
Antennes et propagation radio

Préparé par
Mme Jamila BEN SLIMANE

SMART'Com

Année universitaire 2017-2018

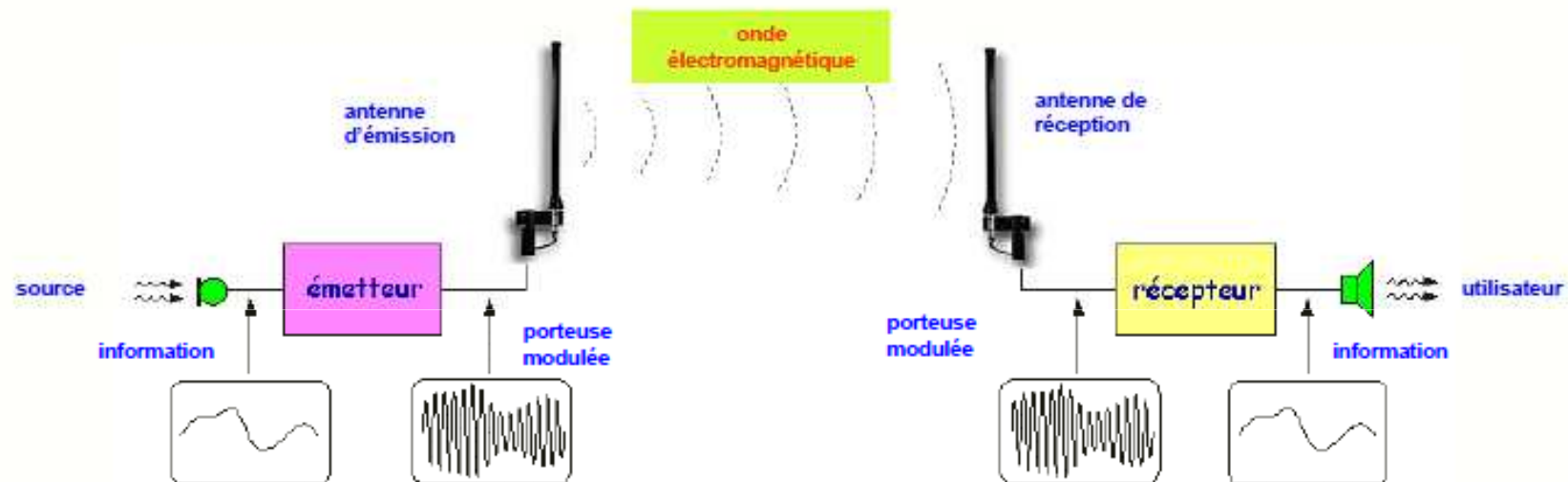
Plan

- **Introduction Générale**
- **Chapitre I: Paramètres d'antenne**
 - ❑ **Section I : Équations de Maxwell pour le rayonnement**
 - ❑ **Section II : Polarisation des ondes,**
 - ❑ **Section III : Diagramme de rayonnement, directivité et gain, impédance d'antenne,**
- **Chapitre II: Antennes en régime d'émission**
 - ❑ **Section I : Principes d'équivalence (relations sources/champs)**
 - ❑ **Section II : Champ rayonné à grande distance (caractéristique vectorielle de rayonnement, puissance rayonnée, impédance d'entrée ...)**
 - ❑ **Section III : Exemples d'applications: antennes filaires, antennes imprimées, ouvertures rayonnantes**

Plan

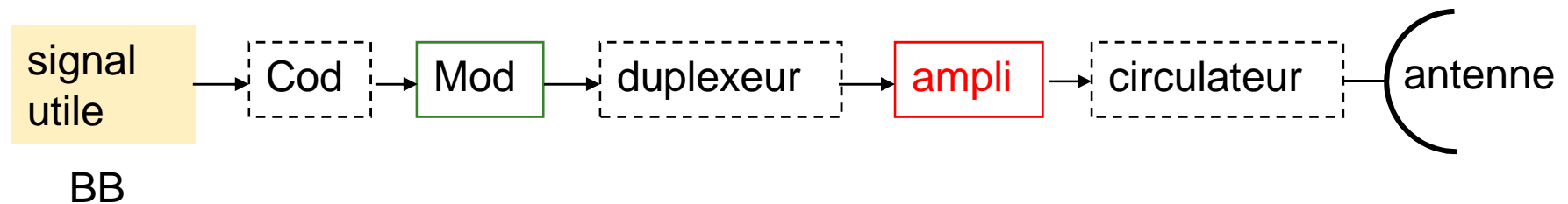
- **Chapitre III: Antennes en régime de réception et canaux de propagation**
 - ❑ **Section I : Réponse à une onde plane**
 - ❑ **Section II : Discussion de la puissance reçue : aire d'absorption**
 - ❑ **Section III : Equation des liaisons en espace libre (trajets multiples, température équivalente de bruit).**
 - ❑ **Section IV : Les canaux de propagation (Okumura, Okumura-Hata)**
- **Chapitre IV: Traitement d'antenne**
 - ❑ **Section I : Réseaux d'antennes**
 - ❑ **Section II : Antennes intelligentes.**

Introduction Générale

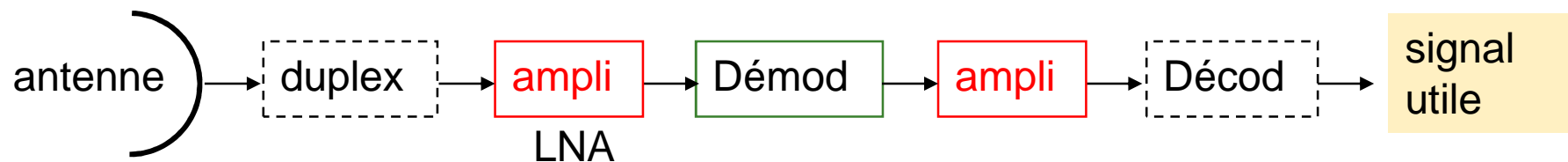


Introduction Générale

Partie émission :

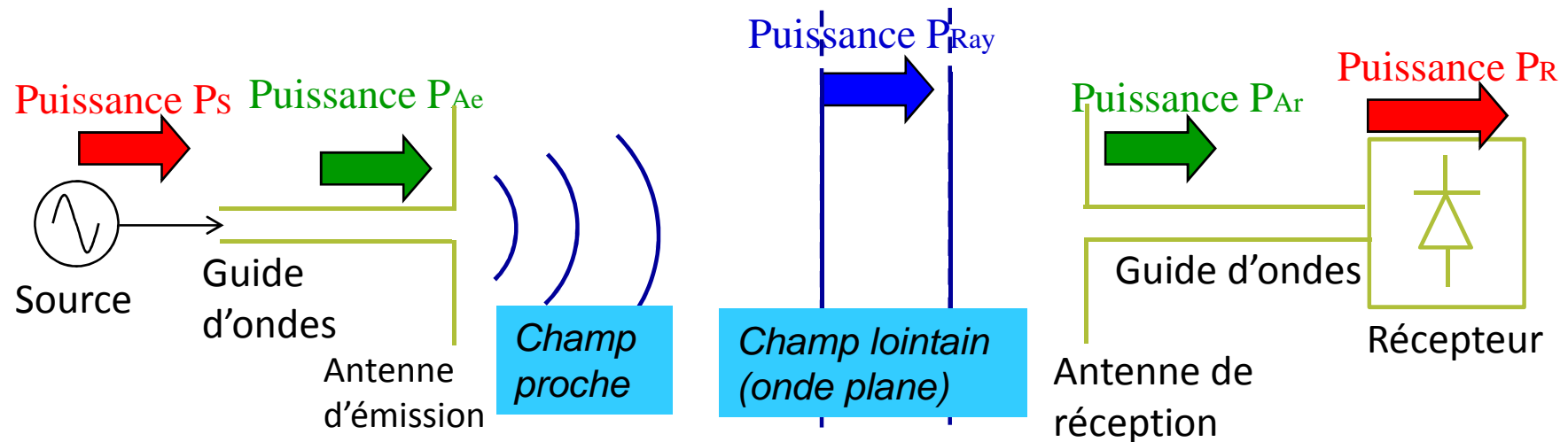


Partie réception :



Introduction Générale

Espace libre – propagation d'une onde électromagnétique



- ✓ P_s : puissance électrique disponible au niveau de la source
- ✓ P_{Ae} : puissance électrique fournie à l'antenne d'émission
- ✓ P_{Ray} : puissance rayonnée (transportée par l'onde EM)
- ✓ P_{Ar} : puissance électrique induite par l'antenne de réception
- ✓ P_R : puissance électrique reçue par le récepteur

Introduction Générale

En radioélectricité, une antenne est un dispositif permettant de rayonner (**émetteur**) ou de capter (**récepteur**) les **ondes électromagnétiques**.

L'**antenne** est un **conducteur électrique** plus ou moins complexe généralement placé dans un endroit dégagé.

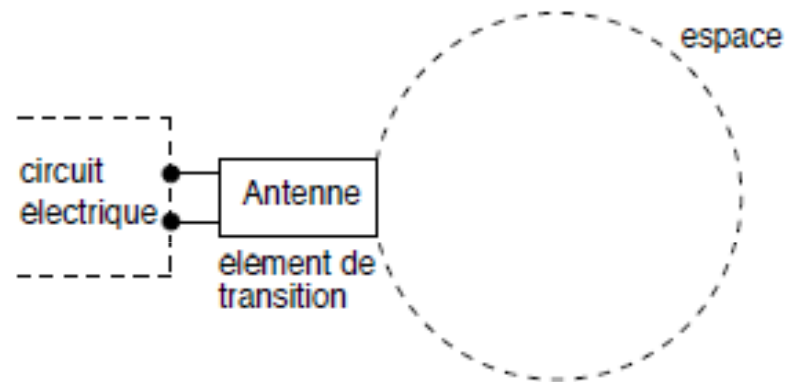


FIGURE 1.1 – Représentation schématiques de l'antenne.

Introduction Générale

En radioélectricité, une antenne est un dispositif permettant de rayonner (**émetteur**) ou de capter (**récepteur**) les **ondes électromagnétiques**.

L'**antenne** est un **conducteur électrique** plus ou moins complexe généralement placé dans un endroit dégagé.

Il existe des dizaines de types d'antennes, différents par leur fonctionnement, leur géométrie, leur technologie.

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique (ou inversement).

Une définition traditionnelle est la suivante :

« Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur »

Introduction Générale

Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif.

Une liaison radioélectrique est un canal de transmission entre un émetteur et un récepteur, dont le support de transmission est assuré par des ondes électromagnétiques. Comme tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes posés par le bruit et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission. Ils sont aussi dépendants des propriétés de l'antenne qui va donner naissance à l'onde électromagnétique, et à l'environnement autour de l'antenne qui va influencer sur la propagation des ondes électromagnétiques.

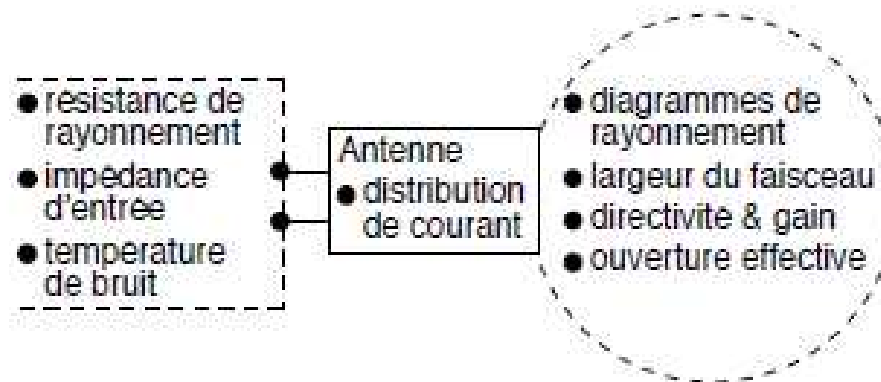


Figure 1.2. Paramètres schématisques de l'antenne.

Introduction Générale

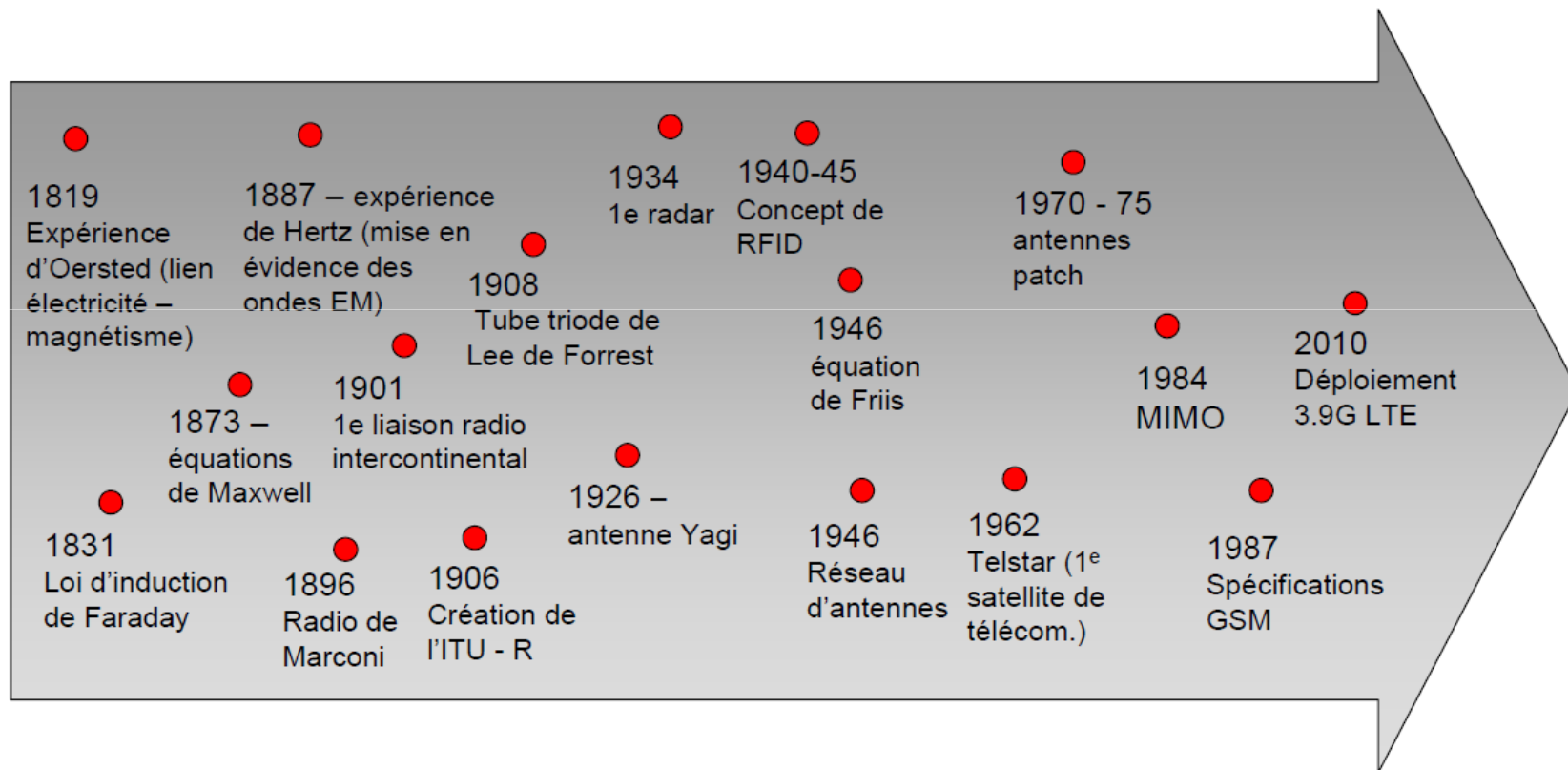
Le transport d'énergie par une onde électromagnétique va donc permettre le transfert d'information sans support physique à travers un canal ou une liaison radioélectrique, à condition que l'onde électromagnétique soit modulée par un signal informatif.

Une liaison radioélectrique est un canal de transmission entre un émetteur et un récepteur, dont le support de transmission est assuré par des ondes électromagnétiques. Comme tous les canaux de communication, il est soumis aux problèmes posés par le bruit et les perturbations, qui vont limiter les performances du système de transmission. Ils sont aussi dépendants des propriétés de l'antenne qui va donner naissance à l'onde électromagnétique, et à l'environnement autour de l'antenne qui va influencer sur la propagation des ondes électromagnétiques.

La connaissance et la modélisation de la propagation et des antennes sont complexes ... mais nécessaires pour dimensionner un système de transmission sans fils.

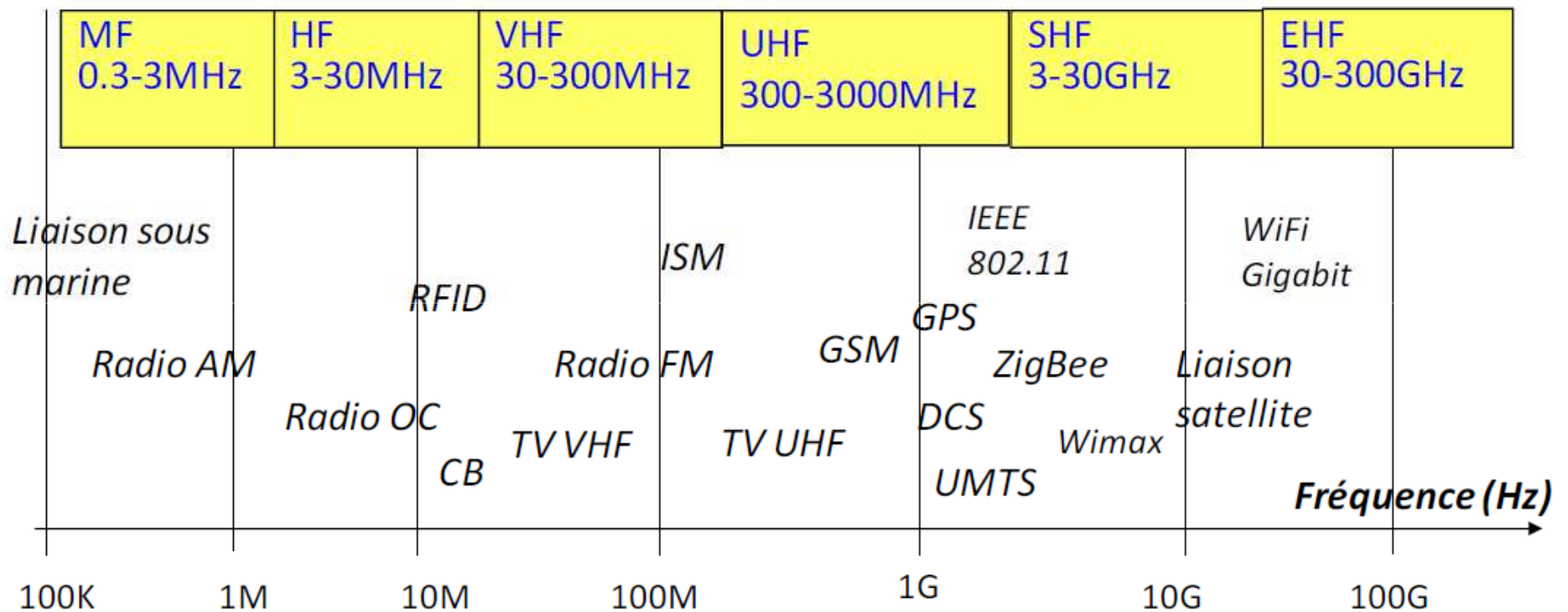
Introduction Générale

Historique et Applications



Introduction Générale

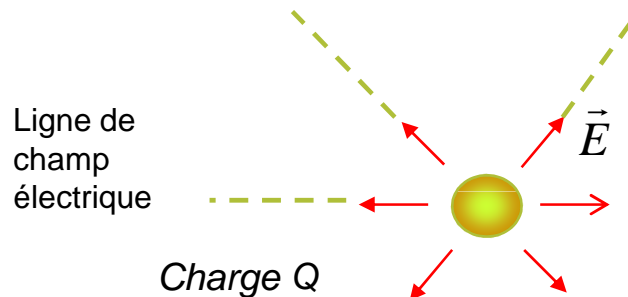
Historique et Applications



Introduction Générale

Notions fondamentales

- Les charges électriques au repos peuvent exercer des forces électriques entre elles, cette action à distance se fait par l'intermédiaire d'un champ électrique. Toute charge électrique Q immobile crée un champ électrique E (V/m) dans l'espace environnant, qui décroît inversement avec le carré de la distance.



$$\vec{E}(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^3} \vec{r}$$

Loi de Gauss
$$\vec{E}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_V \rho dV \vec{r} \Leftrightarrow \text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Potentiel électrostatique
$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$$

Avec

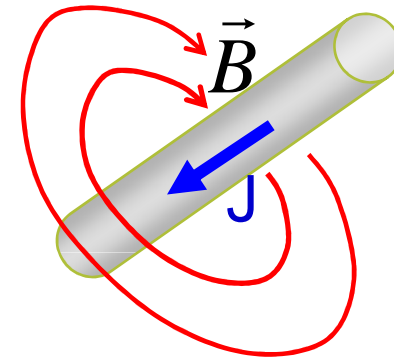
- ✓ Q : charge et r : distance d'observation
- ✓ ρ : densité volumique de charge
- ✓ ϵ : permittivité électrique (F/m). A noter ϵ_0 : permittivité diélectrique dans le vide ($= 8.85 \times 10^{-12}$) et ϵ_r : permittivité électrique relative telle que $\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r$

Introduction Générale

Notions fondamentales

Toute circulation de courant électrique continu (c'est-à-dire des charges en mouvement) est à l'origine de la création d'un champ magnétique tournant autour de la ligne. Cette ligne exercera une force à distance sur toute autre interconnexion parcourue par un courant.

$$\int_C \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \vec{J} d\vec{S} \Leftrightarrow \overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad \text{Loi d'Ampère}$$



La relation entre le champ magnétique H (A/m) et l'induction magnétique B (T).

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

Avec

- ✓ J = courant de conduction.
- ✓ μ : perméabilité magnétique (H/m). A noter μ_0 : perméabilité magnétique dans le vide ($= 4\pi \cdot 10^{-7}$) et μ_r : perméabilité magnétique relative telle que $\mu = \mu_0 \times \mu_r$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{dv} \frac{\vec{J} \wedge \vec{r}}{r^3} dv$$

Les charges et les courants électriques sont les sources élémentaires des champs électromagnétiques (champs électriques et magnétiques).

Introduction Générale

Notions fondamentales: capacité et inductance

- Soit deux conducteurs séparés par une différence de potentiel notée V . Chacun des conducteurs porte une charge Q et de signe opposée.
- La séparation des charges et le champ électrique associé correspond à un stockage d'énergie électrique.
- La capacité mesure la « quantité » d'énergie stockée par ces conducteurs. On la définit par :

$$C(F) = \frac{Q(C)}{V(V)}$$

- Soit un circuit parcouru par un courant I qui génère un champ magnétique autour de lui. On note Φ le flux du champ magnétique se couplant à travers la surface présente entre les conducteurs du circuit.
- Le mouvement des charges associé au courant électrique et le champ magnétique associé correspond à un stockage d'énergie magnétique
- L'inductance mesure la « quantité » d'énergie magnétique. On la définit par :

$$L(H) = \frac{\Phi(Wb)}{I(A)}$$

Paramètres d'antennes

Équations de Maxwell

La connaissance des paramètres des antennes demeure essentielle pour bien comprendre les qualités d'une antenne. Certaines antennes ont des caractéristiques qui les rendent intéressantes pour certaines applications mais absolument inappropriées pour d'autres. Il faudra commencer par une présentation des paramètres importants.

Ces paramètres doivent pouvoir se calculer théoriquement d'après la géométrie de l'antenne. Puisque l'antenne convertit l'énergie électromagnétique, une étude basée sur le rayonnement électromagnétique à partir des équations de Maxwell sera entreprise.

La répartition des champs électriques et magnétiques dans l'espace produite par une distribution donnée de charges et de courants peut être déterminée en résolvant les équations de Maxwell. En outre, celles-ci permettent de déterminer comment l'onde électromagnétique se propage dans l'espace. Pour un milieu homogène et isotrope (cas général de la propagation en espace libre ou guidée), celles-ci sont données par les équations suivantes.

Paramètres d'antennes

Équations de Maxwell

1. **Equation de Maxwell-Gauss:** La divergence du champ électrique est proportionnelle à la distribution de charges électriques

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{ou} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{vide})$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{ou} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Avec:

ρ : densité volumique de charge électrique

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$: la permittivité diélectrique

ϵ_0 : la permittivité diélectrique du vide

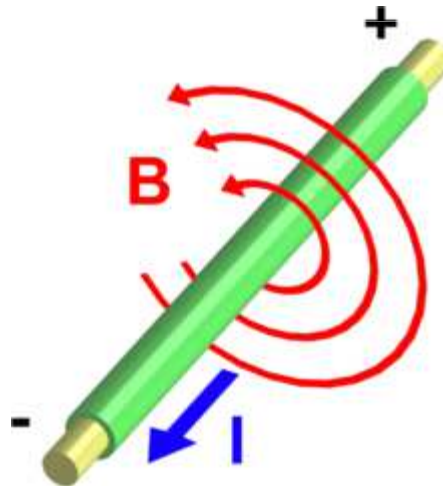
ϵ_r : la permittivité diélectrique relative

Paramètres d'antennes

Équations de Maxwell

2. **Equation de Maxwell-Thomson:** La divergence du champ magnétique est nulle

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \text{ou} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$



Paramètres d'antennes

Équations de Maxwell

3. Equation de Maxwell-Faraday: Le rotationnel du champ électrique est (inversement) proportionnel à la variation du champ magnétique au cours du temps

$$\overrightarrow{rot \vec{E}} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad ou \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

Avec

$\mu = \mu_0 \mu_r$: la perméabilité magnétique

μ_0 : la perméabilité magnétique du vide

μ_r : la perméabilité magnétique relative



Paramètres d'antennes

Équations de Maxwell

4. Equation de Maxwell- Ampère: Le rotationnel du champ magnétique est la somme de sa dépendance à la variation du champ électrique au cours du temps et d'un courant électrique fixe

$$\overrightarrow{rot H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad ou \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Avec

σ : La conductivité électrique du milieu (S/m)



Paramètres d'antennes

Équations de Maxwell

Que se passe t-il lorsqu'un courant de conduction variable traverse un fil ?

D'après l'équation de Maxwell-Ampère, un champ magnétique variable est produit au voisinage de ce fil.

Localement autour de ce point, il y a une variation du flux du champ magnétique qui, d'après l'équation de Maxwell-Faraday, va donner naissance à un champ électrique variable.

Localement, cette variation de champ électrique donne naissance à un champ magnétique et ce processus continue de proche en proche. Les champs électriques et magnétiques se propagent conjointement à l'image d'une vague.

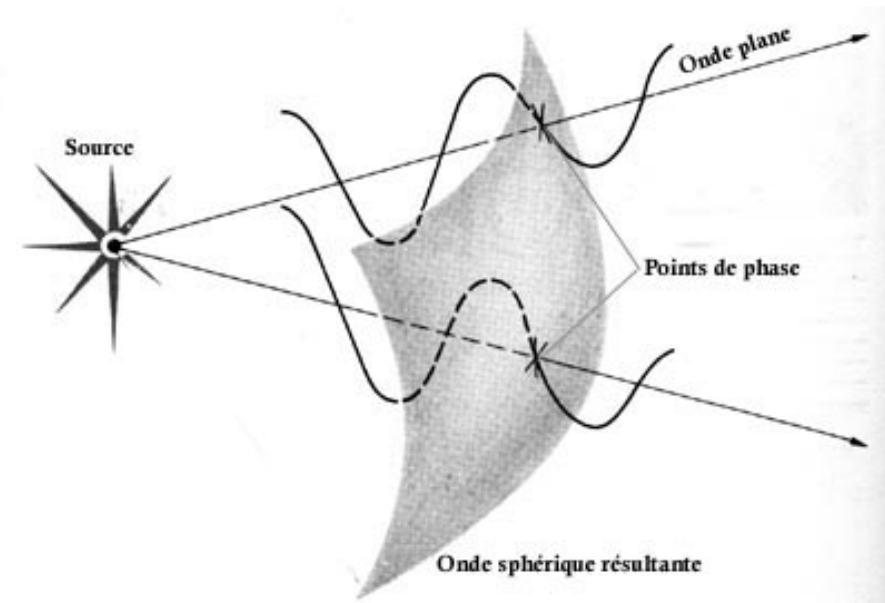
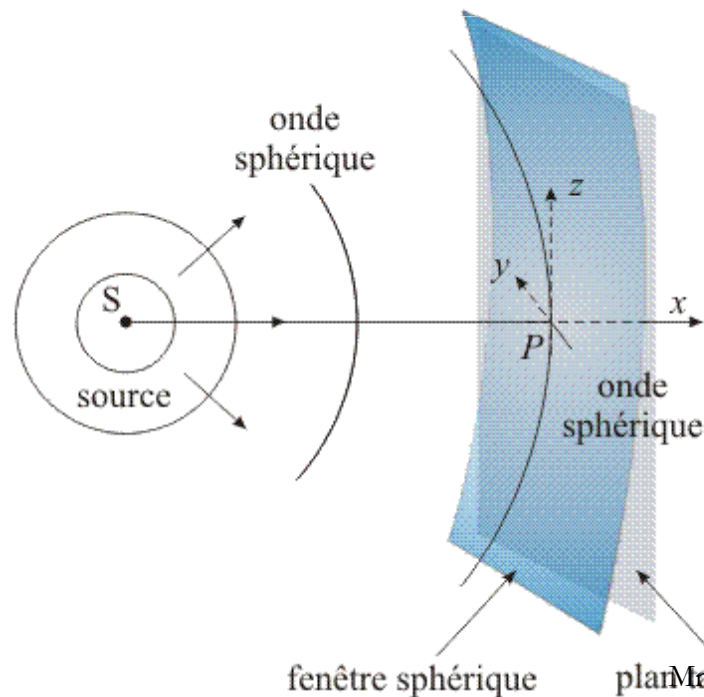
La résolution des équations de Maxwell montre que la vitesse de déplacement des champs est une constante c égale à la vitesse de la lumière.

Paramètres d'antennes

Surface d'onde et onde plane

On appelle surface d'onde (front d'onde) l'ensemble des points de l'espace atteints à un instant t par une onde émise à un instant antérieur t_0 . La phase de l'onde est identique en tout point de cette surface, l'amplitude ne l'est qu'à condition que la source rayonne de manière isotrope dans toutes les directions de l'espace.

Dans le cas d'un milieu de propagation isotrope et homogène, la vitesse de propagation est identique dans toutes les directions de l'espace et la surface d'onde est une sphère. On parle alors d'ondes sphériques.



Paramètres d'antennes

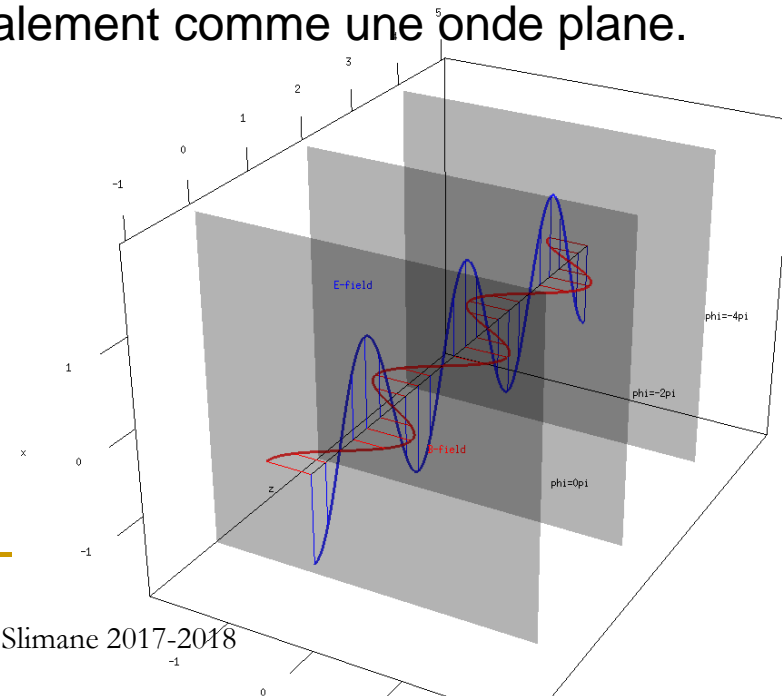
Surface d'onde et onde plane

On appelle surface d'onde (front d'onde) l'ensemble des points de l'espace atteints à un instant t par une onde émise à un instant antérieur t_0 . La phase de l'onde identique en tout point de cette surface, l'amplitude ne l'est qu'à condition que la source rayonne de manière isotrope dans toutes les directions de l'espace.

Dans le cas d'un milieu de propagation isotrope et homogène, la vitesse de propagation est identique dans toutes les directions de l'espace et la surface d'onde est une sphère. On parle alors d'ondes sphériques.

Loin de la source, l'onde peut être vue localement comme une onde plane.

Localement, les champs électriques et magnétiques ont la même valeur en tout point du plan d'onde.



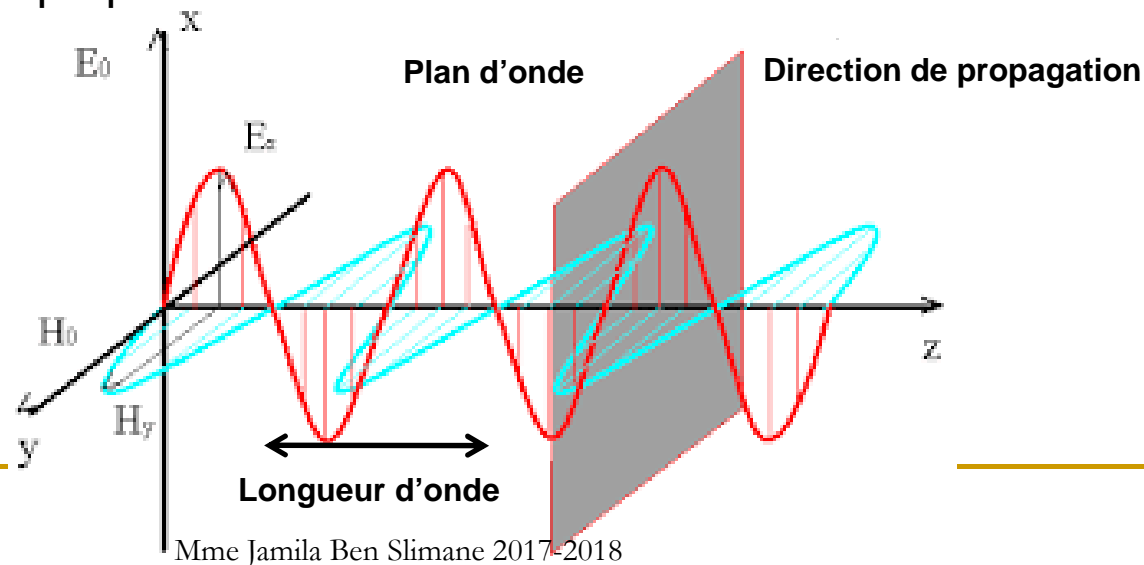
Paramètres d'antennes

Surface d'onde et onde plane

Nous allons chercher à donner une image à l'onde électromagnétique issue des équations de propagation en régime sinusoïdale .

On considère que l'onde se propage le long de l'axe z . A grande distance de la source, l'onde est localement une onde plane. A partir des équations de Maxwell, il est possible de montrer les propriétés suivantes :

- Les champs E et H sont perpendiculaires à la direction de propagation. Ils sont donc inclus au plan d'onde. On parle alors d'onde transversale électromagnétique (onde TEM)
- Les champs E , H et la direction de propagation forment un trièdre direct. Les champs E et H sont donc perpendiculaires entre eux.



Paramètres d'antennes

Surface d'onde et onde plane

Nous allons chercher à donner une image à l'onde électromagnétique issue des équations de propagation en régime sinusoïdale .

On considère que l'onde se propage le long de l'axe z. A grande distance de la source, l'onde est localement une onde plane. A partir des équations de Maxwell, il est possible de montrer les propriétés suivantes :

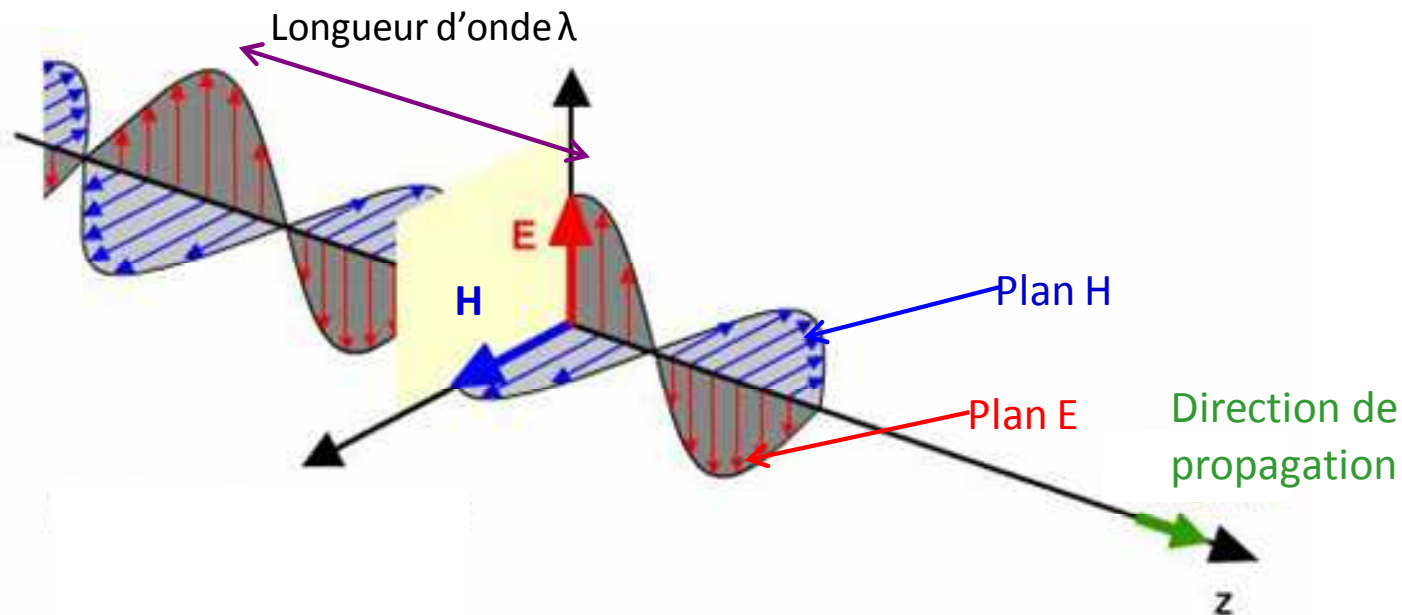
- Les champs E et H sont perpendiculaires à la direction de propagation. Ils sont donc inclus au plan d'onde. On parle alors d'onde transversale électromagnétique (onde TEM)
- Les champs E , H et la direction de propagation forment un trièdre direct. Les champs E et H sont donc perpendiculaires entre eux.
- Dans le cas d'un milieu de propagation sans pertes, les champs E et H sont en phase et sont reliés entre eux par l'équation

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

Paramètres d'antennes

Surface d'onde et onde plane

Pour une antenne à polarisation rectiligne, on appelle le plan E le plan formé par la direction de propagation et par la direction du champ électrique. Le plan H est celui formé par la direction de propagation et par la direction du champ magnétique



Paramètres d'antennes

Polarisation des ondes

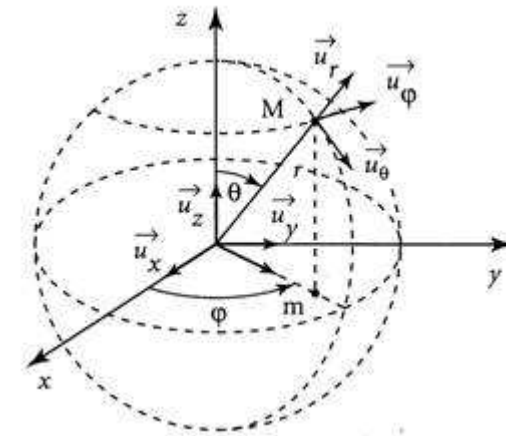
On définit la polarisation d'une onde électromagnétique comme **la direction du champ électrique**. En se plaçant dans un repère sphérique ayant pour origine la source de l'onde avec l'axe \mathbf{r} orienté le long de la direction de propagation, on peut décrire la direction du champ \mathbf{E} par la relation suivante :

$$\vec{E} = E_{\theta} \cdot \vec{u}_{\theta} + E_{\varphi} \cdot \vec{u}_{\varphi}$$

$$E_{\theta} = A \cdot \sin(\omega t + \phi_{\theta}) \quad E_{\varphi} = B \cdot \sin(\omega t + \phi_{\varphi})$$

Repère sphérique

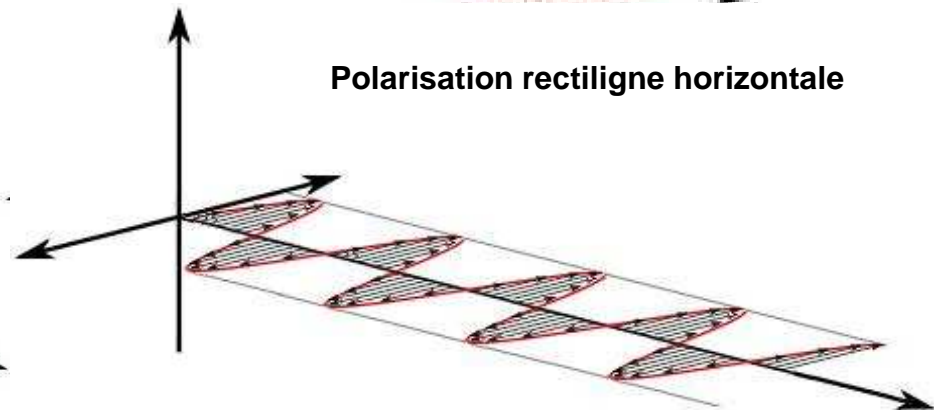
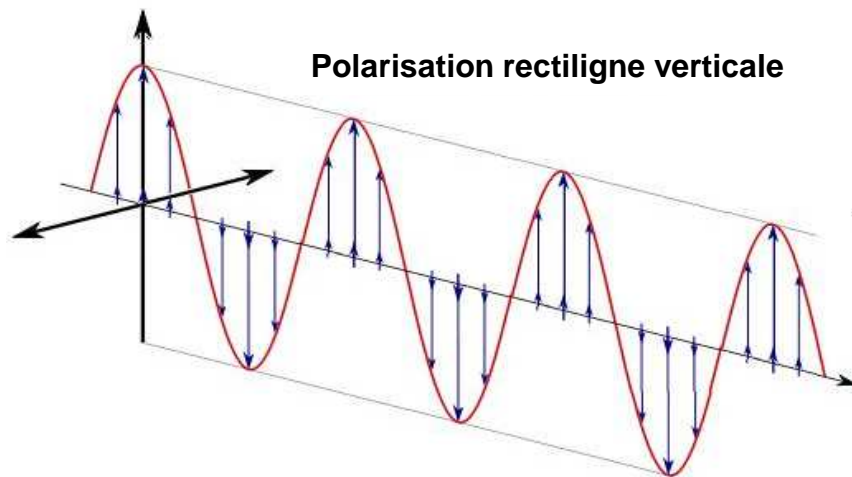
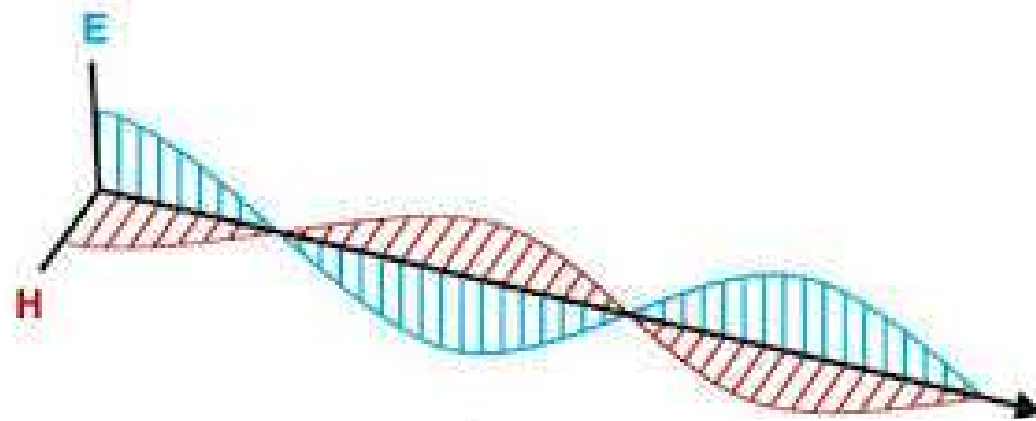
- Plan vertical : θ varie de 0 à π , $\varphi =$ constante comprise entre 0 et 2π
- Plan horizontal : $\theta = \pi/2$, φ varie de 0 et 2π



Paramètres d'antennes

Polarisation des ondes

Si les deux composantes du champ électrique vibrent en phase ou en opposition de phase ($\phi_\theta = \phi_\phi \pm \pi$) les champs E et H conservent une direction constante dans le temps. La polarisation est dite **rectiligne**. Le champ électrique évolue dans l'espace à l'intérieur d'un plan.

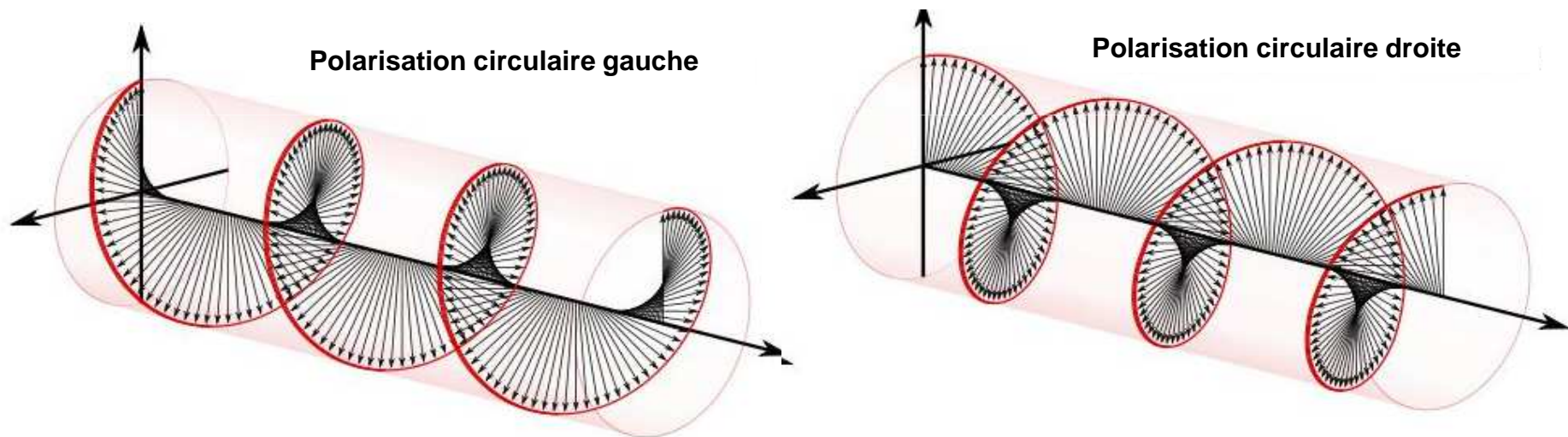


Paramètres d'antennes

Polarisation des ondes

Si, la polarisation est **elliptique** et la direction du champ E varie dans le temps. L'extrémité du vecteur représentant le champ électrique décrit une ellipse.

Dans le cas particulier où les 2 composantes sont en quadrature ($\phi_\theta = \phi_\phi \pm \pi/2$), la polarisation est alors **circulaire**. Le champ électrique évolue dans l'espace le long d'une hélice.

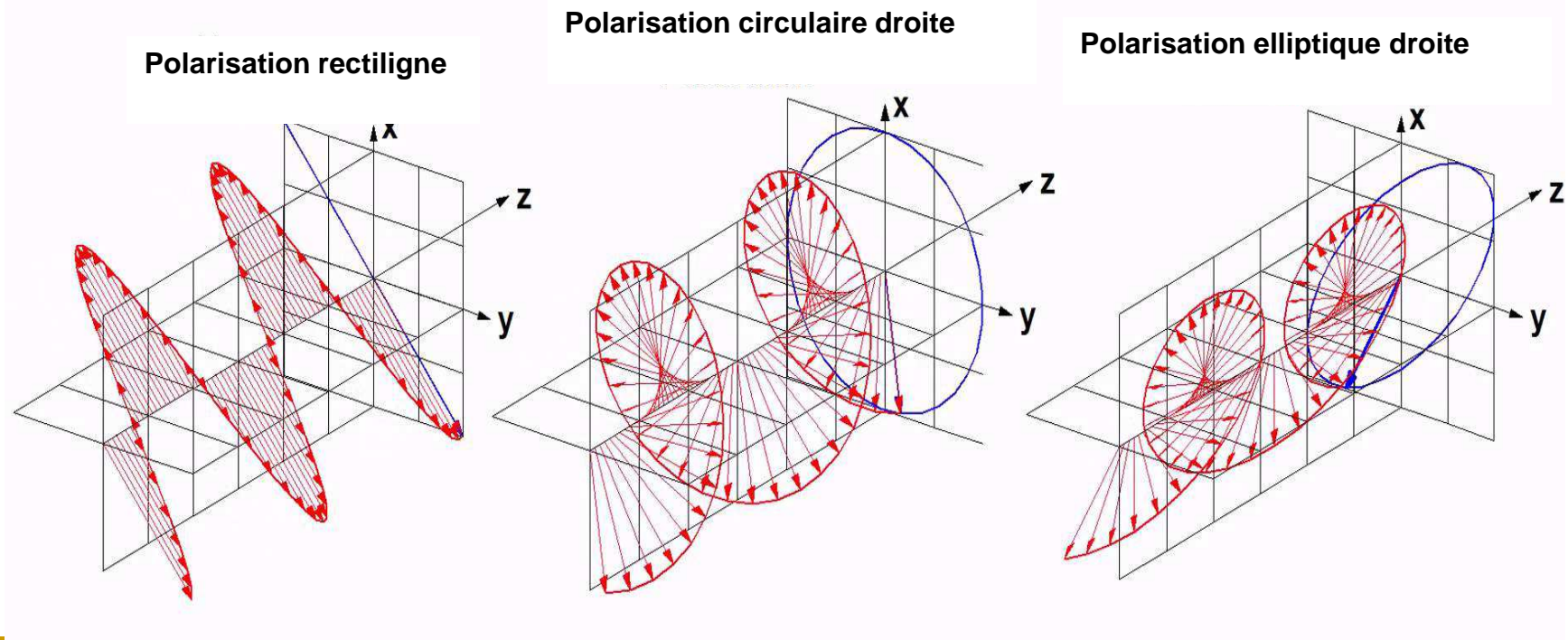


Paramètres d'antennes

Polarisation des ondes

Si, la polarisation est **elliptique** et la direction du champ E varie dans le temps. L'extrémité du vecteur représentant le champ électrique décrit une ellipse.

Dans le cas particulier où les 2 composantes sont en quadrature ($\phi_\theta = \phi_\phi \pm \pi/2$), la polarisation est alors **circulaire**. Le champ électrique évolue dans l'espace le long d'une hélice.

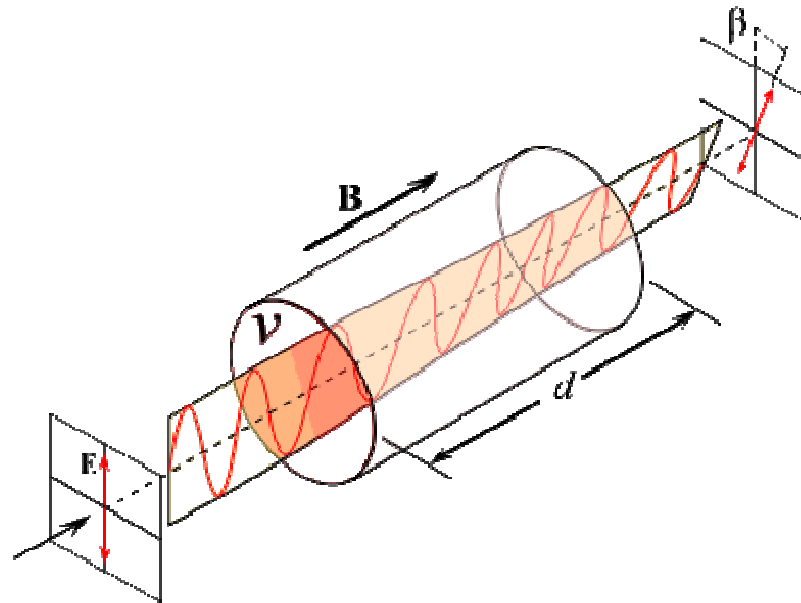


Paramètres d'antennes

Polarisation des ondes

La polarisation de l'onde dépend des caractéristiques de **l'antenne émettrice**. Ainsi, les antennes filaires présentent une polarisation rectiligne. Cependant, la polarisation d'une onde peut être modifiée par le milieu de propagation et les objets environnants.

Par exemple, le passage d'une onde à travers un milieu chargé (comme le passage d'une onde à travers l'ionosphère terrestre) conduit à une rotation du plan de polarisation par effet Faraday et donc à l'introduction de déphasage de propagation.



Paramètres d'antennes

Polarisation des ondes

La polarisation de l'onde dépend des caractéristiques de l'**antenne émettrice**. Ainsi, les antennes filaires présentent une polarisation rectiligne. Cependant, la polarisation d'une onde peut être modifiée par le milieu de propagation et les objets environnants.

Par exemple, le passage d'une onde à travers un milieu chargé (comme le passage d'une onde à travers l'ionosphère terrestre) conduit à une rotation du plan de polarisation par effet Faraday et donc à l'introduction de déphasage de propagation.

Pour optimiser la réception d'un signal radioélectrique, la polarisation de l'onde électromagnétique et celle de l'antenne réceptrice doivent être les **mêmes**. Dans le cas d'une liaison entre deux antennes à polarisation **rectiligne**, la perte de polarisation dépend de l'angle α entre les deux antennes qui représente la différence d'alignement.

$$L_{pol} = 20 \times \log(\cos \alpha)$$

Paramètres d'antennes

Caractéristiques des antennes

Quel que soit la fréquence de fonctionnement de l'antenne, quel que soit sa structure physique, le rayonnement des antennes est caractérisé par des propriétés communes. Ces propriétés doivent permettre de répondre aux questions suivantes :

- Comment une antenne rayonne t-elle la puissance qui lui est fournie dans l'espace ? Dans quelle(s) direction(s) ?
- Avec quelle efficacité se fait le transfert d'énergie entre la puissance de l'émetteur et la puissance rayonnée ?
- Sur quelle bande de fréquence l'antenne rayonne de manière optimale ?
- Quelles sont les propriétés données par l'antenne à l'onde électromagnétique émise ?

Paramètres d'antennes

Caractéristiques des antennes

