

Capacités exigibles :

- Distinguer les caractéristiques d'une onde mécanique de celles d'une onde électromagnétique (OEM)
- Savoir définir et connaître la relation entre la longueur d'onde, la célérité et la fréquence d'une onde
- Savoir exploiter le spectre des ondes électromagnétiques en fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde (domaines et applications)
- Savoir définir la polarisation d'une onde électromagnétique

I. Généralités sur les ondes :

L'ensemble du vocabulaire à connaître est explicité dans la vidéo suivante :
« Savoir caractériser une onde »

A. Qu'est-ce qu'une onde ?

Une **perturbation** d'un milieu est une **modification locale et temporaire** des propriétés de ce milieu.

Lorsqu'il y a déplacement de matière, on caractérise ce déplacement/mouvement grâce à sa vitesse (en m/s). Pour un phénomène ondulatoire (où il n'y a pas de déplacement de matière), on parle de **vitesse de propagation** (ou encore de vitesse de déplacement de la perturbation) ou plus simplement de **célérité** (en m/s). On note la célérité d'une onde, v .

B. Les deux grandes familles :❖ **Méthode :**

Pour savoir si un phénomène ondulatoire appartient à la famille des ondes mécaniques ou électromagnétiques, il faut donc se poser la question suivante : « cette onde peut-elle se propager dans le vide ? » Si oui, le phénomène appartient à la famille des rayonnements électromagnétiques.

C. Qu'est-ce qu'une onde transversale ? longitudinale ?

Une onde est dite **transversale** lorsqu'un point du milieu affecté par la perturbation se déplace perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde.

Une onde est dite **longitudinale** lorsqu'un point du milieu affecté par la perturbation se déplace **parallèlement** à la direction de propagation de l'onde.

D. Qu'est-ce qu'une onde progressive ? stationnaire ?

On appelle **surface d'onde** ou front d'onde, l'ensemble des points du milieu qui subissent la même valeur de la perturbation à un instant donné (*i.e.* surface du milieu de propagation sur laquelle tous les points vibrent en phase).

❖ **Nœuds et ventres des ondes stationnaires :**

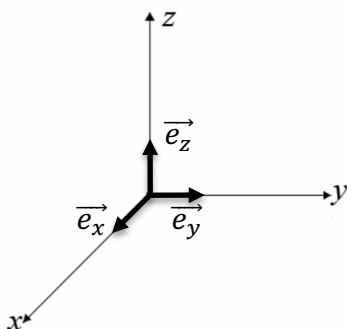
Une onde stationnaire ne se propage pas.

E. Qu'est-ce qu'une onde plane ? une onde circulaire ? une onde sphérique ?

Dans ce paragraphe, les milieux de propagation sont considérés transparents, homogènes, isotropes (MTHI) :

- Milieu **transparent** : aucune absorption d'énergie de la part du milieu, l'énergie transportée par l'onde reste constante
- Milieu **homogène** : les propriétés physiques du milieu sont identiques en tout point de l'espace
- Milieu **isotrope** : les propriétés physiques du milieu sont identiques dans toutes les directions de l'espace

Notation pour l'ensemble du chapitre :



Les coordonnées cartésiennes sont notées $(0, x, y, z)$.

Les vecteurs unitaires de cette base sont notés $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$, et forment un trièdre direct.

Si la propagation de l'onde ne se fait que dans une seule direction/dimension, l'onde est alors plane : ses surfaces d'ondes sont des plans.

Si la propagation de l'onde se fait dans deux directions/dimensions, l'onde est alors circulaire : ses surfaces d'ondes sont des cercles.

Si la propagation de l'onde se fait dans trois directions/dimensions, l'onde est alors sphérique : ses surfaces d'ondes sont des sphères.

Limite de l'onde plane progressive dans un milieu THI :

Dans un milieu transparent, homogène et isotrope, une onde **plane progressive** se propage **sans se déformer** à la célérité v , appelée aussi vitesse de propagation de l'onde. L'amplitude de l'onde plane progressive est donc constante (il n'y a pas de pertes en espace libre pour ce modèle). Elle possède donc une extension infinie dans l'espace !

Dans un milieu matériel non THI, l'onde peut subir une absorption (l'amplitude de l'onde diminue au fur et à mesure de sa propagation) et/ou une dispersion (l'onde « s'étale » dans l'espace, voir plus loin dans ce chapitre)

Pour déterminer la célérité d'une onde à partir d'un décalage temporel :

d : distance parcourue par la perturbation, en mètre.

Δt : durée écoulée pour que la perturbation parcourt la distance d , en seconde.

v : célérité de l'onde, en m/s

II. Ondes mécaniques planes progressives sinusoïdales/harmoniques (OPPH) :

A. Définition :

Une onde réelle n'est jamais une OPPH (d'extension infinie dans l'espace et le temps !)



L'ensemble des notions abordées ci-dessous est explicité dans la vidéo suivante :
« Modélisation d'une OPPH »



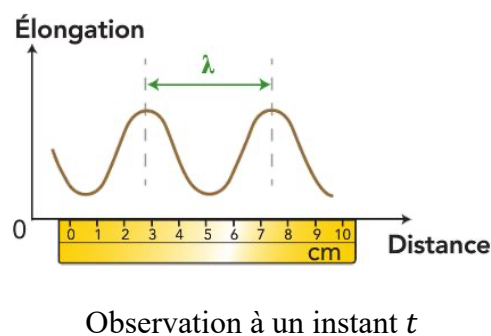
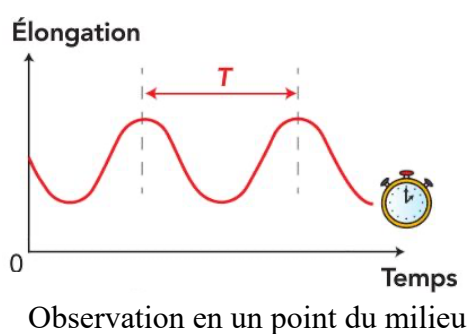
❖ **Intérêt de l'utilisation des OPPH à une dimension :**

Comme pour les signaux alternatifs et périodiques qui peuvent se décomposer en une somme discrète de signaux sinusoïdaux alternatifs (théorème de Fourier), une onde périodique à trois dimensions peut se décomposer en une somme discrète d'ondes planes progressives sinusoïdales à une dimension.

L'OPPH se propageant dans un milieu transparent, linéaire et isotrope est « une situation analogue » au signal sinusoïdal alternatif en entrée d'un système linéaire.

B. Double périodicité : période temporelle T et période spatiale λ

Lorsque la source de la déformation émet de façon périodique, on observe une double périodicité de l'onde :



Pour savoir quelle période (temporelle T ou spatiale λ) la représentation graphique vous permet de mesurer, il faut lire l'unité (ou le nom) de l'axe des abscisses.

❖ Relation entre la longueur d'onde et la fréquence de l'onde : à connaître par cœur

avec λ : longueur d'onde ou période spatiale (en mètre)

T : période temporelle, en seconde

f : fréquence de l'onde (en Hertz)

v : célérité de l'onde, en m/s

❖ Grandeurs temporelles et spatiales analogues : à connaître par cœur

Grandeurs temporelles				Grandeurs spatiales		
Symbole/Formule	Nom	Unité		Symbole/Formule	Noms	Unité
T	Période	s	\leftrightarrow			
$\omega = \frac{2\pi}{T}$	Pulsation	rad/s	\leftrightarrow			
$f = \frac{1}{T}$	Fréquence	Hz	\leftrightarrow			

C. Expression littérale d'une OPPH :

L'onde plane (à une dimension selon l'axe Ox par exemple), progressive sinusoïdale (ou harmonique ou monochromatique) se propageant dans le sens des « x positifs » (sens des x croissant), est décrite par la fonction :

L'onde plane (à une dimension selon l'axe Ox par exemple), progressive sinusoïdale (ou harmonique ou monochromatique) se propageant dans le sens des « x négatifs » (sens des x décroissant), est décrite par la fonction :

A : amplitude de l'onde, de même unité que $s(x, t)$

k : module d'onde, en rad/m

φ_0 : la phase à l'origine ($t = 0$ et $x = 0$) de l'onde (en radian)

D. Propagation dans un milieu dit « dispersif » :

Conséquence importante : (à retenir)

III. OPPH et ondes stationnaires dans un milieu infini :

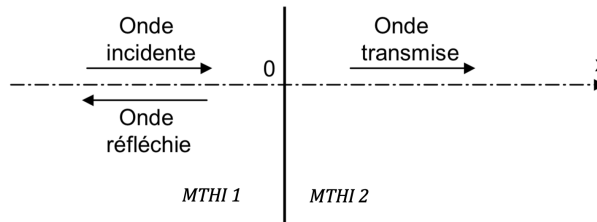
L'ensemble des notions abordées dans ce paragraphe est explicité dans la vidéo suivante :
« Réflexion d'OPPH : conditions d'obtention d'ondes stationnaires »

A. Obtention d'ondes stationnaires à partir d'OPPH :

❖ **Lien entre les ondes progressives et les ondes stationnaires :**

❖ Coefficient de réflexion en amplitude r , à l'interface entre deux milieux :

Soit une OPPH se propageant dans un MTHI 1, nommé « onde incidente ».



A connaître par cœur :

On définit le coefficient de réflexion en amplitude, noté r (sans unité), à l'interface entre le milieu de propagation de l'onde incidente et le second milieu ainsi :

$X_{incidente}$: amplitude/hauteur **algébrique** de l'onde incidente

$X_{reflechie}$: amplitude/hauteur **algébrique** de l'onde réfléchie

r : coefficient de réflexion en amplitude, sans unité

❖ Si le coefficient de réflexion est $r = -1$ ou $r = +1$ dans un milieu infini :

Cas de la corde :

Pour une corde infinie ayant une extrémité fixe, $r = -1$

Pour une corde infinie ayant une extrémité libre, $r = +1$

Un milieu infini ?

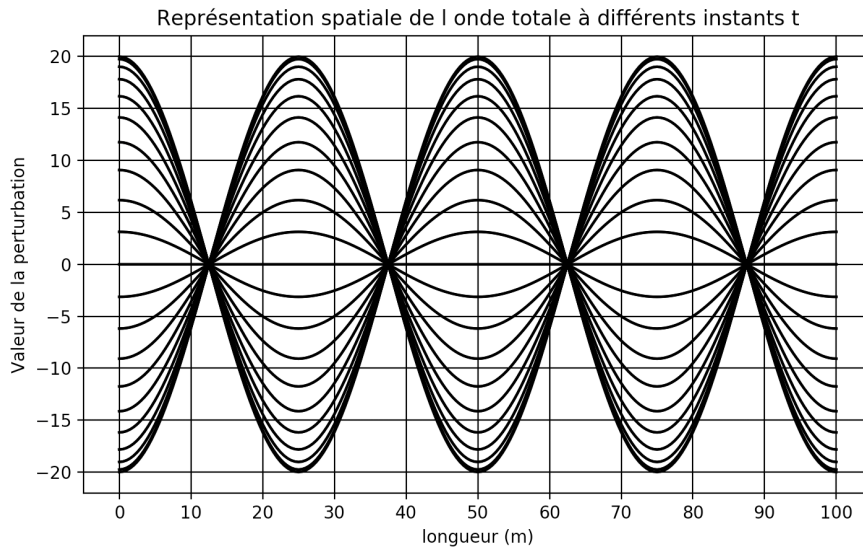
L'exemple précédent évoque une corde infinie avec une extrémité : cela semble contradictoire. Le terme rigoureux devrait être milieu « semi-infini ».

Distance entre deux nœuds, deux ventres :

Qu'est-ce qu'un fuseau ?

Exemple sur le profil d'une OS à différents instants :

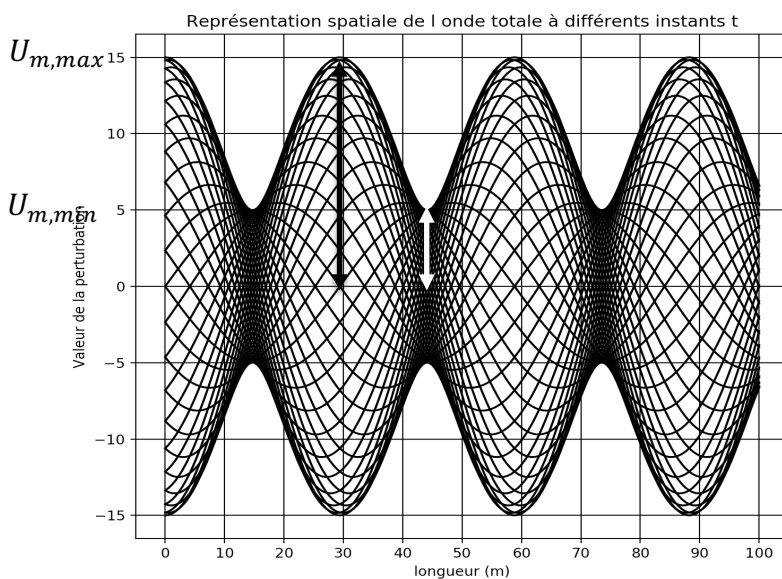
Les différentes courbes représentent l'onde à différents instants.



A x fixé, le point du milieu a un mouvement sinusoïdal en fonction du temps, d'amplitude dépendant de la position x .

B. Mélange d'ondes stationnaires et d'OPPH :

❖ Si le coefficient de réflexion est différent de $r = -1$ ou $r = +1$ dans un milieu infini :



Les traits représentent le profil de l'onde à différents instants.

On constate que la courbe décrite par le sommet de la perturbation lors de sa propagation dans le milieu est une sinusoïde.

Attention, sur ce graphe permettant de lire $U_{m,max}$ et $U_{m,min}$, l'axe des abscisses est la distance (et non plus le temps).

Définition du taux d'onde stationnaire : à savoir

Le taux d'onde stationnaire (TOS) est défini ainsi :

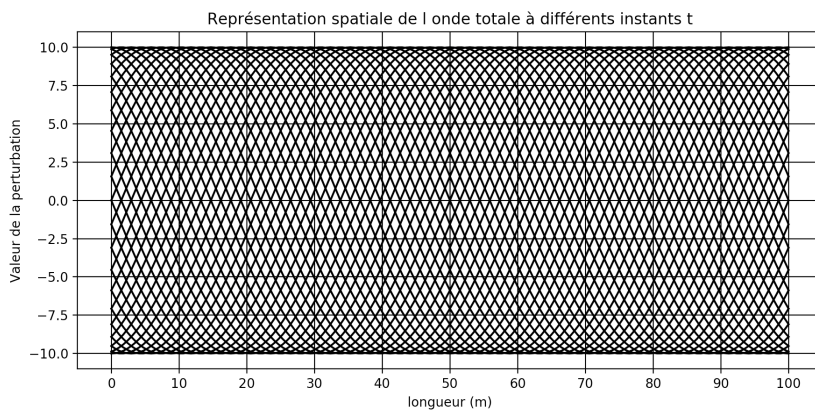
TOS : taux d'onde stationnaire, sans unité

$U_{m,max}$: valeur maximale de l'amplitude de l'onde.

$U_{m,min}$: valeur minimale de l'amplitude de l'onde.

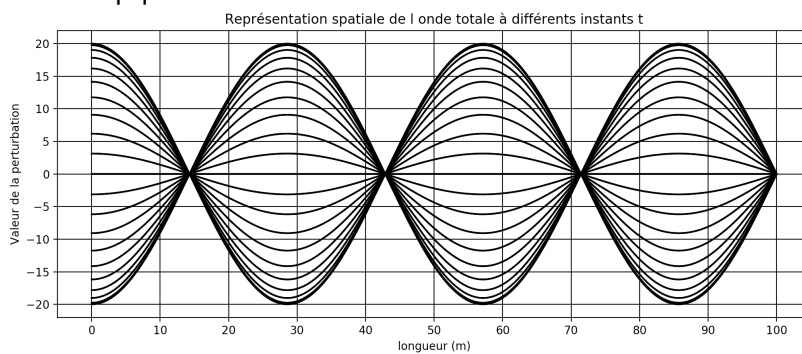
Valeurs particulières du coefficient de réflexion : (à savoir faire)

- Si $r = 0$:



Calcul du TOS :

- Si $|r| = 1$:



Calcul du TOS :

A retenir :

Plus le *TOS* augmente, plus l'onde présente dans le milieu (somme de l'onde incidente et de l'onde réfléchie) se rapproche de l'onde stationnaire.

Pour un milieu de propagation infini (semi-infini) :

Les rayonnements électromagnétiques peuvent être appréhendés à l'aide du modèle ondulatoire et du modèle corpusculaire. Dans ce chapitre, nous allons utiliser uniquement le modèle ondulatoire afin de comprendre les phénomènes électromagnétiques (tels que la lumière).

IV. Rayonnements électromagnétiques dans le vide :

A. Le modèle des ondes électromagnétiques :

❖ **Champ électrique et champ magnétique :**

Un champ électrique, représenté par un vecteur noté \vec{E} , règne en tout point de l'espace. Un champ magnétique, représenté par un vecteur noté \vec{B} , règne en tout point de l'espace.

❖ **Modèle de l'onde électromagnétique :**

Ces deux champs sont **couplés** : une perturbation (variation) du champ magnétique \vec{B} en un point de l'espace (dans un conducteur) engendre une perturbation du champ électrique \vec{E} . Un champ électrique \vec{E} dans un conducteur engendre un champ magnétique \vec{B} autour du conducteur.

B. Naissance d'un rayonnement électromagnétique :

Une antenne est un conducteur électrique constitué d'atomes : lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique (issu du signal d'entrée imposé à l'antenne), le nuage électronique de ces atomes est déformé. Lorsque l'on impose aux bornes de l'antenne, une impulsion électrique (à l'aide d'un champ électrique), cela engendre un déplacement des électrons qui retournent à leur position initiale, une fois l'impulsion terminée. Cette déformation du nuage électronique engendre un rayonnement autour de l'antenne.

Une **antenne d'émission** est un dispositif permettant la conversion de la puissance d'un signal électromagnétique guidé en une puissance rayonnée.

Une **antenne de réception** est un dispositif permettant la conversion de la puissance rayonnée captée en puissance d'un signal électromagnétique guidé.

L'antenne est un dispositif réversible (ou réciproque).

Les rayonnements électromagnétiques se propagent bien dans l'atmosphère pour des fréquences basses du spectre radiofréquence (jusqu'à des fréquences de l'ordre d'une vingtaine de gigahertz). L'atténuation due à l'absorption dans l'atmosphère se manifeste au-delà de 20GHz. L'air n'est alors plus un milieu transparent.

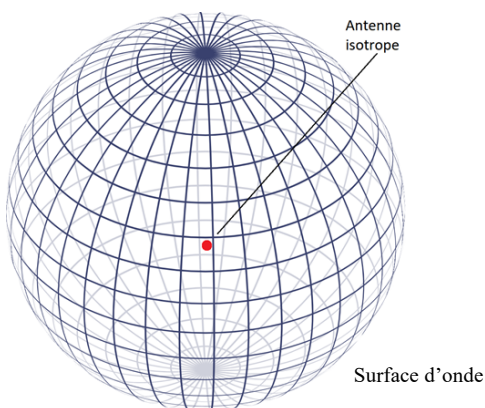
D'une manière générale, l'objectif des communications est d'obtenir un débit toujours plus grand. Or, plus la fréquence d'utilisation est élevée, plus la largeur de bande passante utilisable est grande et donc plus le débit supporté est élevé. Cette tendance à l'augmentation de la fréquence des systèmes de communication au cours de leur évolution est incontestable.

❖ Modèle de l'antenne isotrope :

Une antenne est **isotrope** si les ondes électromagnétiques qu'elle émet, possèdent des propriétés physiques identiques dans toutes les directions de l'espace.

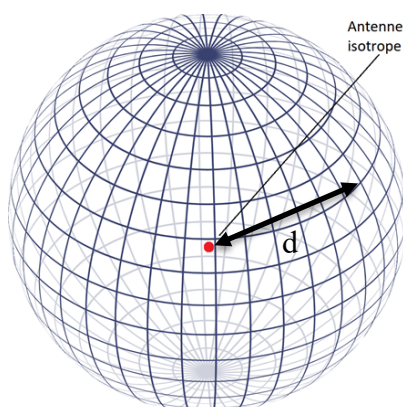
Rappel : qu'est-ce qu'une surface d'onde ?

On appelle **surface d'onde**, l'ensemble des points du milieu qui subissent la même valeur de champ électrique à un instant donné.



Antenne isotrope

❖ Puissance surfacique rayonnée par une antenne isotrope :



On note P_e , la puissance moyenne alimentant une antenne isotrope.

p_{iso} : puissance surfacique moyenne rayonnée par l'antenne, en W/m^2

P_e : puissance alimentant l'antenne isotrope, en W

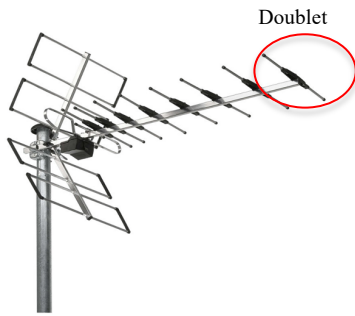


Notation dans la suite de ce chapitre :

P : puissance moyenne, en watt

p : puissance surfacique moyenne, en W/m^2

Une antenne parfaitement isotrope n'existe pas : cependant ce modèle est nécessaire pour comprendre les antennes réelles.



❖ Antenne réelle filaire « doublet » ou « dipôle » :

Un doublet est constitué de deux fils métalliques infiniment minces (dont la longueur totale a une importance selon le rayonnement que l'on veut émettre). C'est l'élément de base de nombreuses antennes.

Les antennes réelles sont en générales **directives** : grâce à leur géométrie, une direction de propagation est privilégiée.

A retenir :

	<p>L'onde électromagnétique émise par un doublet se propage principalement perpendiculairement à ce doublet : le rayonnement est nul suivant l'axe du doublet et maximal dans le plan perpendiculaire au doublet. Un doublet n'émet donc pas de façon isotrope.</p> <p>Le vecteur champ électrique \vec{E} émis par un doublet est principalement parallèle à ce doublet : sa valeur est maximale lorsqu'il est parallèle au doublet.</p>
--	--



Les surfaces d'ondes d'un doublet sont schématisées sur le logo ci-contre.

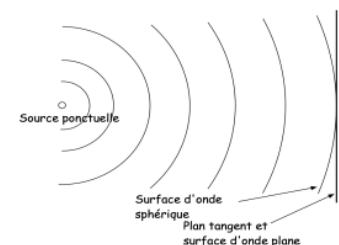
Remarque :

Un doublet est constitué d'atomes : lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique (issu du signal d'entrée imposé à l'antenne), le nuage électronique de ces atomes est déformé. Cette déformation engendre un rayonnement autour du doublet. Le rayonnement total autour du doublet peut être considéré comme la somme des rayonnements de chaque atome le constituant.

C. Modèle de l'onde électromagnétique plane, progressive :

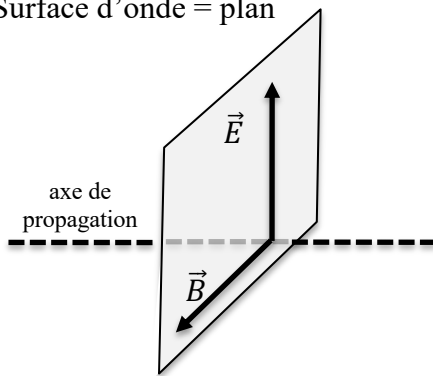
Dans la suite du chapitre, on fait l'hypothèse que l'antenne est isotrope.

Loin d'une antenne isotrope, la surface d'onde sphérique possède un rayon très grand. Dans une direction donnée, on pourra l'assimiler localement à son plan tangent.



❖ **Propriété d'une onde électromagnétique plane :**

Surface d'onde = plan



Pour une onde EM plane, les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} subissent des perturbations dans un même plan : ce plan est perpendiculaire à la direction de la propagation

Si l'onde électromagnétique est plane alors les champs \vec{E} et \vec{B} sont transverses : ils sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. On parle aussi d'onde transverse électromagnétique (TEM).

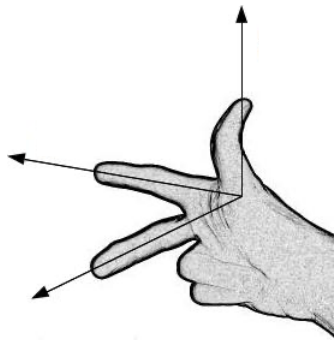
❖ **Onde plane progressive (OPP) :**

Une OPP est une onde plane qui se propage dans une direction et un sens bien déterminé, sans déformation du signal.

Dans la suite, le vecteur unitaire indiquant la **direction de propagation** et le **sens de propagation** de l'onde est noté \vec{e}_{prop}

Propriété de l'OPP : à connaître par cœur

$(\vec{e}_{prop}, \vec{E}, \vec{B})$ forment un trièdre direct. La règle de la main droite permet de retrouver ce trièdre direct :



\vec{E} : vecteur représentant le champ électrique

\vec{B} : vecteur représentant le champ magnétique

\vec{e}_{prop} : vecteur unitaire indiquant la direction de propagation et le sens de propagation de l'OPP

D. Onde électromagnétique plane progressive monochromatique (harmonique) (OEMPPH) :

Une onde électromagnétique plane progressive et harmonique se propageant dans le sens des « x positifs » (sens des x croissant), a un champ électrique \vec{E} dont la norme E a pour expression temporelle littérale :

Une onde électromagnétique plane progressive et harmonique se propageant dans le sens des « x négatifs » (sens des x décroissant), a un champ électrique \vec{E} dont la norme E a pour expression temporelle littérale :

E_0 : amplitude du champ électrique

❖ **Si cette OEMPPH se propage dans le vide :**

Définition de la longueur d'onde :

Relation de structure dans le vide :

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

B_0 : amplitude du champ magnétique, en Tesla

❖ **Si cette OEMPPH se propage dans un milieu autre que le vide :**

Célérité v dans un milieu autre que le vide :

Dans un milieu linéaire, homogène, isotrope et transparent (pour la fréquence des ondes étudiées), la célérité, notée v , d'une onde électromagnétique plane progressive et harmonique (OEMPPH) est :

γ : coefficient de vélocité du milieu, sans unité

$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$: célérité d'une onde électromagnétique dans le vide

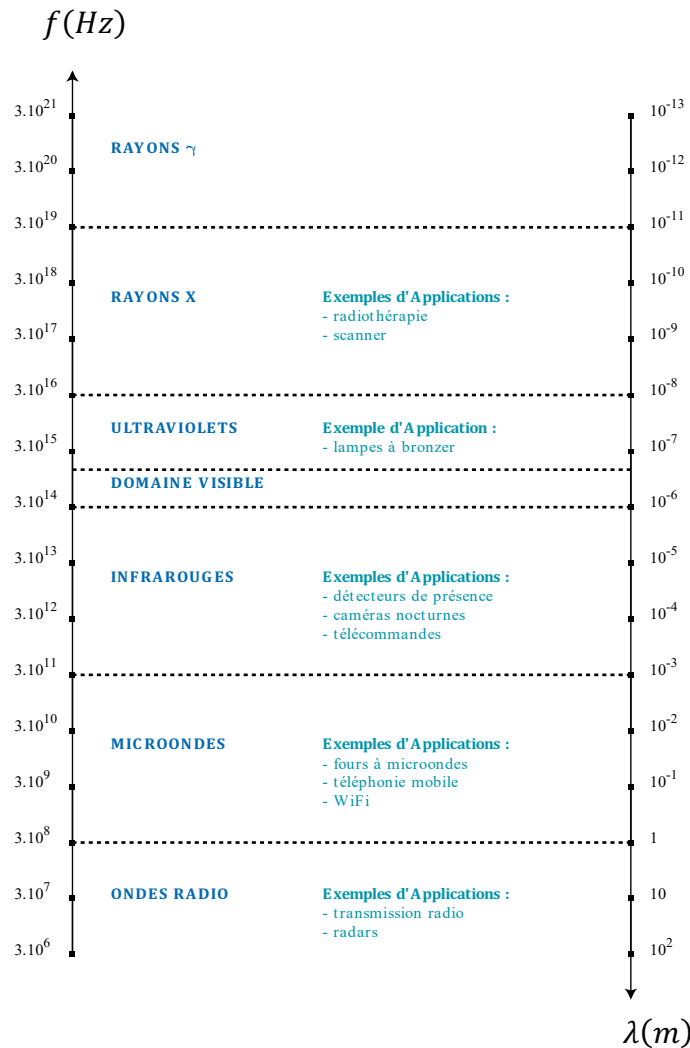
Remarques :

1. Pour un milieu non dispersif, le coefficient γ ne dépend pas de la fréquence. Un signal périodique quelconque, comportant plusieurs fréquences (harmoniques), ne subira pas de distorsion. Chaque harmonique aura une célérité v identique.
Pour un milieu dispersif, γ dépend de la fréquence. Donc la célérité v en dépend aussi. Chaque harmonique aura une célérité différente et il y aura donc distorsion du signal.
2. Dans le domaine du visible, on appelle indice du milieu n (sans unité), la grandeur γ .

Les précédentes formules contenant c restent valables avec la célérité v (à la place de c) :

Définition de la longueur d'onde :

Relation de structure :

❖ **Spectre des ondes électromagnétiques dans le vide :**

Notre œil ne détecte qu'une infime partie des ondes électromagnétiques : le domaine visible **dans le vide** s'étend de 400nm à 800nm environ. Cela correspond à la bande passante de l'œil humain.

V. Polarisation d'une OEMPPH :A. Qu'est-ce que la polarisation d'une OEMPPH ?

On constate que les sources d'OEMPPH génèrent parfois des ondes dont le champ électrique \vec{E} possède une orientation particulière dans l'espace.

Définition de la polarisation :

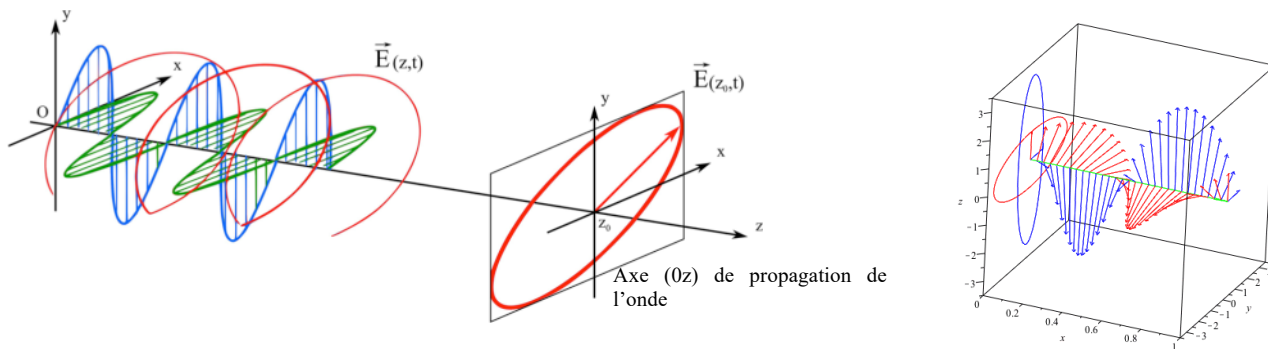
La polarisation d'une OEMPPH est définie à partir de son champ électrique \vec{E} , comme la **nature de la courbe décrite par l'extrémité de \vec{E} dans une surface d'onde** (plan perpendiculaire à la direction de propagation, par convention on prend un observateur qui reçoit l'onde).

Elle correspond à l'évolution de la direction du champ électrique \vec{E} au cours du temps.

B. OEMPPH polarisée elliptiquement :

Une OEMPPH est polarisée elliptiquement si dans une surface d'onde, l'extrémité du vecteur \vec{E} décrit une ellipse, au cours du temps.

La direction du champ électrique tourne au cours du temps et son amplitude varie entre deux valeurs.



C. OEMPPH polarisée circulairement :

Une OEMPPH est polarisée circulairement si dans une surface d'onde, l'extrémité du vecteur \vec{E} décrit un cercle, au cours du temps.

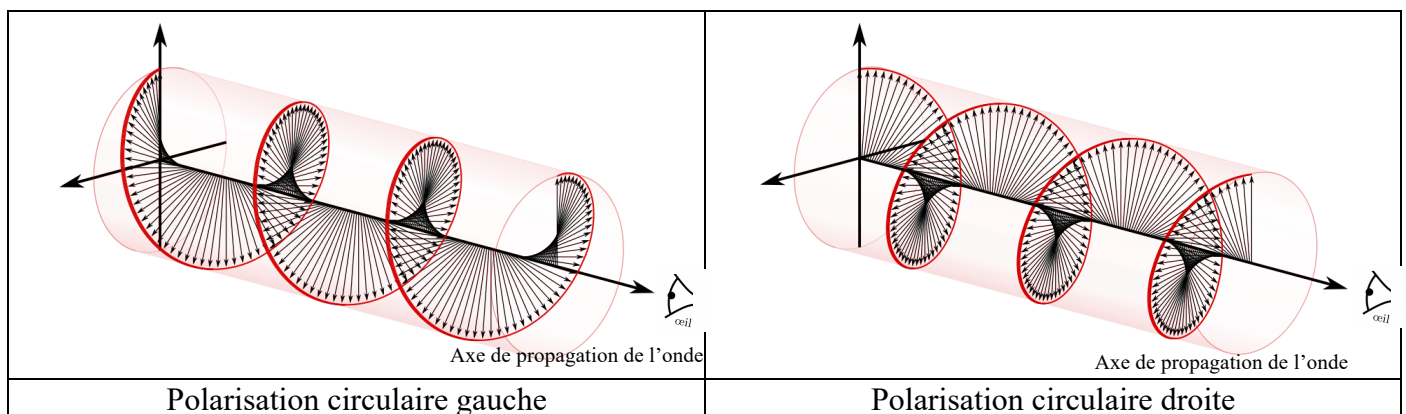
La direction du champ électrique tourne au cours du temps et son amplitude reste constante.

D. Polarisation circulaire/ elliptique droite ou gauche :

Il faut tout d'abord placer votre œil pour que l'onde vienne « dans votre œil ».

Une polarisation circulaire (ou elliptique) est qualifiée de **droite** lorsqu'on la voit tourner dans le **sens horaire** (donc vers la droite) lorsque l'onde nous vient dans l'œil.

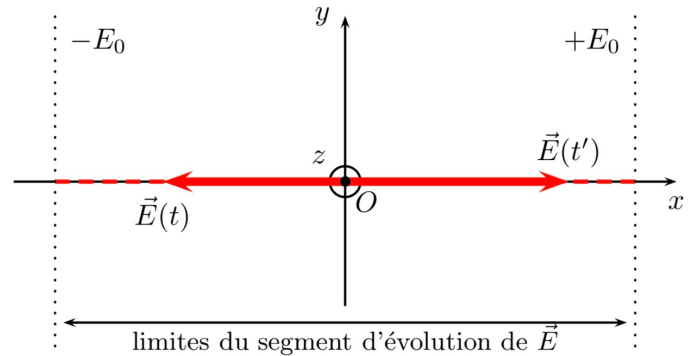
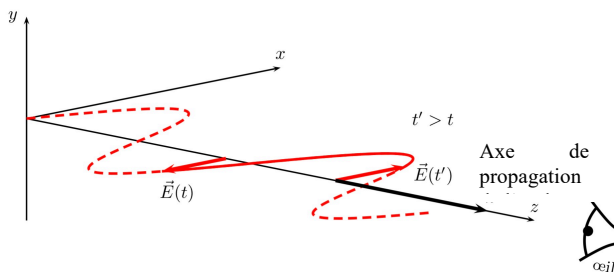
Au contraire, une polarisation circulaire (ou elliptique) est qualifiée de **gauche** lorsqu'on la voit tourner dans le **sens trigonométrique** (donc vers la gauche) lorsque l'onde nous vient dans l'œil.



E. OEMPPH polarisée rectilignement :

❖ Définition de l'onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement :

Une OEMPPH est polarisée rectilignement si \vec{E} garde une direction fixe dans l'espace.



E_0 : amplitude du champ électrique

A savoir :

Si, comme dans l'exemple ci-dessus, une OEMPPH est polarisée rectilignement selon l'axe (Ox), cela signifie que le vecteur champ électrique \vec{E} possède une seule coordonnée. Le vecteur \vec{E} est donc selon \vec{e}_x .

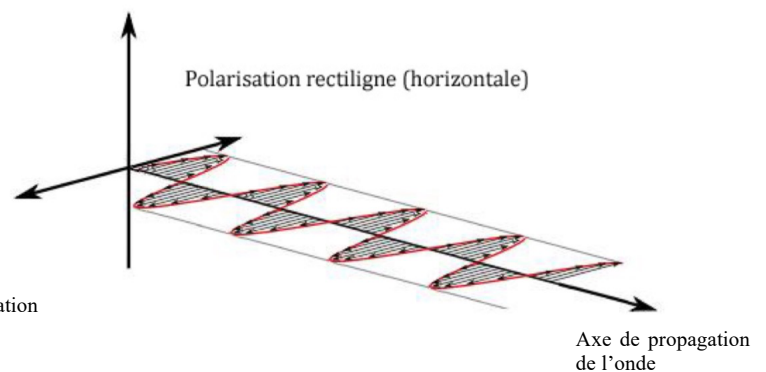
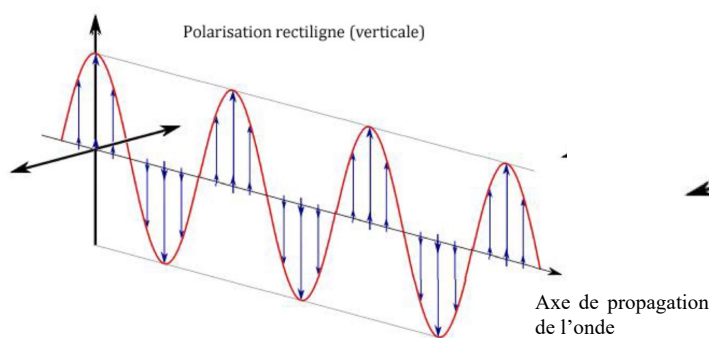
Polarisation d'une OEMPPHPR = direction et sens de \vec{E}

Intérêt de la polarisation rectiligne :

Une OEMPPH de polarisation elliptique quelconque peut toujours s'écrire comme la superposition de deux OPPM polarisées rectilignement suivant deux directions orthogonales.

L'OEMPPHPR forme « la brique » élémentaire de la théorie des ondes électromagnétiques.

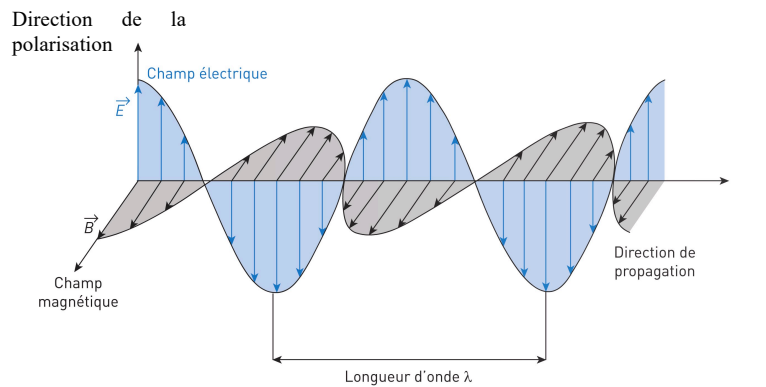
❖ Polarisation rectiligne verticale ou horizontale :



On parle de polarisation rectiligne **verticale** lorsque la direction du champ électrique \vec{E} est **perpendiculaire** au sol terrestre.

On parle de polarisation rectiligne **horizontale** lorsque la direction du champ électrique \vec{E} est **parallèle** au sol terrestre.

Illustration d'une OEMPPHR verticale :

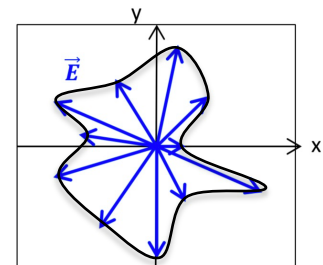
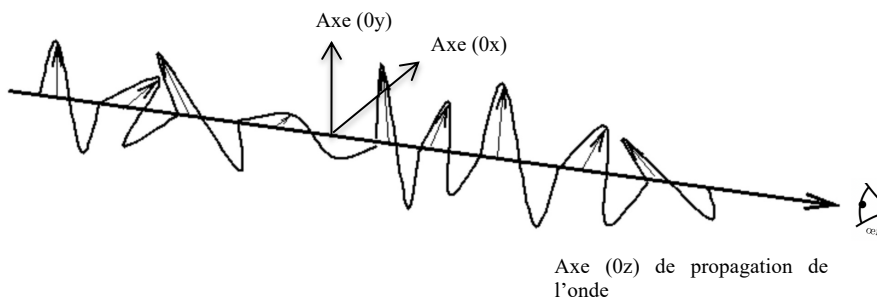


Ne pas confondre direction de propagation et direction de polarisation.

F. OEMPPH non polarisée :

La plupart des sources d'OEMPPH fournissent des ondes non polarisées.

Une OEMPPH est non polarisée si la direction et la valeur du champ électrique \vec{E} varie aléatoirement au cours du temps.

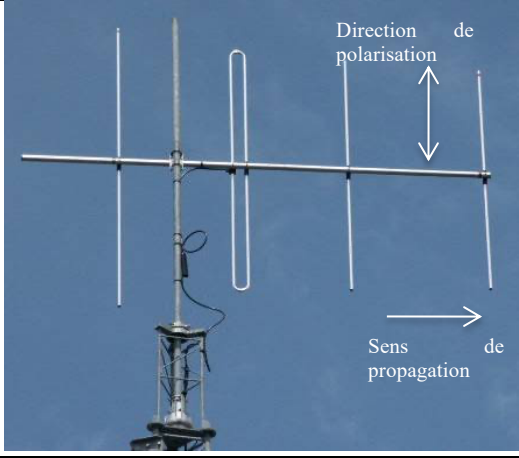
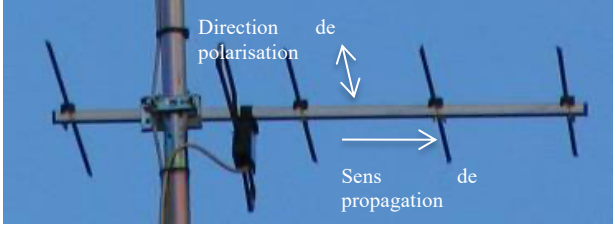

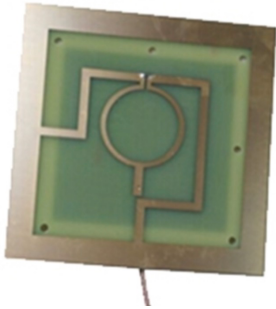


Représentation de \vec{E} sur une surface d'onde pour différents instants

La forme de la courbe décrite par l'extrémité du champ électrique \vec{E} dans une surface d'onde est dans ce cas, quelconque.

G. Polarisation des rayonnements et antennes :

Exemples de polarisation de rayonnements des différentes antennes :

Comment assurer une bonne liaison entre une antenne émettrice et une antenne réceptrice ?

Chapitre 11 - ce qu'il faut savoir :

- Connaître la définition d'une onde, d'une onde mécanique, d'une onde électromagnétique
- Connaître la différence entre le mot célérité et le mot vitesse
- Connaître la définition d'une onde transversale, longitudinale
- Connaître la définition d'une surface d'onde (ou plan d'onde, front d'onde)
- Connaître la définition d'une onde plane, sphérique
- Connaître la définition d'une onde progressive, stationnaire.
- Connaître l'expression littérale d'une OPPH
- Connaître la définition d'un milieu dispersif
- Connaître la formule liant la célérité d'une onde à la fréquence et la longueur d'onde
- Connaître la définition d'une OEM
- Savoir qu'une OEMP est transverse
- Savoir que l'œil n'est sensible qu'à une infime partie du spectre EM et connaître les limites en longueur d'onde dans le vide.
- Connaître des applications exploitant les phénomènes de polarisation des OEM.

Chapitre 11 - ce qu'il faut savoir faire :

- Savoir calculer une célérité à partir d'un décalage temporel et inversement
- Savoir identifier une onde transversale, longitudinale en justifiant
- Savoir identifier une onde plane, sphérique en justifiant
- Savoir identifier une onde progressive, stationnaire en justifiant
- Savoir mesurer une période spatiale ou une période temporelle
- Savoir calculer la célérité d'une onde à partir des périodes
- Savoir calculer le champ magnétique à partir du champ électrique pour une OEMPP
- Savoir calculer la célérité d'une OEMPPH dans un milieu
- Savoir distinguer les différents types de polarisation
- Savoir distinguer direction de polarisation et de propagation pour une OEMPPHPR