

2

Ondes Electromagnétiques

2.1. Introduction

Les ondes électromagnétiques (OEM) sont des éléments physiques d'une importance extrême puisqu'ils nous permettent :

- la communication entre les systèmes grâce à leurs propriétés de propagation dans le vide ou la matière.
- l'exploration des systèmes grâce à leurs propriétés d'interaction avec la matière.

2.2. Nature et Phénomène de Propagation des Ondes Electromagnétiques

2.2.1. Définition

Selon Maxwell, la lumière peut être considérée comme une perturbation électromagnétique qui se propage à travers l'espace, telle une onde à deux composantes : champ électrique \vec{E} , champ magnétique \vec{H} , sinusoïdaux et de même période. La direction de propagation est l'axe z qui porte le vecteur d'onde \vec{k} . \vec{E} et \vec{H} lui sont orthogonaux et perpendiculaires l'un à l'autre (Fig. 1a).

Si on considère un repère cartésien (o, x, y, z) , au niveau duquel on placera un émetteur E (Fig. 1b), l'OEM est émise à t_0 . A l'instant t_1 elle sera à la distance d_1 , à l'instant t_2 à la distance d_2 etc...

Il y'a donc un temps et une distance, par conséquent une vitesse appelée vitesse de propagation.

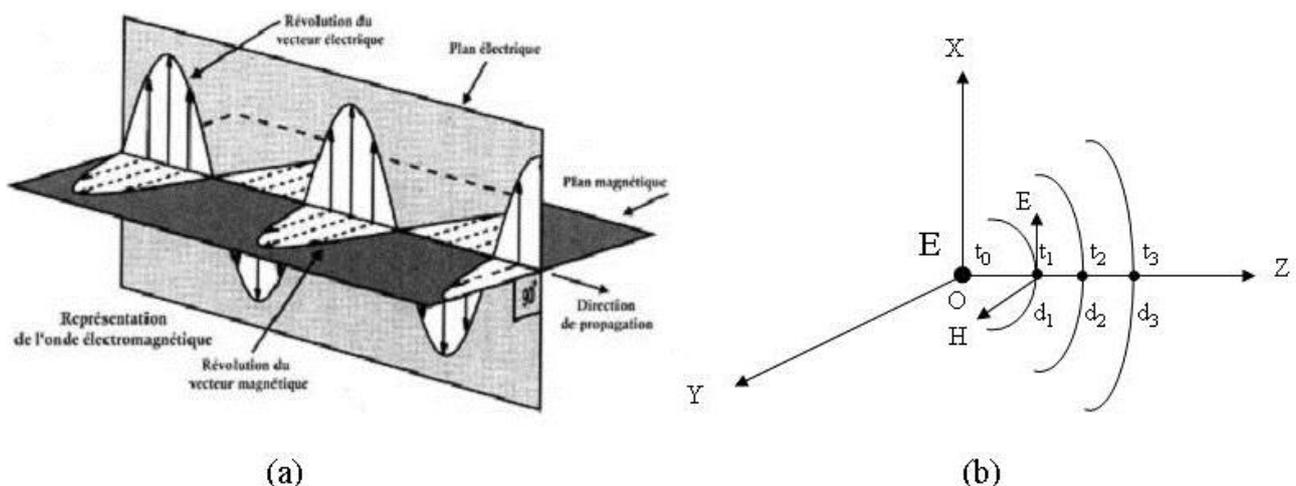


Fig.1 – Phénomène de propagation des ondes électromagnétiques.

2.2.2. Surface d'Onde

Appelée aussi front d'onde, c'est le lieu des points d'impact du champ électromagnétique dans les différentes directions de propagation (Fig. 2).

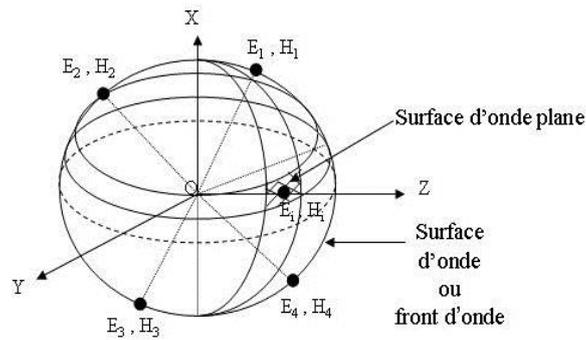


Fig.2 – Surfaces d'ondes.

Dans le cas où la propagation s'effectue de la même façon dans toutes les directions, on parle de milieu isotrope. Dans ce cas, la surface d'onde est une sphère.

Dans le cas contraire, le milieu de propagation est anisotrope; la surface d'onde est une sphère déformée.

2.2.3. Onde Electromagnétique Plane

Si on considère une surface de dimension réduite découpée dans un front d'ondes sphérique à très grande distance de l'émetteur (Fig. 2), cette surface sera assimilée à un plan.

Par définition, une onde plane est une onde dont le front d'onde est un plan.

Par conséquent, les vecteurs champs électrique et magnétique appartiennent au front d'ondes plan (Fig. 3).

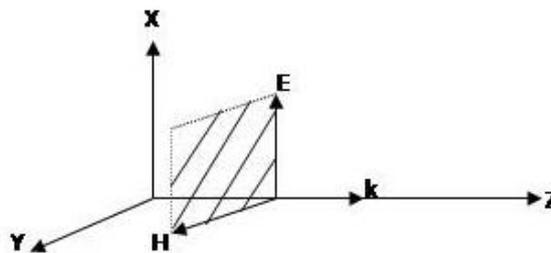


Fig.3 – Front d'onde plan.

Caractéristiques d'une onde plane :

- Les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} sont perpendiculaires
- Les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} appartiennent au plan d'onde (XOY)
- $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{k})$ forme un trièdre directe

2.3. Propagation d'une Onde Electromagnétique Plane

2.3.1. Paramètres du Milieu de Propagation

Chaque milieu de propagation est caractérisé par les paramètres ci-après:

- μ : perméabilité magnétique (H/m)
- σ : Conductivité électrique (Ω^{-1})
- ε : permittivité du milieu (F/m)

2.3.2. L'Onde Electromagnétique Plane dans le Vide

Dans ce cas, $\sigma = 0$, $\varepsilon = \varepsilon_0$ (permittivité absolue, dans le vide) et $\mu = \mu_0$ (perméabilité absolue, dans le vide). Les champs \vec{E} et \vec{H} ne dépendent que de la direction de propagation, et du temps t .

Les relations décrivant la propagation des ondes planes monochromatiques dans le vide sont exprimées par:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{d}{c}\right)\right) \quad (\text{V/m}) \quad (2.1)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{d}{c}\right)\right) \quad (\text{A/m}) \quad (2.2)$$

$$\omega = 2\pi f; \quad \lambda = cT = \frac{c}{f}$$

où: ω est la pulsation, λ est la longueur d'onde, f est la fréquence, T est la période, c représente la célérité (vitesse de propagation de la lumière dans le vide).

La variable, d , dans les équations (2.1) et (2.2) indique la direction de propagation de l'onde. Si l'on considère un repère orthonormé (O,X,Y,Z) :

- Si la direction de propagation de l'onde est l'axe OX, $d = x$:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right) ; \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right)$$

- Si la direction de propagation de l'onde est l'axe OY, $d = y$:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{y}{c}\right)\right) ; \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{y}{c}\right)\right)$$

- Si la direction de propagation de l'onde est l'axe OZ, $d = z$:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{z}{c}\right)\right) ; \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{z}{c}\right)\right)$$

On définit le vecteur d'onde, la grandeur:

$$\vec{k} = \frac{\omega}{c} \vec{e}_z \Rightarrow \left| \vec{k} \right| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (2.3)$$

2.3.3. L'Onde Electromagnétique Plane dans un Milieu Matériel

Dans un milieu matériel,

- $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$; (ε_r est la permittivité relative)
- $\mu = \mu_0 \mu_r$ (μ_r est la perméabilité relative)

Les solutions (2.1) et (2.2) restent vraies en remplaçant ε_0 par ε , μ_0 par μ et la célérité c par la vitesse de propagation v . Dans ce cas, les élongations s'écrivent:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{d}{v}\right)\right) \quad (2.4)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{d}{v}\right)\right) \quad (2.5)$$

et

$$\left|\vec{k}\right| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} \quad (2.6)$$

d étant x, y ou z, selon la direction de propagation (*OX*, *OY* ou *OZ*).

Dans un milieu matériel, la vitesse de propagation de l'onde devient:

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.7)$$

où n est l'indice du milieu, tel que : $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$

2.3.4. Représentation de la Propagation d'une Onde Electromagnétique

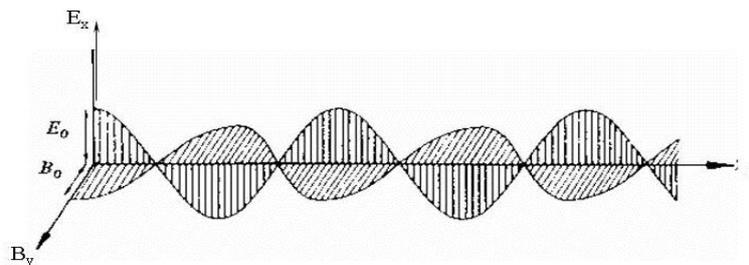


Fig.4 – Représentation longitudinale de la propagation.

2.4. Classification des Ondes EM

A chaque gamme de fréquence en **Hz** correspond un type d'onde. Les types d'OEM et leur fréquence correspondante sont représentées par le spectre électromagnétique.

- La fréquence f correspond à la couleur de la lumière
- La fréquence f , la longueur d'onde λ et la vitesse v ne dépendent que du milieu de propagation.

$$v = \frac{c}{n} \quad \text{et} \quad \lambda = v \cdot T = \frac{c}{n} \cdot T = \frac{\lambda_0}{n}$$

c est la vitesse de la lumière dans le vide

n est l'indice de réfraction du milieu

et la longueur d'onde dans le vide est définie par : $\lambda_0 = c \cdot T$

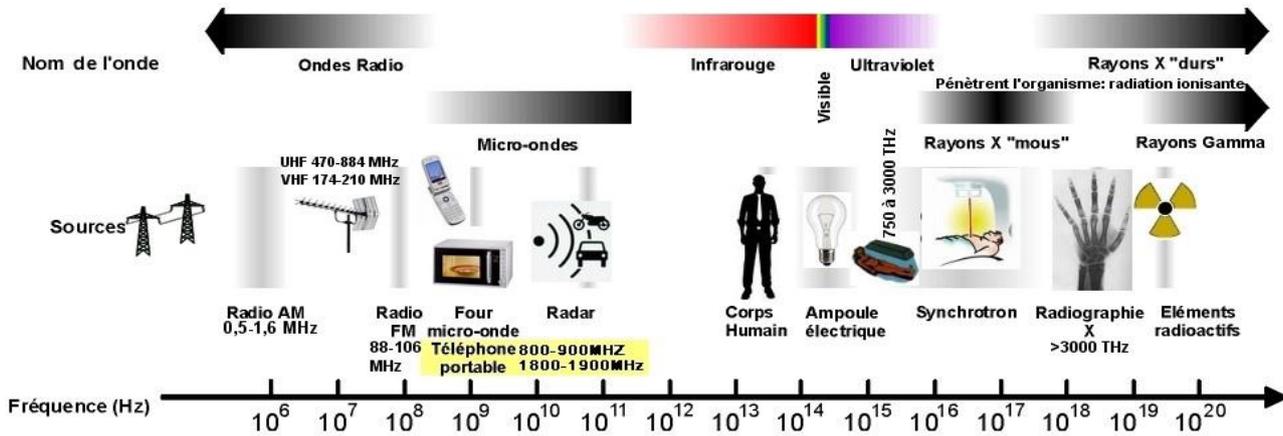


Fig.5 – Spectre électromagnétique.

Fréquence f_0	Longueur d'onde λ_0	Domaine
< 300 kHz	> 1 km	Basse fréquence : réseau électrique EDF 50 Hz, réseau téléphonique, radio GO
300 kHz – 3 MHz	1000 m – 100 m	Moyenne fréquence : radio PO
3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m	Haute fréquence (HF)
30 MHz – 300 MHz	10 m – 1 m	Très haute fréquence (VHF) : radio FM, télévision
3 GHz – 10 GHz	10 cm – 3 mm	Hyperfréquence (SHF) : radar
10 GHz – 600 GHz	3 mm – 0,5 mm	Micro-ondes : four à micro-ondes
600 GHz – $4 \cdot 10^{14}$ Hz	0,5 mm – 0,76 μ m	Infrarouge (IR) : rayonnement thermique
$4 \cdot 10^{14}$ Hz – $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz	0,76 μm – 0,4 μm	Lumière visible : rouge au violet Comprendre le processus de la vision en fonction des caractéristiques de la lumière
$7,5 \cdot 10^{14}$ Hz – $3 \cdot 10^{16}$ Hz	400 nm – 10 nm	Ultraviolet (UV): stériliser l'eau
$3 \cdot 10^{16}$ Hz – $3 \cdot 10^{20}$ Hz	10^{-8} m – 10^{-12} m	Rayons X: radiographie
$3 \cdot 10^{20}$ Hz – $3 \cdot 10^{22}$ Hz	10^{-12} m – 10^{-14} m	Rayons γ (gamma): scintigraphie
> $3 \cdot 10^{22}$ Hz	< 10^{-14} m	Rayons cosmiques

Tableau 1 – Classification des ondes électromagnétiques.

2.5 Flux Lumineux - Intensité Lumineuse

- ✦ Les intensités du champ électrique et du champ magnétique sont liées par la relation :

$$H_0 = E_0 \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \quad (2.8)$$

- ✦ La lumière transporte de l'énergie avec un débit appelé flux lumineux Φ . Le flux lumineux s'exprime en Watt (W). La densité spatiale du flux lumineux est appelée intensité I . elle s'exprime en Watt par unité de surface (W/m^2).
- ✦ Dans le cas de l'onde plane monochromatique, La valeur moyenne temporelle de l'intensité lumineuse est exprimée par :

$$\langle I \rangle = \frac{n}{2c\mu_0} E_0^2 \quad (2.9)$$

2.6. Quelques Unités

1 joule (**J**) = 1 Watt (**W**) . 1 seconde (**s**)

1 électron Volt (**eV**) = 1.60219×10^{-19} **J**

1 **J** = 6.2414×10^{18} **eV**

1**J**/(**cm**² . **s**) = 10^{-3} **W/m**²

0 **K** = -273 °**C**

373 **K** = 100 °**C**

2.7. Quelques Constantes Physiques Fondamentales

Constante de Planck: $h \approx 6.62606896 \times 10^{-34}$ **J.s**

$$h \approx 6.58211899 \times 10^{-16} \text{ eV.s}$$

Constante de Boltzmann: $k \approx 1.3806504 \times 10^{-23}$ **J/K**

Vitesse de la lumière dans le vide: $c = 299792458$ **m/s** (valeur exacte)

Perméabilité du vide: $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ **Hm**⁻¹ (valeur exacte)

Permittivité du vide: $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 \cdot c^2) = 8.584187817 \times 10^{-12}$ **F.m**⁻¹ (valeur exacte)

Charge élémentaire de l'électron: $e = 1.60217653 \times 10^{-19}$ Coulomb (**C**)

Masse de l'électron: $m_e = 9.1093826 \times 10^{-31}$ **kg**