

Propagation des ondes hertziennes

Ce chapitre vise à donner une définition bien explicative sur :

- Le spectre électromagnétique et le spectre des ondes hertziennes,
- Les différents modes de la propagation des ondes hertziennes
- La propagation dans des milieux inhomogènes et aléatoires

1. Onde Electromagnétique

Définition de l'onde électromagnétique

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

Le but principal est la transmission de l'information (parole, image etc...) d'un point à un autre dans l'espace libre. Cette transmission s'effectue sous un aspect électromagnétique. La transmission de l'information en espace libre nécessite des antennes, l'une à l'émission et l'autre à la réception (Figure 1).

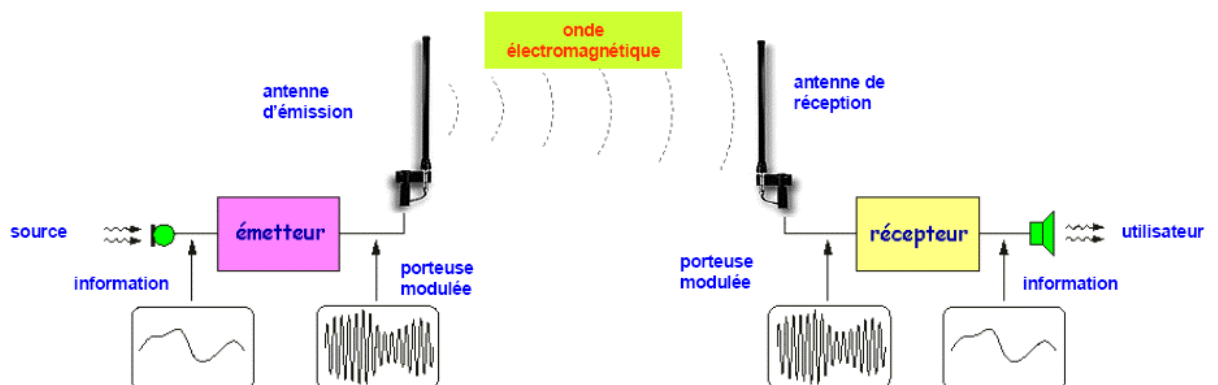
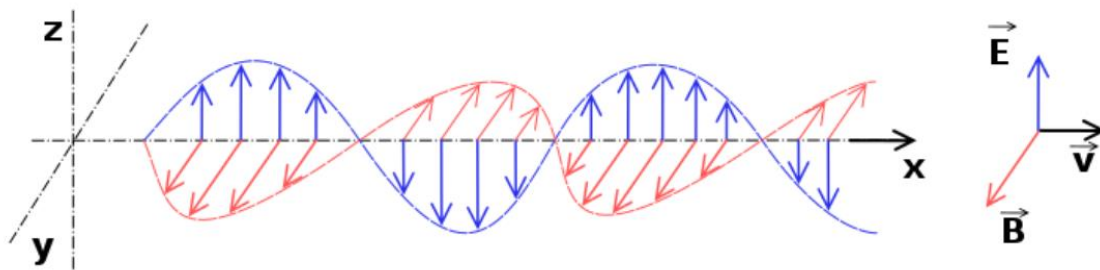


Figure1 : Propagation des ondes électromagnétique

L'antenne émettrice, qui est parcourue par un courant électrique, engendre dans l'espace une onde électromagnétique composée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{H} , dont les caractéristiques sont fixées par les équations de Maxwell. Cette onde gagne de proche en proche tout le milieu ; c'est ce **qu'on appelle la propagation des ondes électromagnétiques**.

Le récepteur reçoit l'onde électromagnétique et la transforme en un courant électrique.



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

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

- les vecteurs E et B sont perpendiculaires entre eux
- les vecteurs E et B sont perpendiculaires à la direction de propagation
- E et B sont déphasés (en retard) par rapport au courant qui les a créé.
- L'onde électromagnétique se propage en ligne droite, à la vitesse de la lumière :
vitesse de propagation dans le vide ou l'air : $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s
- Dans un matériau diélectrique de permittivité relative ϵ_r (isolant de câble coaxial, par exemple) la vitesse de propagation est inférieure à celle de la lumière :

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

et la longueur d'onde aussi

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

Propriétés de l'onde électromagnétique

❖ **Fréquence :**

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

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

❖ **Longueur d'onde :**

La longueur d'onde λ est le trajet parcouru par l'onde durant une période T :

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

Le milieu de propagation est caractérisé par des paramètres influents sur la propagation des ondes électromagnétiques tels que :

- La permittivité du milieu ϵ (F/m)
- La perméabilité magnétique μ (H/m)
- La conductivité électrique (σ $^{-1}$ /m)

Remarque :

- L'expression : $Z = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ représente l'impédance du milieu de propagation.
- L'expression : $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ représente la vitesse de propagation.
- L'influence de σ :

La conductivité σ est un paramètre très important, il indique l'effet dissipatif du milieu au niveau duquel l'énergie électromagnétique transportée par l'onde électromagnétique diminue progressivement, une partie de cette énergie étant dissipée par effet joule.

2. Spectre des ondes Hertziennes

- ✓ Les ondes électromagnétiques (OEM) forment une catégorie tout aussi variée, que l'on peut répertorier par **bandes de fréquences** : on parle de « **spectre** » électromagnétique.
- ✓ En bref, 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** (figure2 ci-dessous).

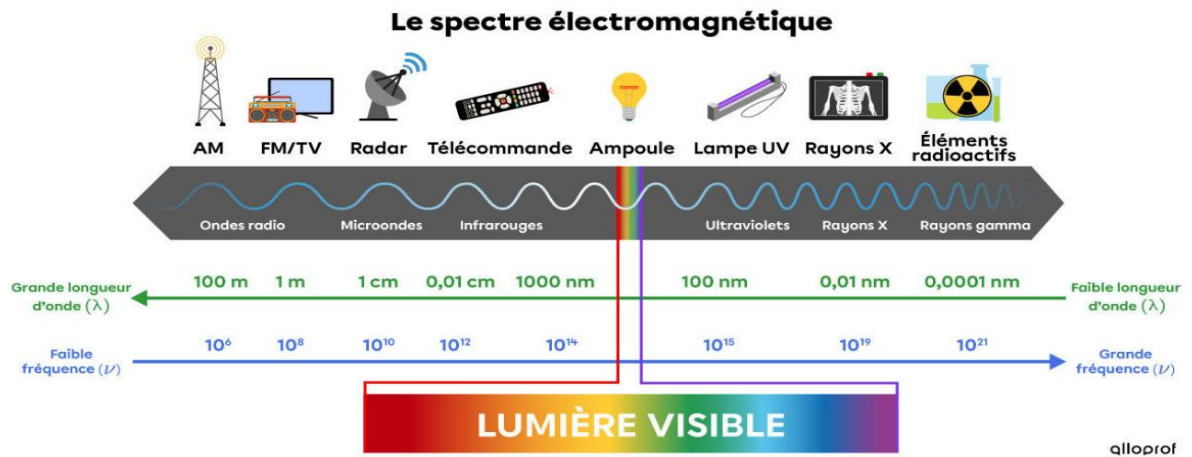


Figure2 : Spectre électromagnétique

Les ondes hertziennes appartiennent au spectre électromagnétique, elles sont comprises entre [3kHz à 300GHz]. Elles sont même divisées en sous-groupes (VLF, LF, MF, HF, VHF, UHF, SHF, EHF). Voir tableau ci-dessous.

Abréviation	Désignation courante	Fréquence	Longueur d'onde	Exemples d'utilisation
VLF	Very Low Frequency	3 KHz 30 KHz	100 Km 10 Km	Communication avec les sous-marins, Implants médicaux, Recherches scientifiques...
LF	Low Frequency	30 KHz 300 KHz	10 Km 1 Km	Radionavigation, Radiodiffusion, Radioidentification
MF	Medium Frequency	300 KHz 3000 KHz	1 Km 100 m	Radio AM, Service maritime, Appareil de recherche de victimes d'avalanche
HF	High Frequencies	3 MHz 30 MHz	100 m 10 m	Organisations diverses, Militaire, Radiodiffusion, Maritime, Aéronautique, Radioamateur, Météo, Radio de catastrophe, etc.
VHF	Very High Frequency	30 MHz 300 MHz	10 m 1 m	Radio FM, Aéronautique, Maritime, Radioamateur, Gendarmerie nationale, Pompiers, SAMU, Réseaux privés, taxis, militaire, Météo, etc

UHF	Ultra High Frequency	300 MHz 3000 MHz	1 m 10 cm	Réseaux privés, militaire, GSM, GPS, Wifi, Télévision, Radioamateur, etc.
SHF	Super High Frequency	3000 MHz 30 GHz	10 cm 1 cm	Réseaux privés, Wi-Fi, Micro-onde, Radiodiffusion par satellite (TV), Faisceau hertzien, Radar météorologique, Radioamateur, etc.
EHF	Extremely High Frequency	30 GHz 300 GHz	10 mm 1 mm	Réseaux privés, Radars anticollision pour automobiles, Liaisons vidéo transportables, Radioamateur, etc.

3. Modes de propagation des ondes hertziennes

3.1. Onde directe et onde réfléchi

Le signal émis par une antenne peut arriver au récepteur par voie directe ou après réflexion (Figure 2). La réflexion peut se faire sur la terre, sur la mer, mais parfois aussi sur les hautes couches de l'atmosphère qui sont les couches ionisées (ionosphère).

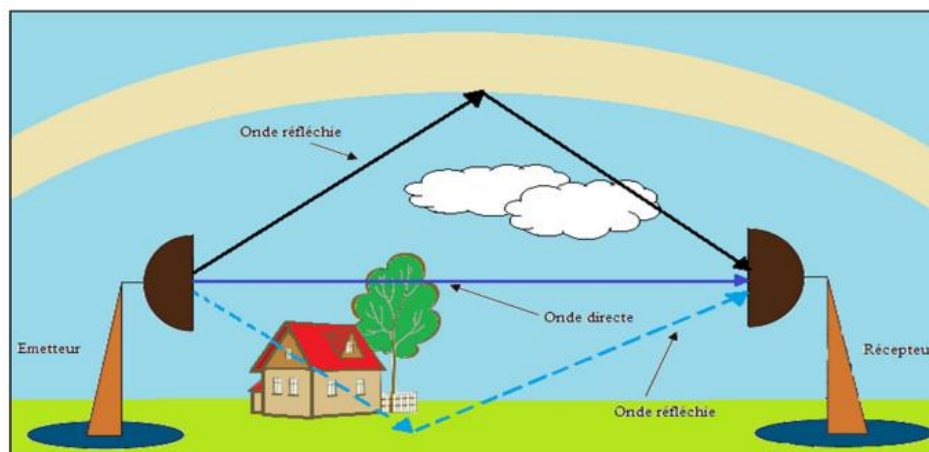


Figure 2: Propagation par une onde directe et par une onde réfléchi d'un point à un autre de la terre

On peut distinguer trois modes de propagation (figure 4) :

- 1) Onde de sol (à la surface de la terre)
- 2) Onde directe (dans la basse atmosphère)

3) Onde d'espace (par réflexion sur la haute atmosphère).

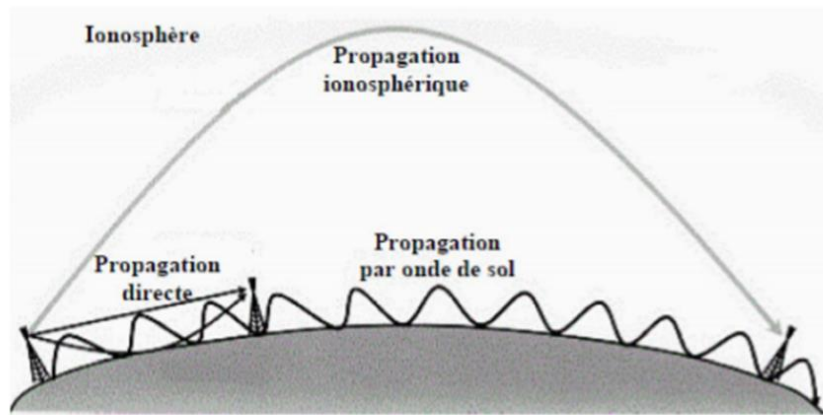


Figure 3 : Modes de propagation

Figure 4 : Modes de propagation.

3.2. Propagation en vue directe :

- Les antennes de l'émetteur et le récepteur sont en vue directe, sans obstacles, sans rencontrer d'obstacles naturels (montagnes, couches atmosphériques) ou artificiels (immeubles, lignes à THT).
- Les ondes se propagent quasiment en ligne droite.
- La propagation en vue directe concerne toutes les fréquences du spectre.
- Exemples : Toutes les communications à courte distance, les communications entre avions et centre de contrôle.

3.3. Propagation par onde de sol (superficielle) :

Le sol intervient par son relief ou obstacles naturels (montagnes, forêts...) et artificiels (bâtiments élevés), sa conductibilité et sa constante diélectrique. Il atténue les ondes qui se propagent à sa proximité, réfléchit les rayonnements qui le frappent avec une certaine incidence, diffracte les ondes au-delà de l'horizon optique.

Le sol est donc caractérisé par sa conductivité σ et sa constante diélectrique ϵ , Les deux quantités pouvant varier très sensiblement selon que l'on est sur mer ou sur terre.

Quand une onde plane se propage au-dessus du sol, une partie de l'énergie pénètre ce lui-ci et la profondeur de pénétration dépend de ϵ , σ et de la fréquence f ; l'onde qui se propage est alors atténuée et s'accompagne d'une onde circulant dans le sol. Le sol peut être donc considéré

comme un milieu dissipatif, où on définit une constante diélectrique complexe qui sera notée η :

$$\eta = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$$

Fréquence de transition :

Elle est obtenue lorsque les amplitudes du terme réel et imaginaire de la constante diélectrique complexe sont égales.

$$f_0 = \sigma / 2\pi\varepsilon$$

3.4. Propagation dans l'atmosphère (Troposphère, stratosphère et l'ionosphère)

L'atmosphère qui se compose de la **troposphère**, de la **stratosphère** et de l'**ionosphère**, intervient par la variation de sa constante diélectrique, variation de l'indice de réfraction de l'air (n) en fonction de l'altitude (h) et de la densité d'ionisation de ses régions les plus élevées. Elle intervient par l'atténuation consécutive à l'absorption par les gaz et la vapeur d'eau ou même par la pluie, (figure 5).

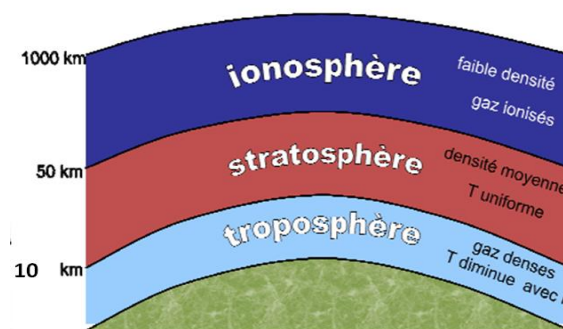


Figure 5 : L'atmosphère

a) La troposphère

C'est la couche qui est en contact avec le sol ; elle s'étend jusqu'à 10 km d'altitude et est le siège des phénomènes météorologiques faisant intervenir l'eau: pluie, nuages, vents, brouillard. Elle est limitée en altitude par une surface fictive, appelée tropopause. Son altitude varie de 7km à 14 km selon le temps qu'il fait.

Elle peut être considérée comme un milieu diélectrique pur, sauf aux ondes les plus courtes (ondes centimétriques et millimétriques) pour lesquelles elle peut être absorbante. Dans ce milieu la température, l'humidité et la pression varient de façon sensible en fonction du temps et du lieu et entraînent des variations de l'indice de réfraction de l'air.

✚ Loi de variation de l'indice de réfraction en fonction de la hauteur h ($n = f(h)$)

L'expérience montre que presque toujours la variation de l'indice en fonction de l'altitude h est linéaire. Selon une journée ou une année les variations de l'atmosphère sont fluctuantes, donc on définit une atmosphère de référence.

❖ Atmosphère de référence

Le C.C.I.R. (comité consultatif international des radiocommunications) a décidé de définir une atmosphère fondamentale de référence, pour laquelle l'indice de réfraction est donné par : $n=1+289.10^{-6}\exp(-0.136h)$.

✚ Distance maximale optique

L'horizon radio, c'est à dire la distance maximale d_{\max} à laquelle une antenne de hauteur h_r située au niveau du sol pourra recevoir le signal émis par une antenne située à une hauteur h_e (figure 6), est donné par la formule approchée :

$$d_{\max} = \sqrt{2Rh_e} + \sqrt{2Rh_r}$$

R =rayon de la terre.

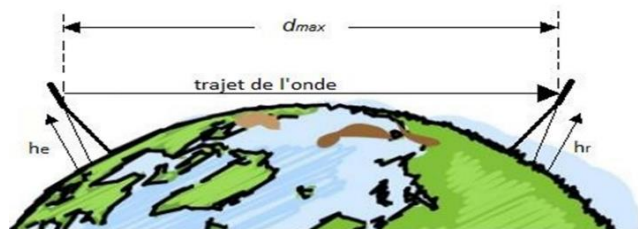


Figure 6: Portée d'une transmission troposphérique

b) La stratosphère

La stratosphère est la couche atmosphérique au-dessus de la troposphère. Elle s'étend de 10km à 50km d'altitude; C'est dans la stratosphère qu'on trouve la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur Terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires ultraviolets qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère.

c) L'ionosphère

C'est la troisième couche de l'atmosphère, elle s'étend entre 50 et 1000 Km, elle est formée de plusieurs sous-couches. Cette couche se comporte comme un miroir réflecteur, car elle est composée essentiellement de molécules de l'air qui se dissocient en ions positives et négatives lorsqu'elle est éclairée par le soleil, formant ainsi une couche conductrice qui sert de miroir aux ondes électromagnétiques incidentes

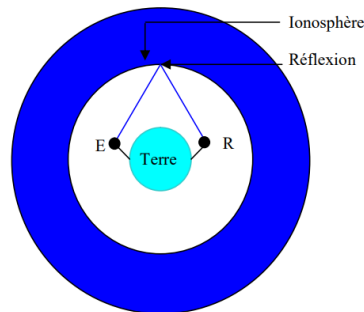


Figure 7 : Réflexion des ondes électromagnétiques sur l'ionosphère

Elle est constituée de quatre sous- couches (figure 8).

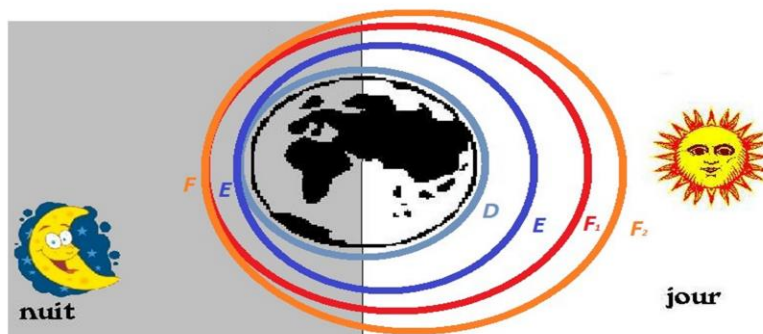


Figure 8 : Régions de l'ionosphère.

Description de la couche « ionosphère »

Les particules ionisées (électrons libres et ions), se concentrent en quatre couches :

- **La couche D** : de 10km d'épaisseur, est située à 70 km d'altitude. Elle est moins ionisée que les autres couches pendant la journée et elle disparaît pendant la nuit.
- **La couche E** : de 25km d'épaisseur, est située à environ 100km, s'atténue la nuit.

- **La couche F1** : de 20km d'épaisseur, est située à 180 km pendant la journée mais s'élève et rejoint la couche F2 pendant la nuit.
- **La couche F2** : d'une épaisseur atteignant 200 km, se situe entre 250km et 400km pendant la journée mais se trouve vers 300km pendant la nuit. C'est la couche la plus élevée et la plus ionisée et c'est celle qui joue le rôle le plus important dans les communications radio.

Les couches ionisées vont se comporter comme un véritable miroir sur les ondes radio : il se produit un mécanisme de réflexion.

Avantages et inconvénients de la propagation ionosphérique

Avantages: Comme l'onde peut être réfléchi plusieurs fois, il est possible d'atteindre des points très éloignés sur la surface terrestre avec un bon choix de la puissance et de la fréquence.

Inconvénients: Les interférences entre ondes arrivant par différents chemins après réflexions sur les couches seront à l'origine de la variation du signal reçu. C'est ce qu'on appelle l'évanouissement des ondes.

4. Propagation dans des milieux inhomogènes et aléatoires (Statistique des ondes incohérentes...)

La propagation d'une onde dans un milieu inhomogène doit faire l'objet d'une modélisation stochastique du milieu et la détermination des échelles caractéristiques du problème.

Milieu aléatoire : On modélise un milieu inhomogène comme une réalisation d'un milieu aléatoire. Dans ce cas, les évolutions des paramètres physiques du milieu en fonction de l'espace sont décrites par des processus aléatoires.

Echelles : Concerne les différentes échelles caractéristiques du problème, à savoir les distances typiques sur lesquelles varient les coefficients et les paramètres du milieu considéré.

Propagation d'ondes dans un milieu inhomogène :

On peut distinguer trois échelles de longueur dans un problème de propagation d'ondes en milieu aléatoire :

- La longueur d'onde λ ,
- La distance de propagation L ,
- La taille des inhomogénéités lc .

Pour cela, nous considérons l'équation suivante qui régit la propagation des ondes en milieu unidimensionnel (sans pertes et sans charges).

$$\frac{\partial^2 E(z, t)}{\partial z^2} + \mu(z) \cdot \epsilon(z) \cdot \frac{d^2 E(z, t)}{dt^2} = 0$$

Le milieu est caractérisé par deux paramètres : la permittivité diélectrique ϵ et la perméabilité magnétique μ .

Dans le cas **d'un milieu homogène**, les paramètres du milieu ϵ et μ sont constants, alors :

$$\frac{\partial^2 E(z, t)}{\partial z^2} + c^2 \frac{d^2 E(z, t)}{dt^2} = 0$$

C'est l'équation d'ondes standard avec la vitesse de propagation $c = (1/\epsilon \mu)^{1/2}$.

Dans un milieu inhomogène, les deux paramètres du milieu ϵ et μ sont fonctions de la coordonnée spatiale z . Toute la difficulté réside dans le calcul de ces coefficients homogénéisés, et l'analyse montre que les bons coefficients sont :

$\epsilon_{\text{eff}} = E(\epsilon)$ et $\mu_{\text{eff}} = E(\mu)$ ainsi, la vitesse effective est $C_{\text{eff}} = (1/\epsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}})^{1/2}$

Statistique des ondes incohérentes

Dans un milieu aléatoire, on distingue deux parties :

1) Un front cohérent : d'amplitude importante et qui garde plus ou moins la forme de l'onde originale,

2) des ondes incohérentes (ou réfléchies) : de faible amplitude, résultat de l'interaction de l'onde avec les inhomogénéités du milieu. L'énergie perdue par le front cohérent se retrouve dans les ondes incohérentes.