du maximum positif jusqu'à zéro. L'antenne va se décharger, le champ électrique qui l'entoure va décroître également et l'énergie qu'il contient retourne à l'antenne.
- Pendant la zone C, le morceau de fil est parcouru par un courant négatif, l'antenne se charge négativement et le fil crée alors dans son entourage un champ électrique.
- Pendant la zone D, la tension remonte jusqu'à atteindre D, l'antenne va se décharger.

Le champ électrique qui l'entoure va décroître également, l'énergie qu'il contient sera restitué à l'antenne. Tout ce processus se répète au rythme de la fréquence de la tension délivrée par l'émetteur.



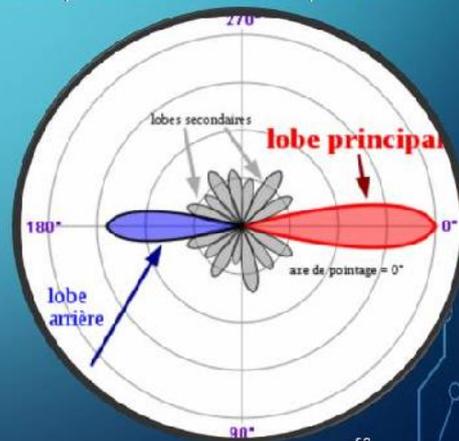
MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

# CARACTÉRISTIQUES D'UNE ANTENNE

## 1- Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Le diagramme de rayonnement est obtenu par la mesure du champ électrique.

Le diagramme illustre la répartition spatiale de l'énergie électromagnétique d'une antenne directionnelle. Il montre le lobe principal, qui correspond à la direction privilégiée de rayonnement, c'est à dire la partie de la plus grande émission s'étendant jusqu'à plusieurs centaines de mètre. Les lobes secondaires sont généralement des lobes parasites. Dans ces directions, l'énergie rayonnée est perdue, et également nocive.



# CARACTÉRISTIQUES D'UNE ANTENNE

## 2- L'angle d'ouverture

L'angle d'ouverture caractérise la largeur du lobe principal. Il représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée.



# CARACTERISTIQUES D'UNE ANTENNE

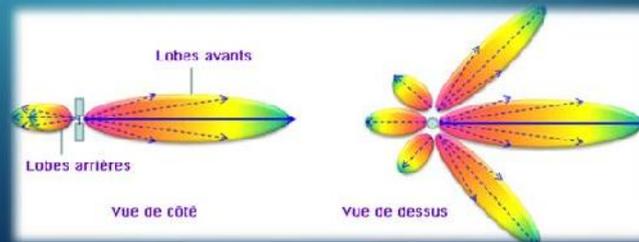
## 3 - La directivité d'une antenne

La directivité d'une antenne est la direction dans laquelle elle émet et reçoit. Le diagramme de rayonnement permet de visualiser ces lobes dans les trois dimensions, dans le plan horizontal ou dans le plan vertical incluant le lobe le plus important. La proximité et la conductibilité du sol ou des masses conductrices environnant l'antenne peuvent avoir une influence importante sur la forme du diagramme de rayonnement. La directivité de l'antenne dans le plan horizontal est une caractéristique importante dans le choix d'une antenne. Une antenne **équidirective** ou **omnidirectionnelle** rayonne de la même façon dans toutes les directions du plan horizontal.

Une antenne **directive** possède un ou deux lobes nettement plus importants que les autres que l'on nomme les **lobes principaux**.

Aucune antenne ne peut rayonner toute l'énergie dans une direction voulue. Une partie est inévitablement rayonnée dans d'autres directions. Ces plus petites crêtes sont désignées sous le nom de **lobes latéraux**, généralement présentées en dB (décibel) en dessous du lobe principal.

06/12/2020



55

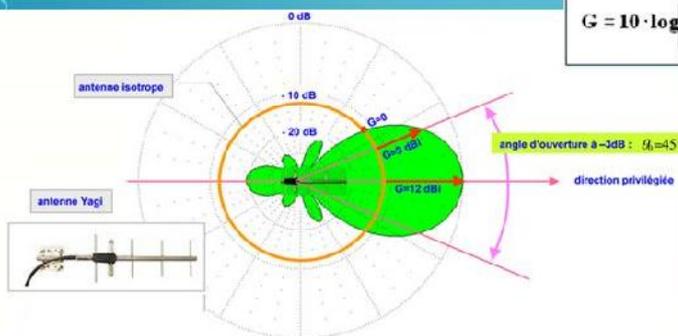
# CARACTÉRISTIQUES D'UNE ANTENNE

## 4 - Le gain d'une antenne

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  $P_0$  émise dans une direction privilégiée :

- une antenne directive a un gain  $G$  positif par rapport à une antenne isotrope dans la direction privilégiée
- Comme le gain est d'autant plus grand que l'énergie est rayonnée en un faisceau étroit, il est possible d'estimer grossièrement le gain d'une antenne en mesurant les deux angles d'ouverture à  $-3\text{dB}$  ( $\theta_E$  verticalement et  $\theta_A$  horizontalement).
- La formule suivante permet cette estimation pour des angles inférieurs à 90 degrés et pour des antennes dont le lobe principal se distingue nettement des lobes secondaires.

$$G = 10 \cdot \log \left( \frac{41000}{\theta_A \cdot \theta_E} \right)$$



$G$  : gain en dB de l'antenne

$\theta_E$  : angle d'ouverture en élévation (verticalement)

$\theta_A$  : angle d'ouverture en azimut (horizontalement)

## CARACTÉRISTIQUES D'UNE ANTENNE

### 5 - La polarisation d'une antenne

La polarisation définit le sens dans lequel l'antenne émet les ondes. Les ondes sont émises parallèlement au sol lorsqu'il s'agit de la polarisation verticale, et perpendiculairement (90°) au sol lorsqu'il s'agit de la polarisation horizontale. Dans le cas des antennes de voiture, la polarisation est toujours verticale.

Tout rayonnement électromagnétique est polarisée. La polarisation d'une antenne décrit l'orientation de son champ électrique. La polarisation peut être linéaire ou circulaire. La polarisation linéaire est généralement verticale ou horizontale.



MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

57

## CARACTÉRISTIQUES D'UNE ANTENNE

### 6 - L'impédance :

- Pour acheminer vers l'antenne l'énergie à haute fréquence fournie par l'émetteur ou en sens inverse amener le signal capté par l'antenne jusqu'à l'entrée du récepteur, on utilise une ligne bifilaire ou un câble coaxial.
- Afin d'optimiser la réception (ou l'émission), il faut que la liaison antenne/module de réception (ou d'émission) soit réalisée par une ligne d'alimentation dont l'impédance caractéristique est égale à celle de l'antenne (et donc du module de réception ou d'émission).
- L'ordre de grandeur de cette impédance est de quelques dizaines voire centaines d'ohms :
  - 50  $\Omega$  (Ohms) ou 75  $\Omega$  pour une ligne coaxiale
  - 300  $\Omega$  pour une ligne bifilaire

58

MR GHAZI AZIZ SUPMANAGEMENT

## RÉCAPITULATIF

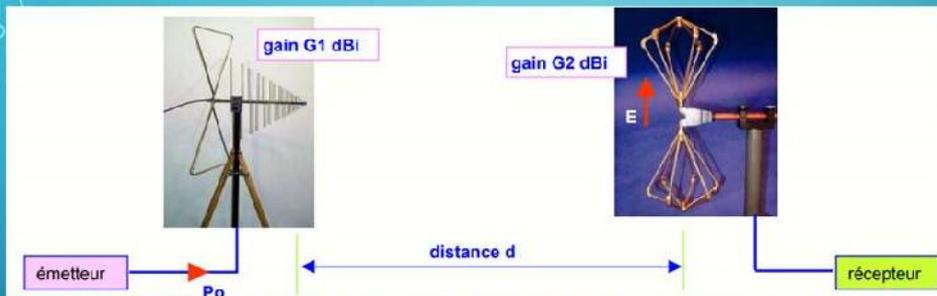
1. Donnez quelques exemples d'antennes de transmission?
2. Quelles sont les principales caractéristiques d'une antenne ?
3. Donnez brièvement la méthode de fonctionnement d'une antenne ?
4. Que représente le diagramme de rayonnement d'une antenne ?
5. Que représente l'angle d'ouverture d'une antenne ?
6. Que représente la directivité d'une antenne ?
7. Que représente le gain d'une antenne ?
8. Que représente la polarisation d'une antenne ?
9. Que représente l'impédance d'une antenne ?

59

MR CHA71 A717 - SUPMANAGEMENT

## CHAMP CRÉÉ PAR UNE ANTENNE ISOTROPE

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 :

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

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

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

MR CHA71 A717 - SUPMANAGEMENT

## EXEMPLE

- 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  $P$  :  $P = P_0/S = P_0/4\pi d^2$  en  $W/m^2$
- on montre que le champ électrique  $E$  au niveau du récepteur s'écrit :  $E = 120\pi P$  en  $V/m$
- et le champ magnétique  $B$  :  $B = E/c$  en Tesla

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

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

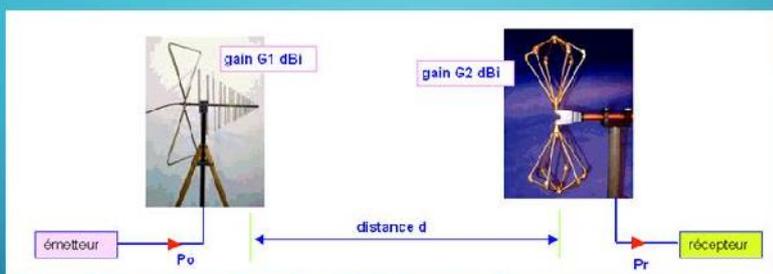


$$E = 120\pi P$$

$$B = \frac{E}{c}$$

## 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** :

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

$P_0$  et  $P_r$  en Watts  
 $d$  et  $\lambda$  en mètres  
 $G_1$  et  $G_2$  sans unité (amplification en puissance)

# BILAN DE PUISSANCE D'UNE LIAISON HF

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

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

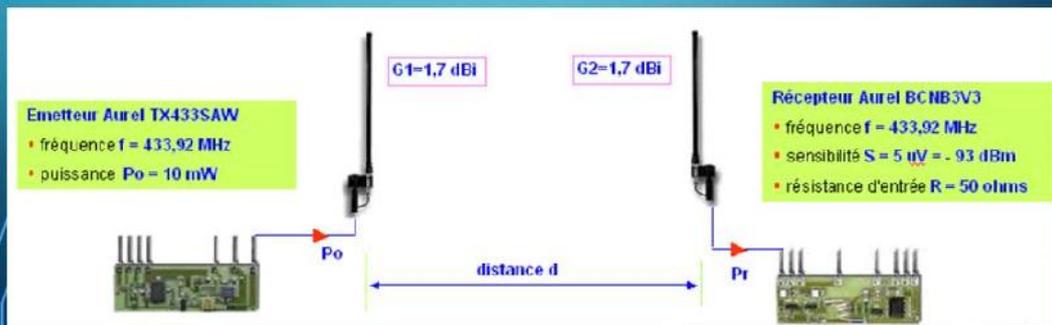
$P_0$  et  $P_r$  en dBm  
 $d$  en mètres  
 $f$  en Hz  
 $G_1$  et  $G_2$  en dBi

$$P(\text{dBm}) = 10\log\left(\frac{P(\text{mW})}{1\text{mW}}\right)$$

Exemple d'une liaison par modules Aurel :

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

$$G(\text{dBi}) = 10\log(G)$$



# BILAN DE PUISSANCE D'UNE LIAISON HF

Réponse : le niveau à l'entrée du récepteur vaut :

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

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

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

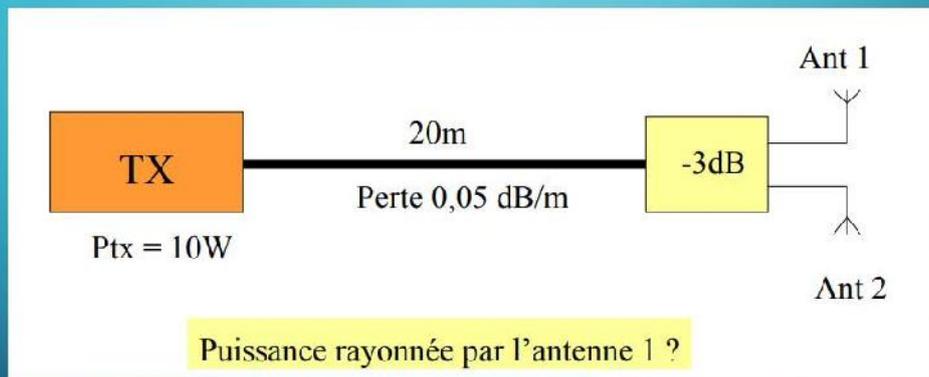
## PUISSANCE ISOTROPE RAYONNÉE ÉQUIVALENTE PIRE

La P.I.R.E, Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente, est une caractéristique importante d'un émetteur. Elle correspond à la puissance émise par l'émetteur, augmentée du gain d'antenne.

**PIRE (W) =  $P_E(W) \cdot G_E$**  (Attention  $G_E$  ici n'est pas en dBi ) On l'exprime souvent en dBw ou dBm :

$$\text{PIRE (dBm ou dBw)} = P_E (\text{dBm ou dBw}) + G_E \text{ dBi}$$

## EXEMPLE

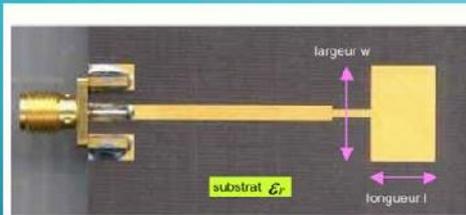


## SOLUTION

$P_{tx} = 40 \text{ dBm}$  Pertes dans le câble = 1dB donc  
 $P_{ant1} = P_{ant2} = 40 - 1 - 3 = 36 \text{ dBm}$   
 $P_{ant1} = P_{ant2} \approx 4W$

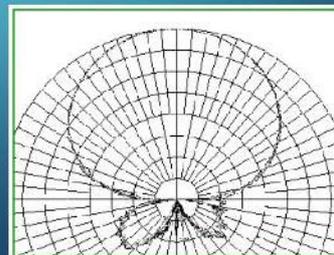
## LES ANTENNES PATCH

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  $w = 0,5.l$  à  $2.l$
- la largeur  $w$  joue sur l'impédance de la structure à la résonance

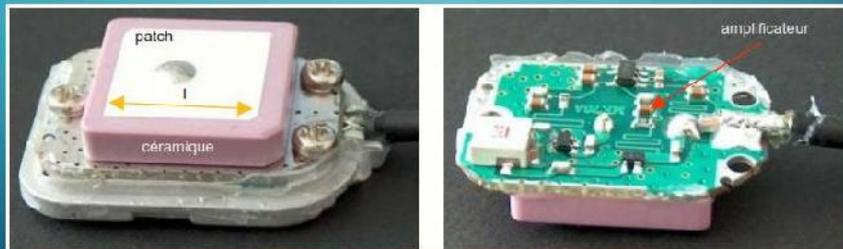
- le rayonnement est perpendiculaire à la surface du patch
- le diagramme de rayonnement est presque circulaire
- l'angle d'ouverture est compris entre 50 et 80 °



# LES ANTENNES PATCH

## Antenne GPS :

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



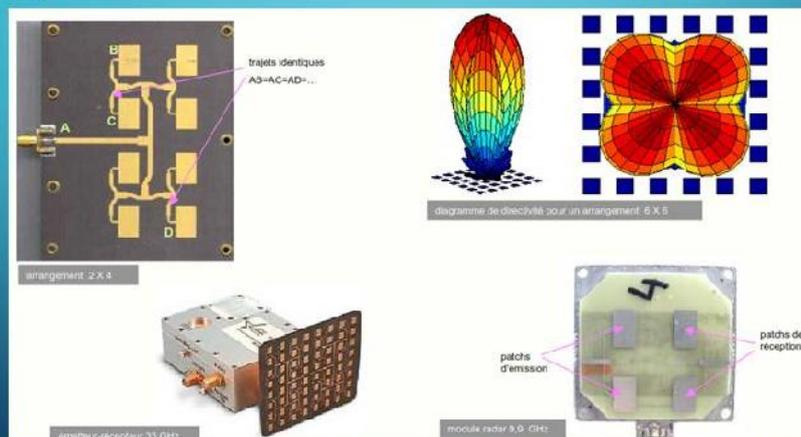
MR GHAZI AZIZ - SUPMANAGEMENT

69

# LES ASSEMBLAGES DE PATCHS

L'assemblage de patchs 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 patchs
- tous les patchs doivent être alimentés en phase, ce qui impose une **longueur de trajet identique** pour le signal



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

MR GHAZI AZIZ - SUPMANAGEMENT

70

## RÉCAPITULATIF

1. Quelle est la formule de calcul du champ électrique E au niveau de la surface réceptrice S d'une antenne à partir d'une antenne émettrice isotrope loin d'une distance D et ayant un gain G1, calculer ce champ pour D=5km, G1=8dB, P0=10W et S=1m<sup>2</sup> ?
2. Donnez la formule de Friis pour calculer la puissance reçue Pr à l'entrée d'une antenne récepteur ? Donnez la même formule si on exprime la puissance en dBm et les gains en dB ?
3. Donnez la formule de calcul de la puissance en dBm et en dBi ?
4. Donnez la formule de La P.I.R.E, Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente en dBm ou dBw ?
5. Quelles sont les caractéristiques d'une antenne Patch ?
6. Que permet l'assemblage d'un grand nombre de patchs ?

## ANNEXES DÉFINITIONS :

### En puissance

Le dB est 10 fois le logarithme base 10 du rapport de puissance P1/ P2.

$$\text{dB} = 10 \text{ Log } \frac{P1}{P2}$$

### En tension ou courant

Le dB est 20 fois le logarithme base 10 du rapport des tensions V1/V2 ou des courants

$$\text{dB} = 20 \text{ Log } \frac{V1}{V2}$$

#### Exemple 1

quel est l'atténuation de puissance exprimée en dB d'un atténuateur auquel on applique une puissance de 100 W et qui restitue 15W

$$A = 10 \text{ Log } 15/100 = 8,2 \text{ dB}$$

?

#### Exemple 2 :

quel est l'amplification de tension exprimée en dB d'un transistor monté en amplificateur sur lequel on mesure 3 V de tension de sortie pour 10 mV de tension d'entrée ?

$$A = 20 \text{ Log } 3/0.01 = 49,5 \text{ dB}$$

?

Le **dBi** exprime en dB le gain d'une antenne par rapport à un aérien isotrope qui émet la même quantité d'énergie dans toutes les directions. Cet aérien n'existe pas.

$$G(\text{dBi}) = 10 \log(G)$$

le **dBd** exprime en dB le gain d'une antenne par rapport à un aérien dipôle demi-onde. Cet aérien est une réalité physique.

$$G(\text{dBd}) = G(\text{dBi}) - 2.15$$

**dBm** Le décibel par rapport au milliwatt. il exprime une puissance par rapport à une référence. Cette référence est 1 milliwatt

#### EXERCICE

Réalisez les conversions suivantes :

$$P = 20 \text{ dBm} \quad 0.1 \text{ W}$$

$$V = 20 \text{ mV} \quad 86 \text{ dB}\mu\text{V}$$

$$G = 7 \text{ dB} \quad 7 \text{ dBi et } 4.85 \text{ dBd}$$

$$L_p = 2 \text{ dB} \quad 0.5 \text{ (perte de propagation exprimée en rapport de puissance sortante sur puissance entrante) } 2.$$

## GAIN D'UNE ANTENNE :

Une antenne isotrope n'a pas de gain, donc = 0 dB.

(C'est une antenne imaginaire qui rayonne uniformément dans toutes les directions).

Une antenne dipôle possède un gain de 2,15 dB par rapport à l'antenne isotrope. On dit aussi qu'elle a un gain de 2,15 dBi.

Le gain d'une antenne est exprimé plus généralement en dBd, c'est à dire par rapport au dipôle demi-onde.

En résumé:

$$\text{gain en dBd} = \text{gain en dBi} - 2,15 \text{ dB}$$

$$\text{gain en dBi} = \text{gain en dBd} + 2,15 \text{ dB}$$

## PUISSANCES :

La puissance HF d'un émetteur s'exprime généralement en Watts (W) ou en **dBm**.

**PAR** : Puissance Apparente Rayonnée. Puissance rayonnée par l'antenne en tenant compte de son gain en dBd.  
(= ERP Effective Radiated Power)

**PIRE** : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente. Puissance rayonnée par l'antenne en tenant compte de son gain en dBi.  
(= EIRP Equivalent Isotropic Radiated Power)

$$PAR_{dBd} = PIRE_{dBi} - 2,15$$

$$\text{ou plus simplement : } PIRE = PAR \times 1,64$$

**Exemple** théorique d'une antenne d'un gain de 3 dBd connectée à un émetteur de 12 W :  
(On considère qu'il n'y a pas de perte dans les câbles et connecteurs et que l'antenne est parfaite).

Avec une antenne de 3 dBd, on multiplie la puissance par environ 2 donc :

$$\text{Puissance sortie émetteur} = 12 \text{ W}$$

$$PAR = 12 \times 2 = 24 \text{ W}$$

$$PIRE = 12 \times 3,27 = 39,2 \text{ W environ } \{3,27 \text{ étant le facteur de multiplication correspondant à un gain de } 3 \text{ dBd} + 2,15 = \text{invLog}(\text{dBm } 5,15 / 10)\}$$

## EXPOSÉS

1. Chaîne de transmission radio
2. Boucle locale hertzienne
3. Boucle locale radio **Fanta**
4. Boucle locale WIMAX **Ibrahim B**
5. Boucle locale par Satellite
6. Simulation de chaîne de transmission radio sous MATLAB  
**Fernandez**
7. Types de liaisons radioélectriques
8. Spectre radioélectrique
9. Etude d'un analyseur de spectre **CALI**
10. La technique de transmission micro-ondes
11. Ondes de radiodiffusion

## **EXPOSE**

1- LES ONDES UTILISEES EN TRANSMISSION  
PAR SATELLITE

**RAISSA**

2- LES ONDES UTILISEES EN RADIO MOBILE

**AICHA**

3- LES TRANSMISSIONS MARITIMES **AYA**

4- LES ANTENNES **MOHAMED**