

Table des matières

Les lignes de transmissions

1	Ligne élémentaire théorique.....	5
1.1	Impédance caractéristique et vitesse de propagation	5
1.2	Constante de phase β	6
2	La propagation.....	6
2.1	Ligne ouverte en DC.....	6
2.2	Ligne en court-circuit.....	7
2.3	Les lignes fermées sur leur impédance caractéristique	7
2.4	Etude en régime sinusoïdal	8
2.4.1	Ligne ouverte.....	8
2.4.2	Ligne court-circuit.....	14
2.4.3	Ligne adaptée :	18
2.4.4	Ligne fermée sur une impédance quelconque.....	19

Les ondes électromagnétiques

1	Définition	21
2	Propriétés d'une onde électromagnétique.....	21
2.1	Réflexion : sur le sol ou objet métallique	22
2.2	La réfraction :.....	22
2.3	La diffraction.....	23
2.4	Les interférences	23
3	Caractéristiques d'une onde électromagnétique	24
3.1	Puissance	24
3.2	Polarisation d'une onde.....	24
3.3	Fréquence et longueur d'onde	24
3.4	Bruits dans les communications	24
3.5	Effets accompagnant les rayonnements électromagnétiques.....	25
4	Mode de propagations d'ondes hertziennes	25
4.1	Ondes de surface	25
4.2	Réflexion ionosphérique.....	25
4.3	Ondes d'espace.....	26
4.4	Dispersion troposphérique	26
5	Fréquences appropriées aux divers modes de propagation.....	27

Les antennes

1	Définitions	28
2	Rayonnement d'une antenne à grande distance	28
3	Notions de bases importantes	28
3.1	La polarisation d'une onde	28
3.2	Densité de puissance de rayonnement p_r	29
3.3	Puissance de rayonnement d'une onde.	29
3.4	Le diagramme de rayonnement	30
4	L'antenne résonnante	30
4.1	L'effet de sol	31
5	Les paramètres importants d'une antenne	31
5.1	Résistance de l'antenne.....	31
5.2	Impédance d'une antenne	32
5.3	La bande passante d'une antenne	32
5.4	Largeur du faisceau ou angle d'ouverture	33
5.5	Le gain de directivité de l'antenne	33
5.6	Gain de puissance d'une antenne	33
5.7	Longueur d'onde effective d'une antenne.....	33
5.8	Hauteur effective d'une antenne	34
6	Critère d'une liaison en visibilité	34
7	Différents modèles d'antennes.....	35
7.1	Le dipôle replié	35
7.2	Antenne avec éléments passifs, antenne Yagi	35
7.2.1	Antenne de Yagi.	35
7.3	Antenne en hélice.....	36
7.4	Antennes paraboliques.....	36
8	Quelques informations sur les satellites de télécommunications.....	36
8.1	Types satellites.	36
8.2	Orbites et couverture	36
8.3	Techniques d'accès multiple	37
8.3.1	AMRF : Accès Multiple à Répartition en Fréquence	37
8.3.2	AMRT : Accès Multiple à Répartition en Temps.....	37
8.3.3	AMRC : Accès Multiple à Répartition par Code.....	38

Le bruit thermique

1	Introduction.....	40
2	Caractéristiques.....	40
3	Facteur de bruit et température de bruit	41
3.1	Bilan de liaison.....	42
3.1.1	Atténuation d'espace	42

Les guides d'ondes

1	Rappel : la propagation des onde électromagnétiques	44
1.1	Les ondes planes.....	44
1.2	Polarisation des ondes.....	44
2	Ondes électromagnétiques au voisinage d'un conducteur parfait.....	44
3	Réflexion des ondes électromagnétique planes	45
4	Définition	45
4.1.1	Avantages	46
4.2	Inconvénients	46

Les fibres optiques

1	Introduction.....	47
2	Rappel de quelques lois d'optique géométrique.	47
2.1	La réflexion de la lumière (Lois de Huygens).....	47
2.2	Réfraction de la lumière (Loi de Snell-Descartes)	48
2.3	Angle limite de réfraction et réflexion totale.	48
3	Pourquoi utiliser les fibres optiques	50
4	Constitution des fibres optiques	50
4.1	Structure de base d'une fibre optique	51
4.2	Revêtement de la fibre	51
4.3	Atténuation dans les fibres.....	51
4.4	Quelques mots sur la dispersion modale	52
4.5	Types de fibres optiques.....	53
4.6	Différences de transfert d'une même impulsion dans chaque type de fibres.....	54
4.7	Comparaison de performance entres les types de fibres	55
5	Ouverture numérique (ON).....	56
6	Vitesse de déplacement dans la fibre	57
7	Complément sur les sources d'atténuation dans les fibres	59

8	Sectionnement et connectique des fibres	59
8.1	Pertes entre deux fibres différentes.....	59
8.2	Comment sectionner une fibre correctement ?.....	59
8.3	Comment souder deux fibres ensembles ?	59
8.4	S'assurer d'un bon alignement.....	60
8.5	Terminaison des fibres	60
8.6	Les connecteurs pour fibres optiques	60
8.6.1	Type de connecteurs	60
8.7	Dispositifs associés	60
8.7.1	WDM (Wavelength Division Multiplexing = Multiplexage de longueur d'onde)	60

Les lasers

1	Introduction.....	62
1.1	Quelques mots sur l'étude du faisceau laser	62
1.1.1	Opération sur les faisceaux	62
1.1.2	La Cohérence	63

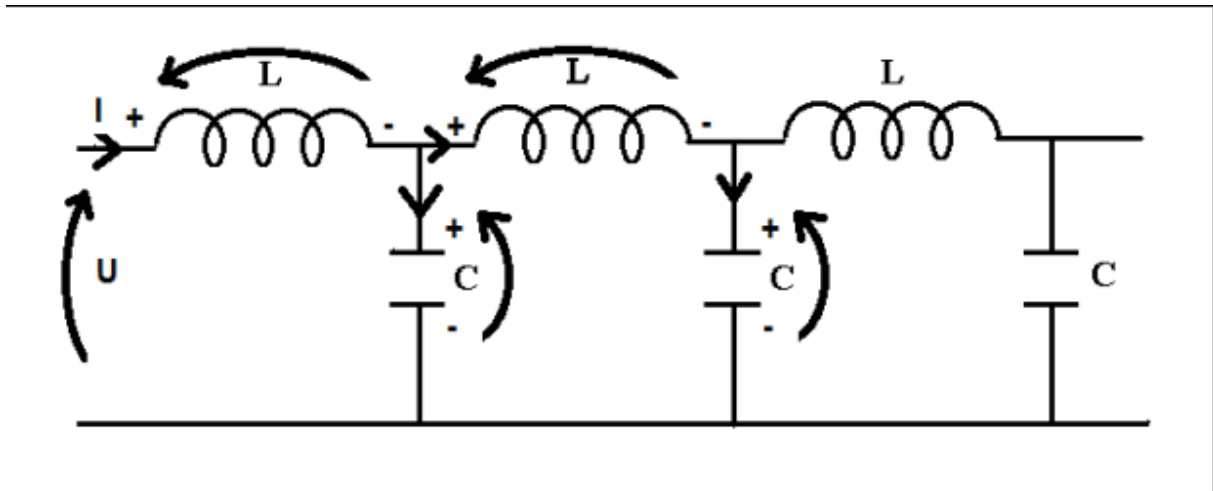
Les lignes de transmissions

La **capacité** s'exprime par une unité de longueur : C en Farad/mètre (F/m) (Elle s'établit entre la surface des 2 conducteurs)

L'**inductance** s'exprime par une unité de longueur : L en Henry/mètre (H/m) (Chaque conducteur se comporte comme une bobine)

1 Ligne élémentaire théorique

Caractéristiques des lignes :



Si l'on applique une tension U au début de la ligne, un courant i va prendre naissance et charger.

La tension U est donc transmise grâce à ces différentes charges successives des condensateurs.

1.1 Impédance caractéristique et vitesse de propagation

$$\begin{aligned} & \text{Inductance } L: \quad u = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \\ & \text{Capacité } C: \quad i = C \frac{\Delta u}{\Delta t} \end{aligned}$$

Vitesse de propagation dans la ligne :	$v = \frac{1}{\sqrt{L.C}}$
----------------------------------------	----------------------------

$$\text{Impédance caractéristique de la ligne : } Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

1.2 Constante de phase β

On définit la constante de phase comme étant le rapport soit entre le déphasage et la longueur parcourue dans la ligne soit le rapport entre la pulsation du signal et la vitesse de propagation dans la ligne :

$$\beta = \frac{\alpha}{l}$$

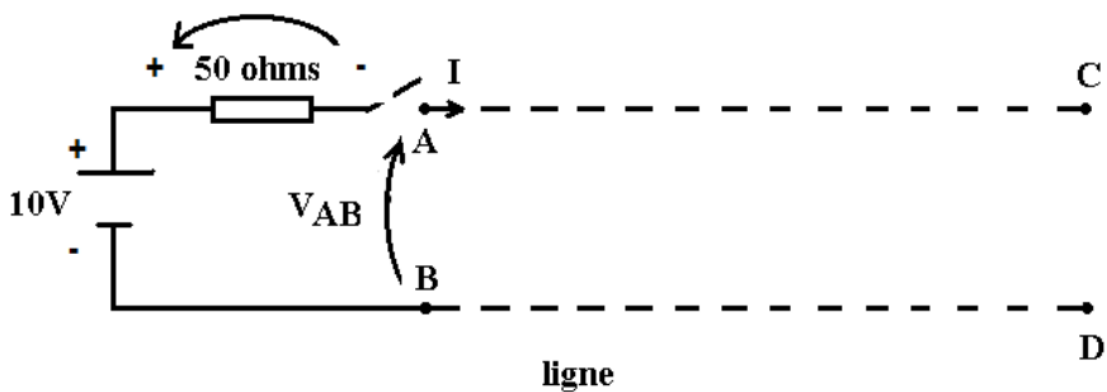
$$\beta = \frac{\omega}{v}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f \text{ ou } 2\pi / t$$

2 La propagation

Etude de la propagation d'une onde (**onde incidente**) dans une ligne **finie**

2.1 Ligne ouverte en DC



$$V_{AB} = 5V.$$

$$I = 0,1A.$$

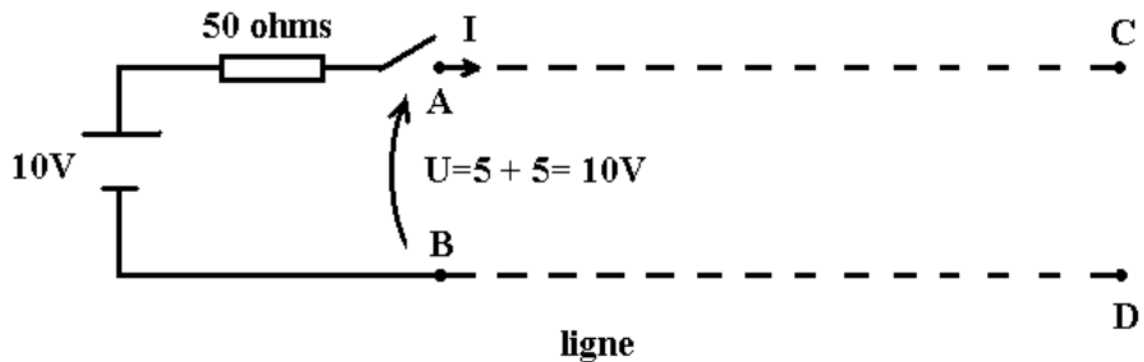
La tension et le courant se propagent jusqu'à la fin de la ligne = **Onde incidente**

Aucun courant ne peut circuler entre **C** et **D** → **I = 0A** à la sortie.

L'énergie envoyée par la source ne peut donc pas se dissiper et donc se réfléchir. **L'onde incidente** et **l'onde réfléchie** vont donc se combiner.

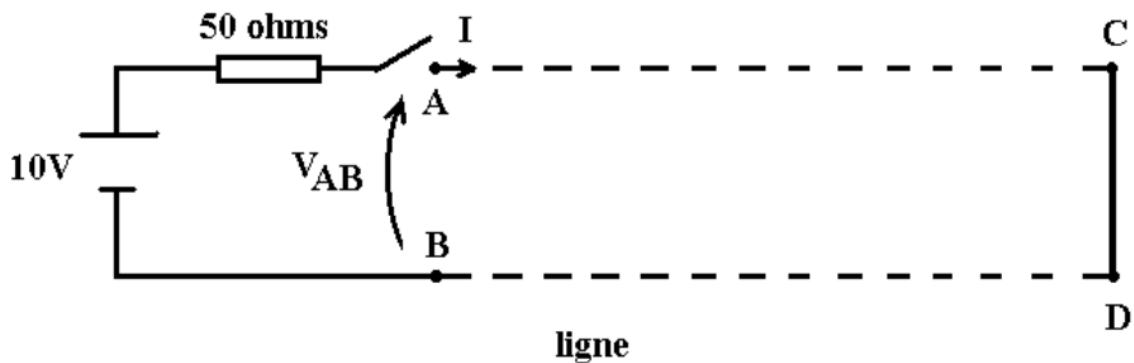
Donc $\rightarrow U+U$ et $I+(-I)$

Donc : $2U$ et $0I$



2.2 Ligne en court-circuit

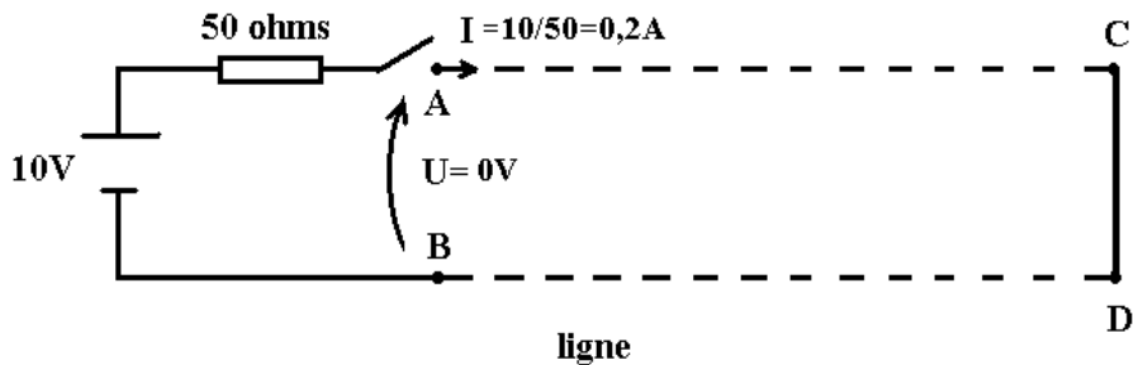
Même chose que précédemment mais maintenant **C et D** sont reliées.



A la fermeture de l'interrupteur, l'onde incidente rencontre un court-circuit.

Cette fois ci encore, une onde réfléchie va prendre naissance mais elle sera déphasée de 180° .

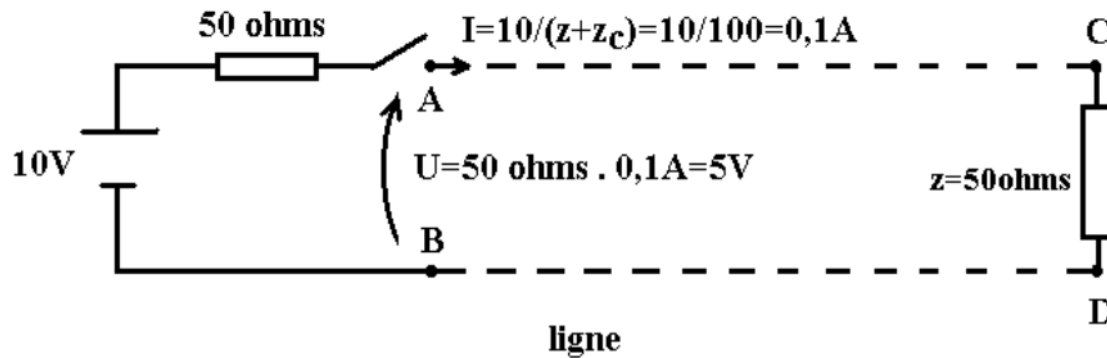
Donc : $I+I = 2I$ & $U+(-U) = 0U$



2.3 Les lignes fermées sur leur impédance caractéristique

Ce type de ligne est appelée **Ligne Adaptée**

Plaçons une impédance z entre **C** et **D** qui à la même impédance que la ligne donc **50ohms**.



L'énergie transférée par l'onde incidente est entièrement dissipée dans l'impédance de 50ohms → pas d'onde réfléchie.

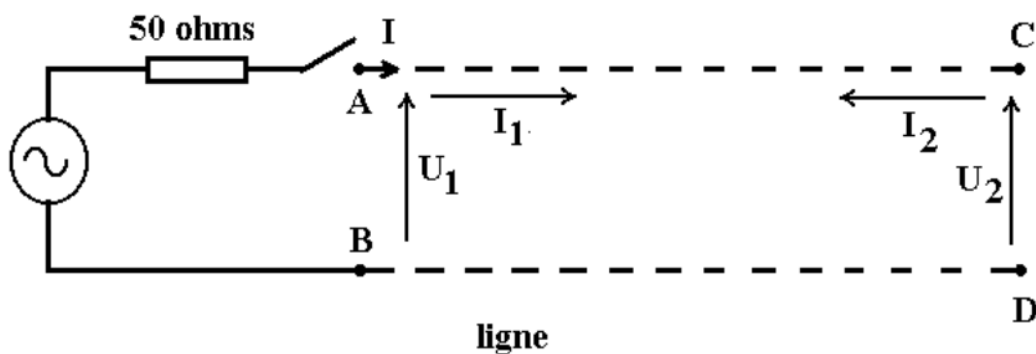
Si $Z \neq Z_c$ On aurait une onde réfléchie d'amplitude différente de l'onde incidente.

2.4 Etude en régime sinusoïdal

En régime continu, lors de la mise sous tension, une tension fixe s'établit après une onde incidente et éventuellement une onde réfléchie si la ligne n'est pas adaptée.

En régime **sinusoïdal** nous représentons les courants et tension dans la ligne.

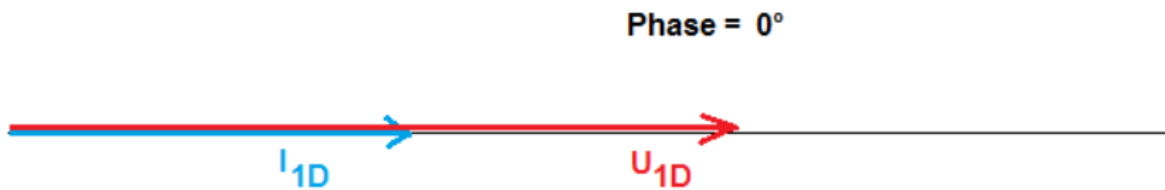
2.4.1 Ligne ouverte



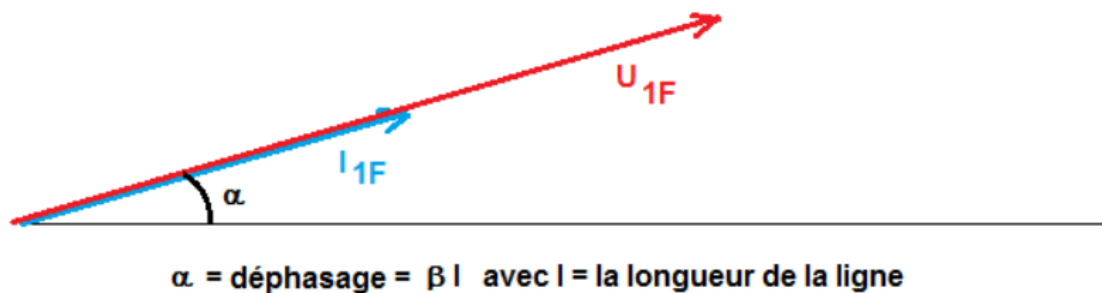
U_i et I_1 : onde incidente U_2 et I_2 : onde réfléchie

- Pour l'onde incidente

- **En AB** : l'onde incidente est une sinusoïde qui se propage dans la ligne à la vitesse v .

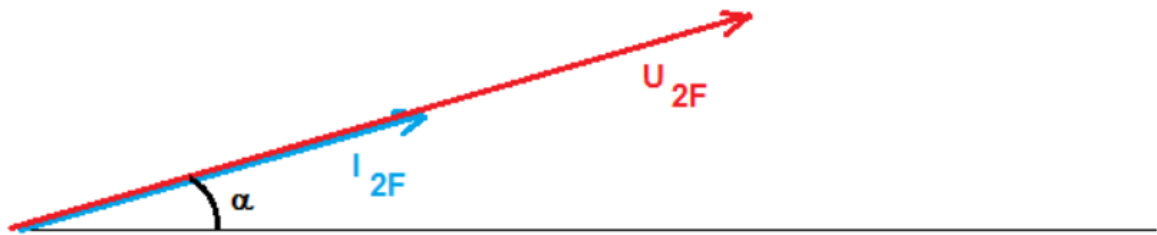


- **En CD** : L'onde incidente arrive à la fin de la ligne en présentant un certain déphasage par rapport à l'onde incidente en AB. Ce déphasage est fonction de la longueur de la ligne ($\alpha = \beta \cdot l$), de la vitesse de propagation v et de la fréquence du signal : $\beta = \omega/v$



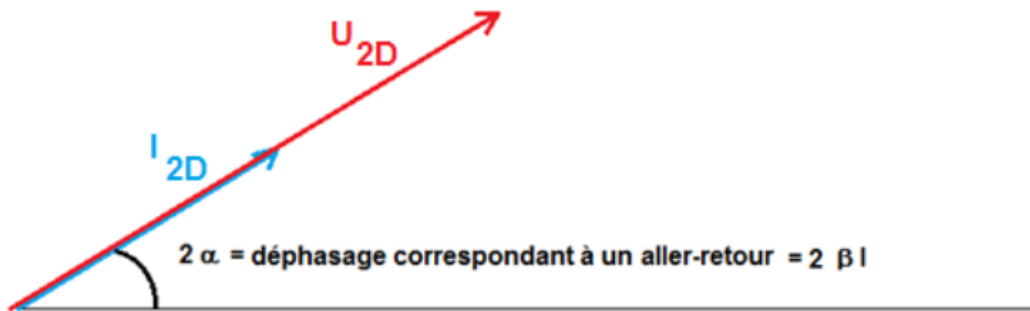
- **Pour l'onde réfléchie**

- **En CD :** L'onde incidente est réfléchie sans changement de phase de 180° .
Soit U_{2F} et I_{2F} l'onde réfléchie à la fin de la ligne.



$$\alpha = \text{déphasage} = \beta l \text{ avec } l = \text{la longueur de la ligne}$$

- **En AB :** l'onde réfléchie est également déphasée par rapport à la fin de la ligne ; le déphasage est identique au déphasage enregistré par l'onde incidente au point CD.

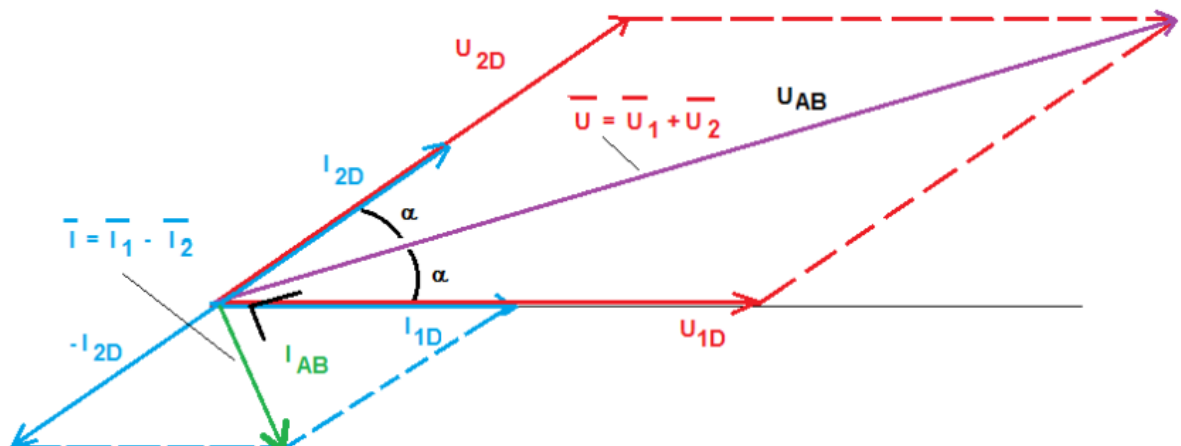


$$2\alpha = \text{déphasage correspondant à un aller-retour} = 2\beta l$$

Résultante : onde stationnaire

En tout point de la ligne, l'onde incidente et l'onde réfléchie s'additionne vectoriellement :

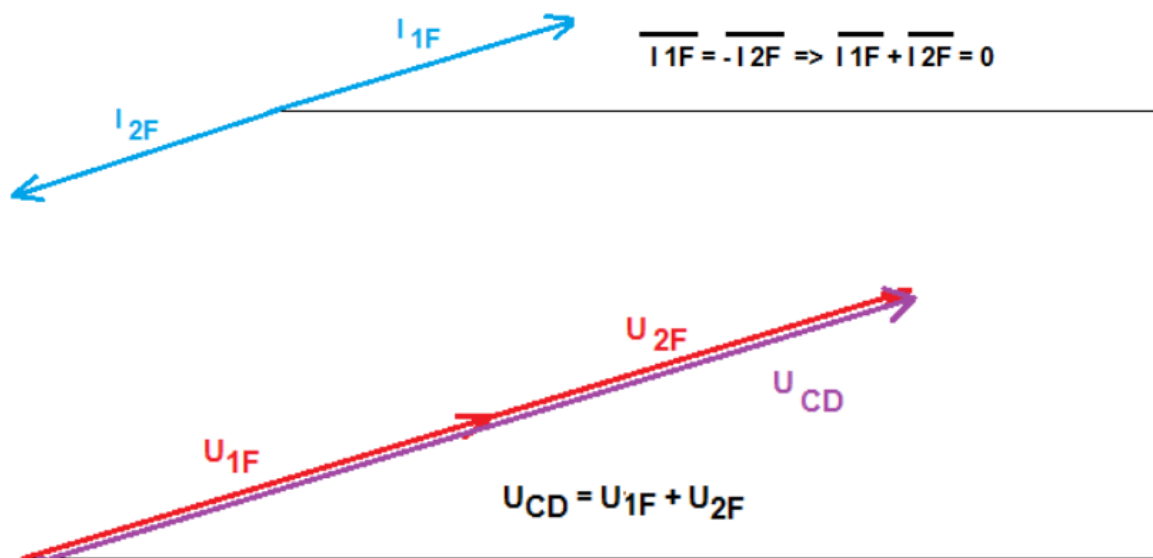
- Résultante en AB :



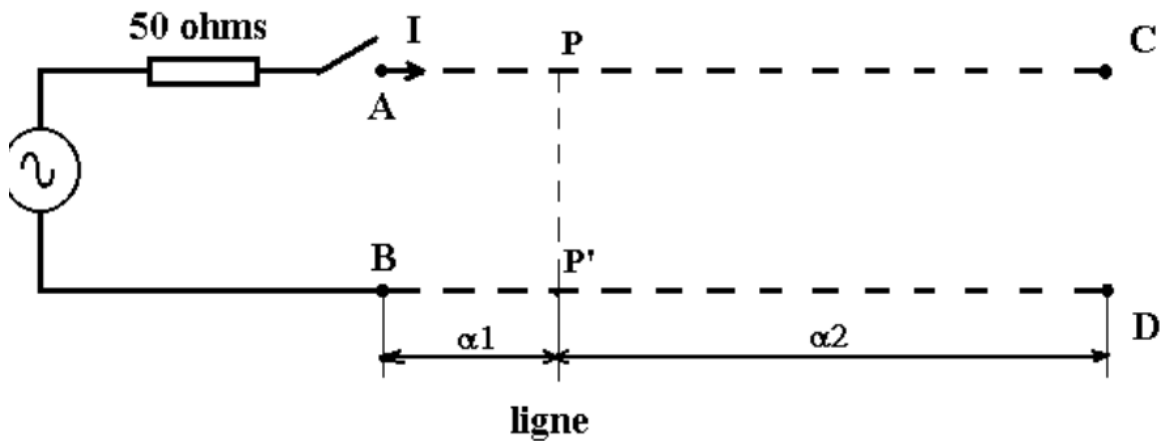
Un déphasage de 90° apparaît entre la tension et le courant.

Il n'existe pas de résistance de charge dans la ligne et donc toute l'énergie est renvoyée et non dissipée, exactement comme dans le cas d'un condensateur ou d'une bobine.

- Résultante en CD :



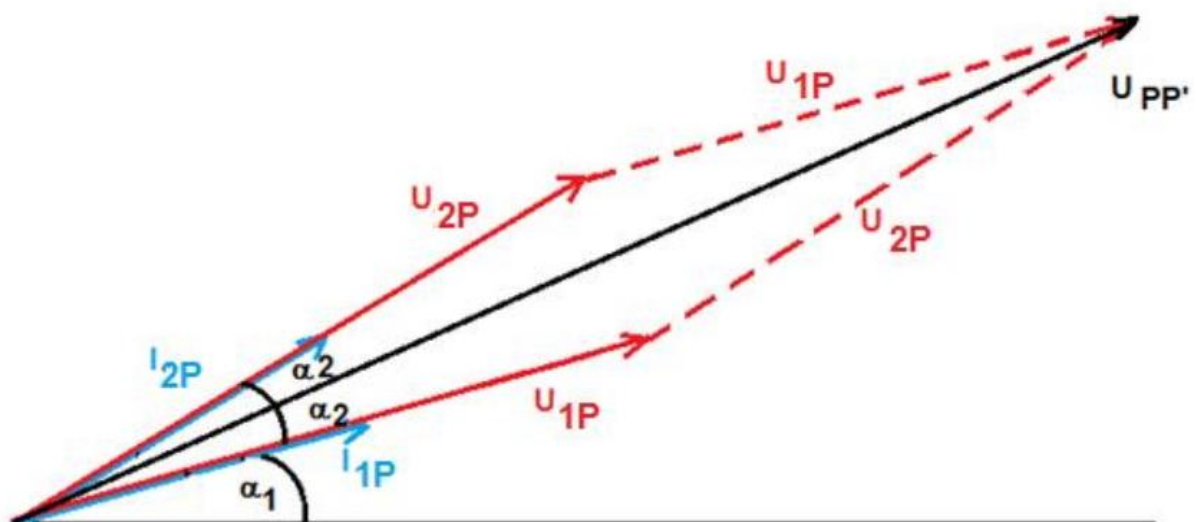
- Résultante en un point quelconque de la ligne :



Représentons la résultante au point PP'. Soit α_1 le déphasage de l'onde incidente en PP' par rapport à cette onde au point AB et α_2 le déphasage entre l'onde incidente en CD par rapport à cette onde en PP'.

$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha$ (avec α : déphasage entre AB et CD).

Soit U_1 : l'onde incidente en PP' et U_2 : l'onde réfléchie en PP'.



$0^\circ < \alpha_2 < 360^\circ$ en fonction de la position des points quelconques PP'.

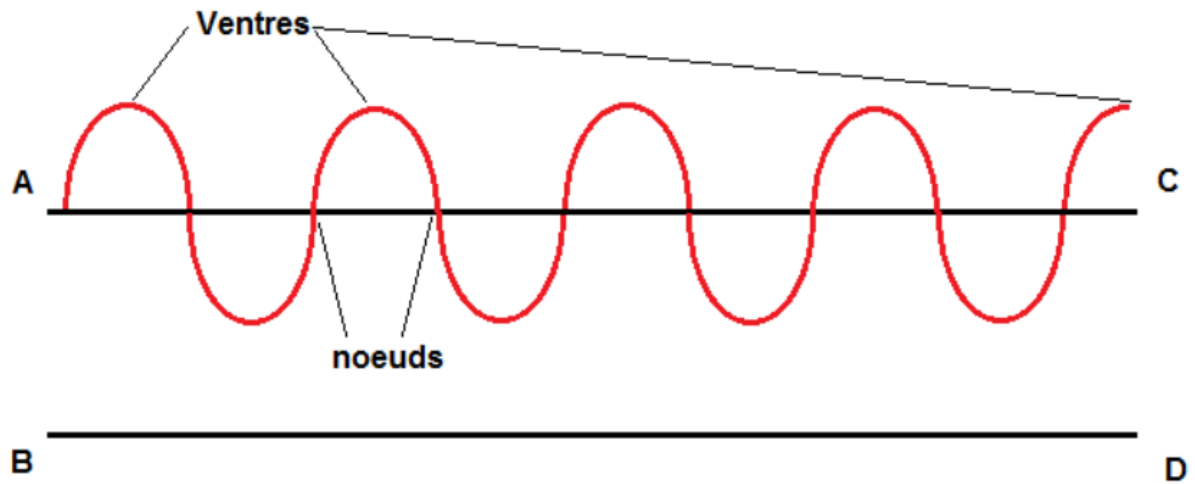
La tension résultante est également un vecteur tournant déphasé de α ($\alpha = B.l$) présentant une amplitude fonction de la position des points quelconques PP'.

Cette amplitude est :

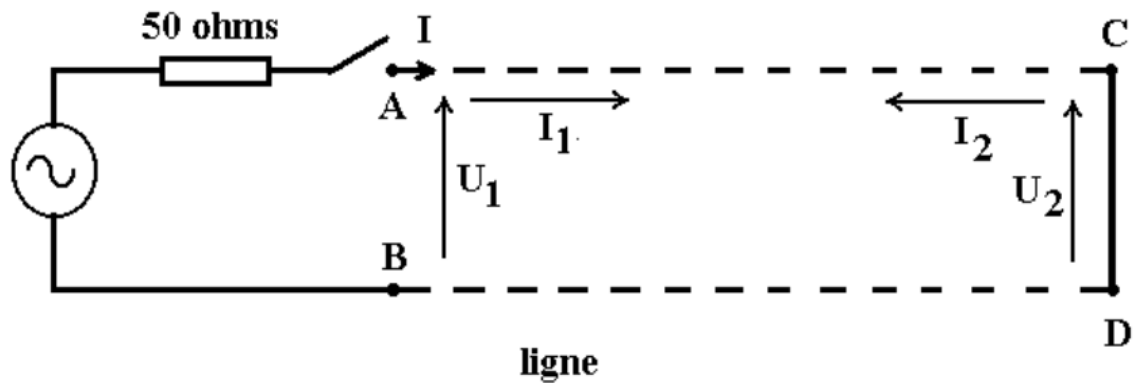
- **Nulle** pour $\alpha_2 = 90^\circ$ ou 270° ; ces points sont appelés : **nœuds**.
- **Maximale** : pour $\alpha_2 = 0^\circ$ ou 180° ; ces points sont appelés **ventres**.

En CD, dans le cas d'une ligne ouverte on a un **ventre**

Représentation de la tension :

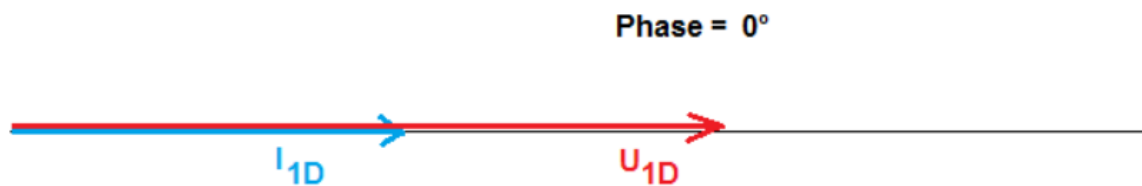


2.4.2 Ligne court-circuit

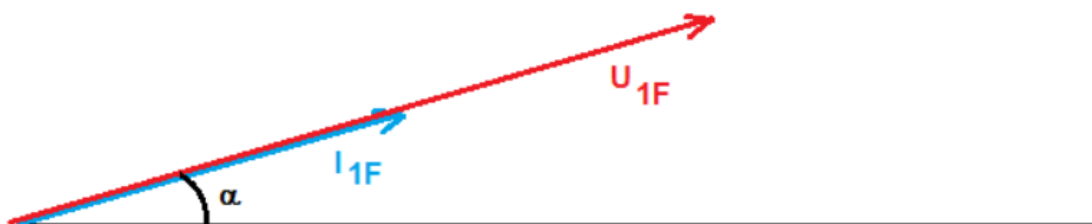


- **Pour l'onde incidente :**

- **En AB :** l'onde incidente est une sinusoïde qui se propage dans la ligne à la vitesse v . Soit I_{1D} et U_{1D} l'onde incidente au début de la ligne.
- **En CD :** l'onde incidente arrive à la fin de la ligne en présentant un certain



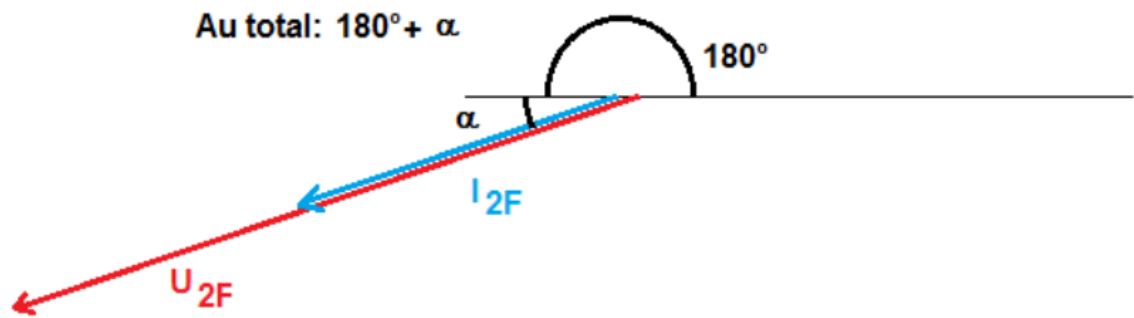
déphasage par rapport à l'onde incidente en AB. Ce déphasage est fonction de la longueur de la ligne ($\alpha = \beta \cdot l$), de la vitesse de propagation v et de la fréquence du signal : $\beta = \omega/v$. Soit U_{1F} et I_{1F} l'onde incidente en CD



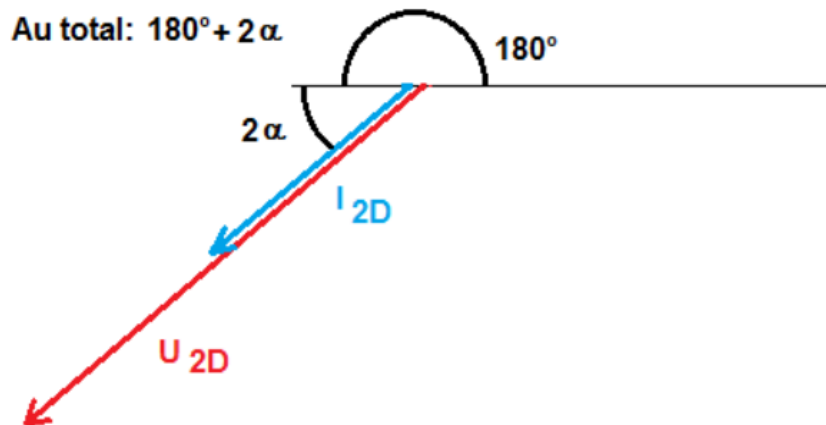
$\alpha = \text{déphasage} = \beta l$ avec l = la longueur de la ligne

- **Pour l'onde réfléchi.**

- **En CD :** l'onde incidente est réfléchi avec un déphasage de 180° . Soit U_{2F} et I_{2F} l'onde réfléchi en fin de ligne.



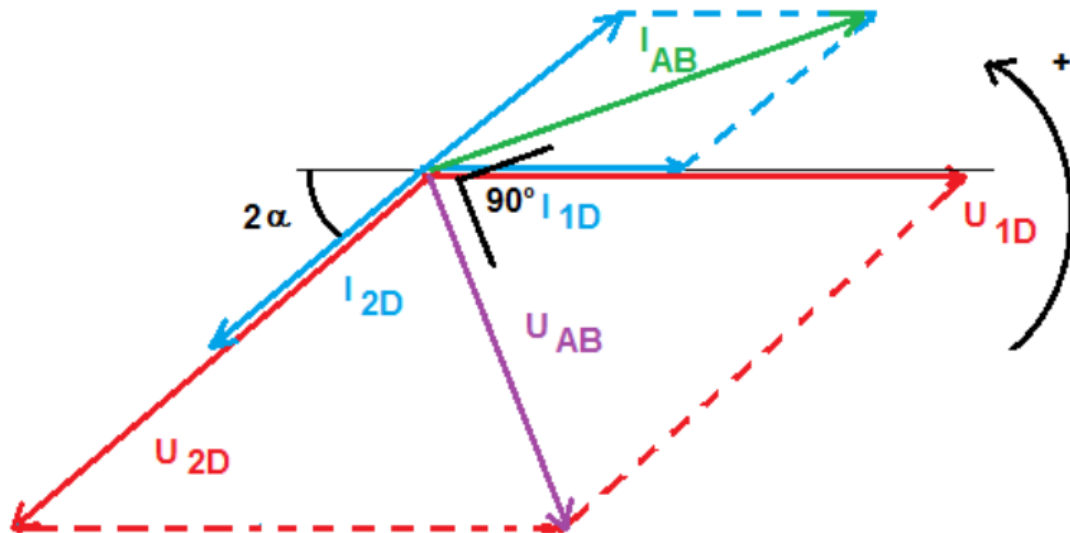
- **En AB :** l'onde réfléchi est également déphasée par rapport à la fin de la ligne ; le déphasage est identique au déphasage enregistré par l'onde incidente au point CD. Soit U_{2D} et I_{2D} , l'onde réfléchi en AB



❖ **Résultante : onde stationnaire**

En tout point de la ligne, l'onde incidente et l'onde réfléchie s'additionnent vectoriellement :

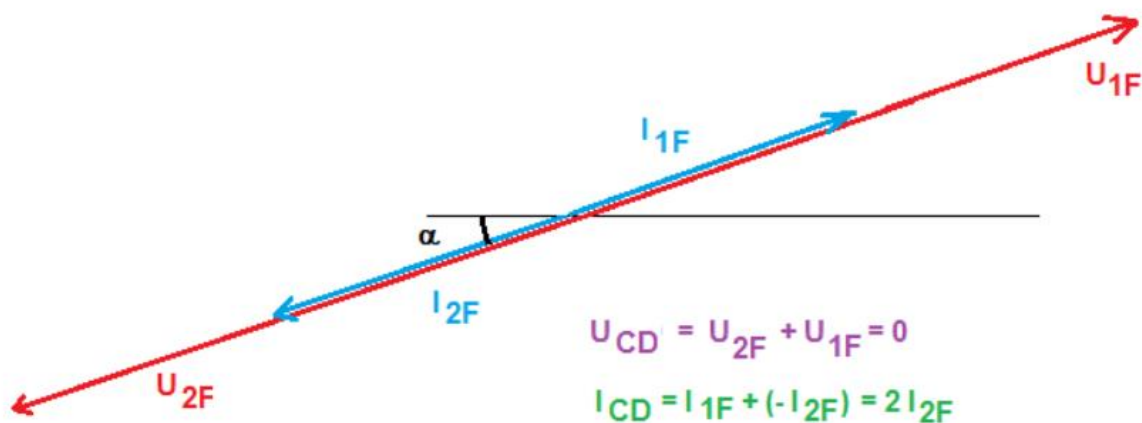
- **Résultante en AB :**



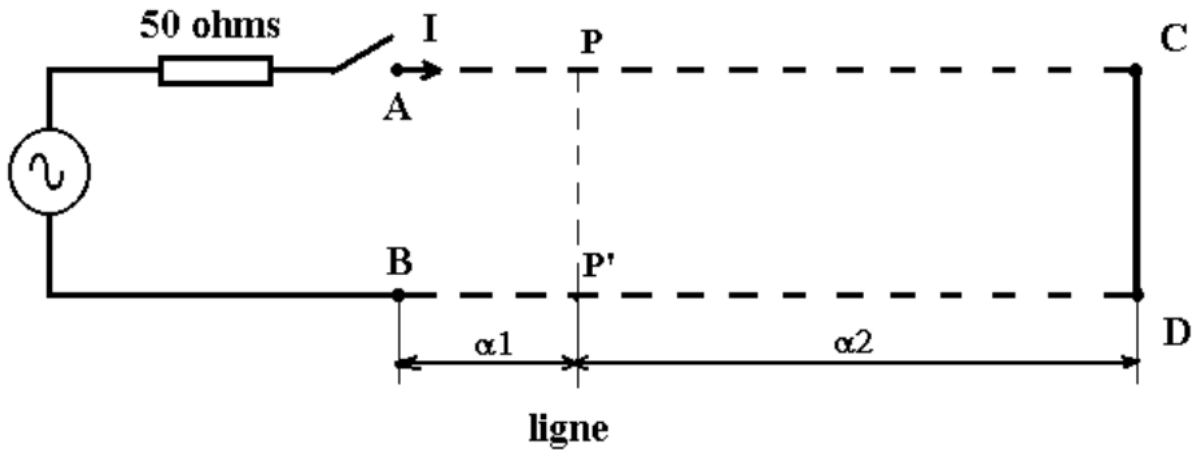
Réaction identique à la ligne ouverte :

Un déphasage de 90° apparaît entre la tension et le courant \rightarrow la ligne se comporte vis-à-vis du générateur comme un élément passif de type capacitif ou selfique et ce en fonction de la longueur de la ligne. En effet ; il n'existe pas de résistance de charge dans la ligne et donc toute l'énergie est renvoyée et non dissipée, exactement comme dans le cas d'un condensateur ou d'une bobine.

- **Résultante en CD :**



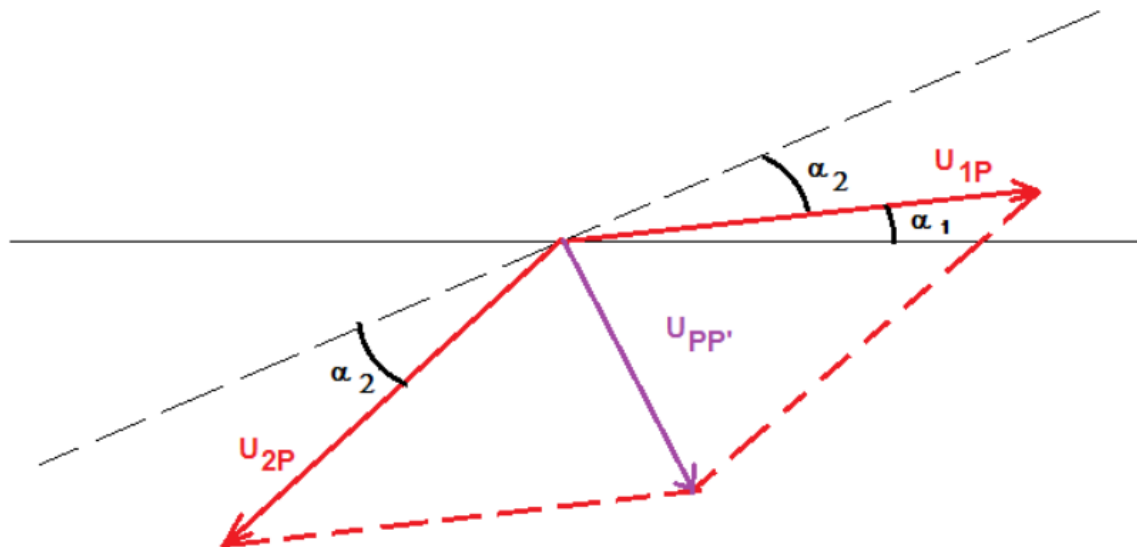
- Résultante en un point quelconque de la ligne :



Représentons la résultante au point PP'. Soit α_1 le déphasage de l'onde incidente en PP' par rapport à cette onde au point AB et α_2 le déphasage entre l'onde incidente en CD par rapport à cette onde en PP'.

$\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha$ (avec α : déphasage entre AB et CD).

Soit U_1 : l'onde incidente en PP' et U_2 : l'onde réfléchie en PP'.



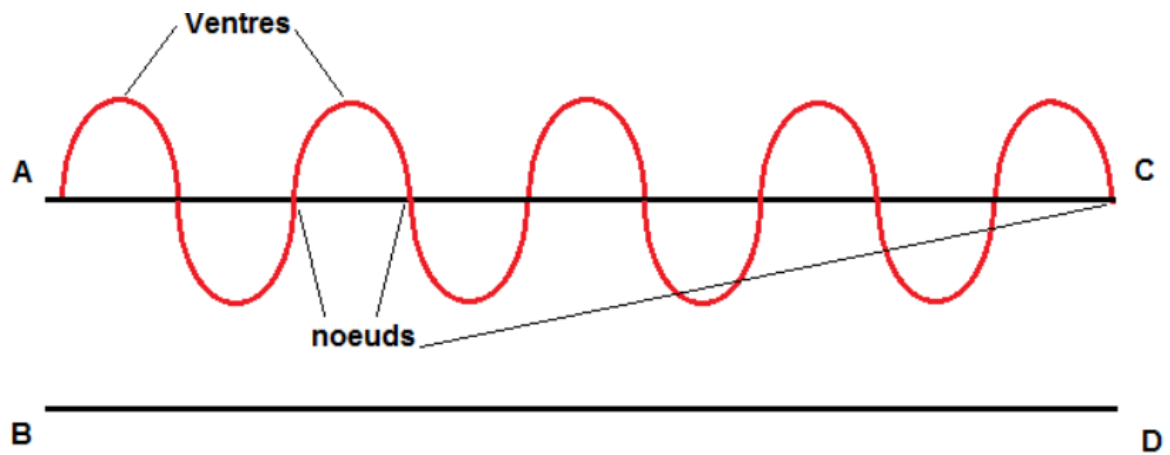
$0^\circ < \alpha_2 < 360^\circ$ en fonction de la position des points quelconques PP'.

La tension résultante est également un vecteur tournant déphasé de α ($\alpha = B.l$) présentant une amplitude fonction de la position des points quelconques PP'.

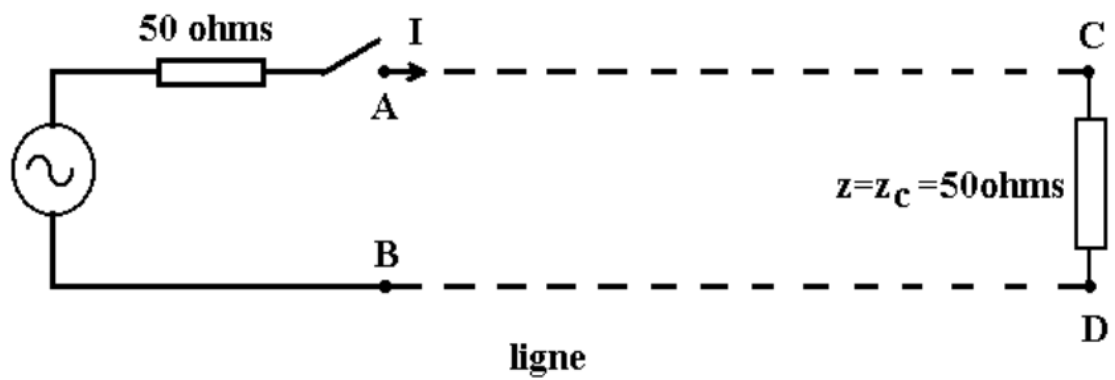
Cette amplitude est :

- ❖ **Maximale** : pour $\alpha_2 = 90^\circ$ ou 270° ; ces points sont les ventres
- ❖ **Nulle** : pour $\alpha_2 = 0^\circ$ ou 180° ; ces points sont appelés nœuds

Résultante de la tension :



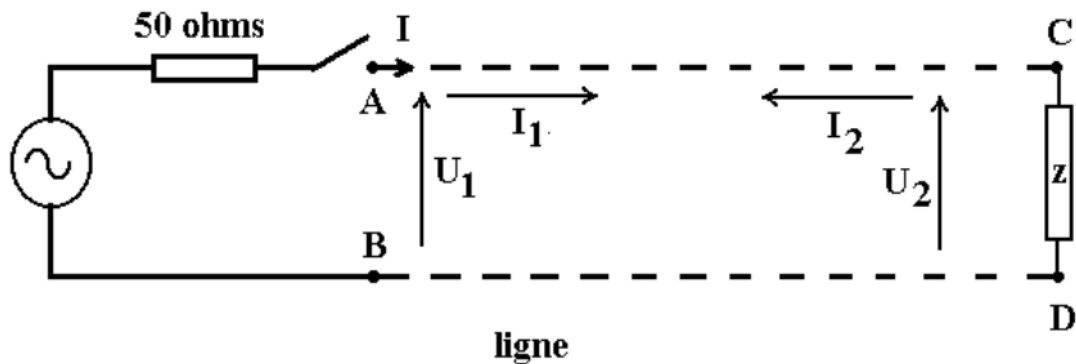
2.4.3 Ligne adaptée :



Il n'y a pas d'onde réfléchie car l'énergie est totalement dissipée dans l'impédance → pas d'onde stationnaire

2.4.4 Ligne fermée sur une impédance quelconque

Impédance quelconque différente de Z_c



Dans ce cas, une fraction de l'onde incidente est réfléchiée avec ou sans déphasage de 180° respectivement pour une impédance inférieure ou supérieure à l'impédance caractéristique Z_c .

$$U_1 = z_c I_1$$

$$\overline{U_1} + \overline{U_2} = \overline{z} \cdot (\overline{I_1} + \overline{I_2}) \text{ loi d'Ohm en CD}$$

L'onde incidente et l'onde réfléchiée s'additionne en chaque point de la ligne → naissance d'une **onde stationnaire**.

- ❖ Un maximum de $U_1 + U_2$ = un ventre
- ❖ Un minimum de $|U_1 - U_2|$ = un nœud quand $|U_1| = |U_2|$

2.4.4.1 Le taux d'onde stationnaire

C'est le rapport entre la somme des amplitudes des tensions incidente et réfléchiée sur la différence de ces deux amplitudes :

$$T.O.S = \frac{|U_1| + |U_2|}{|U_1| - |U_2|}$$

Le taux d'onde stationnaire peut également être défini en fonction de l'impédance z sur laquelle la ligne est fermée et de l'impédance caractéristique Z_c .

$$t.o.s. = \frac{Z_c}{z} \quad \text{si } Z_c > z$$

$$t.o.s. = \frac{z}{Z_c} \quad \text{si } Z_c < z$$

2.4.4.2 *Le facteur de réflexion*

C'est le rapport entre la tension réfléchie et la tension incidente

$$K = \frac{U_2}{U_1}$$

K peut également s'exprimer en fonction des impédances :

$$K = \frac{Z - Z_C}{Z + Z_C}$$

Les ondes électromagnétiques

1 Définition

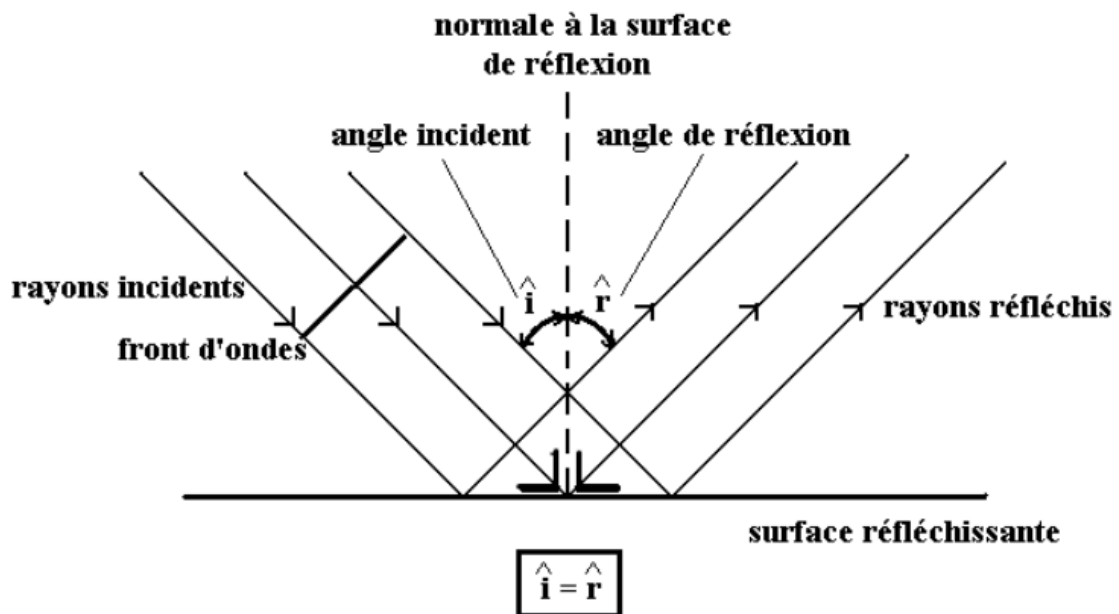
Une onde électromagnétique est composée d'un champ électrique (E) couplé un champ magnétique (H) placé dans un plan perpendiculaire au plan de E, et variant dans le temps.

La vitesse de propagation est définie par C (célérité) et est = **3.10^8 m/s** dans une direction perpendiculaire à celle des lignes de champs électrique et magnétique.

2 Propriétés d'une onde électromagnétique

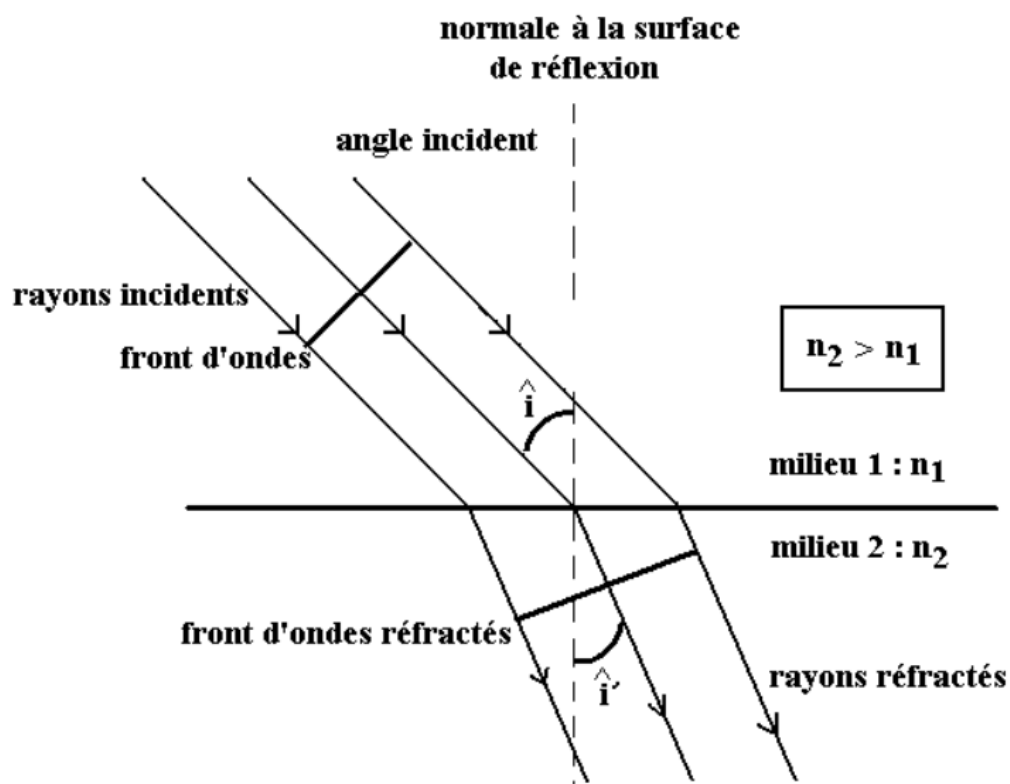
- Vitesse dans l'espace : **$C = 3.10^8$ m/s**
- Vitesse dans un milieu homogène autre que l'espace, d'indice de réfraction n : **$v=C/n$**
Remarque : l'indice n de l'atmosphère est proche de 1 $\rightarrow v = C$
- L'onde électromagnétique s'annule en certains moments et est plus intense à d'autres moment, lorsqu'elle se propage dans l'espace, les points d'intensités nulle ou maximum seulement se déplacent. On parle de **front d'onde**.
- Elles peuvent subir le phénomène d'interférence.
- Dans un milieu homogène, une onde électromagnétique se déplace en ligne droite. Si le milieu n'est pas homogène, l'onde subit le phénomène de réfraction.
- L'onde électromagnétique possède les propriétés optiques suivantes :
 - **Réflexion**
 - **Réfraction**
 - **Diffraction**

2.1 Réflexion : sur le sol ou objet métallique



2.2 La réfraction :

Une onde est réfractée lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction n est différent.

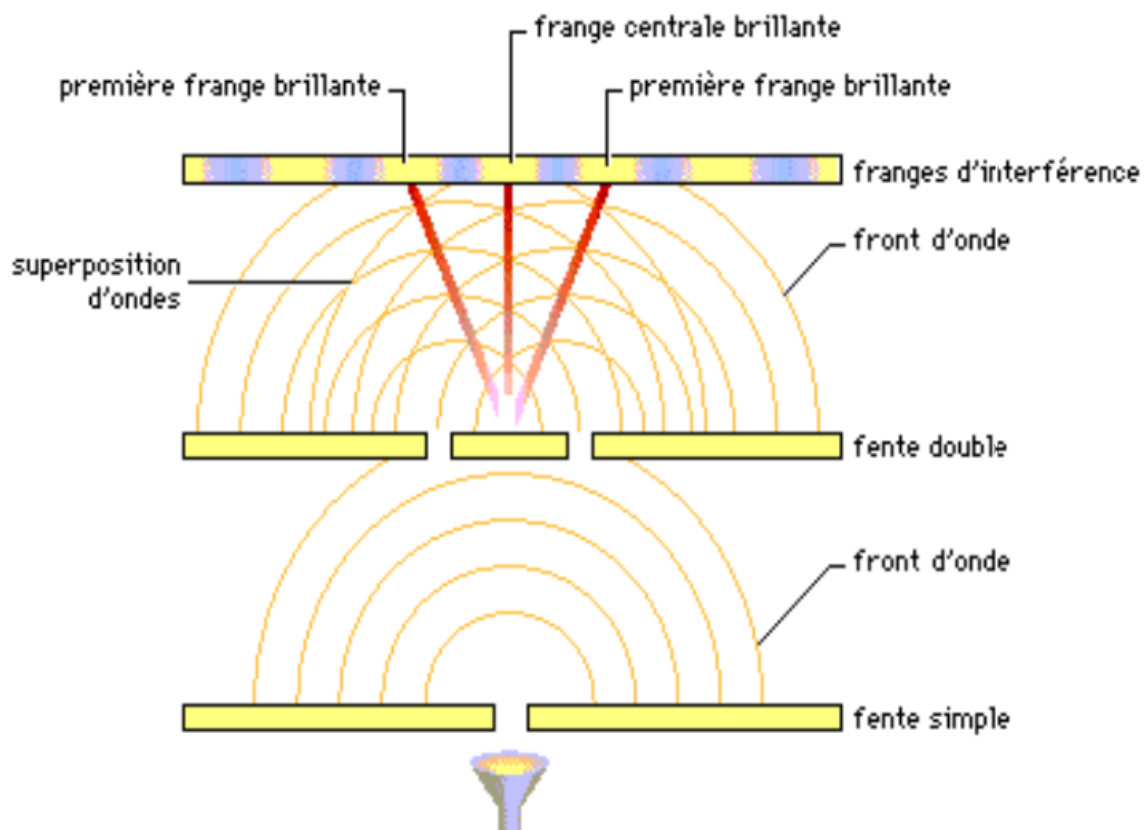


Loi de **SNELL – DESCARTES** :

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{i}'} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2}$$

2.3 La diffraction

Il y a diffraction lorsqu'un front d'ondes rencontre un obstacle qui comporte un infime orifice. Cet orifice se comporte comme une nouvelle source d'ondes.



2.4 Les interférences

Deux sources identiques rayonnent dans un endroit donné. L'addition des deux ondes peut se renforcer ou s'atténuer (voire s'annuler) selon qu'elles sont en phase, déphasées ou en opposition de phase → Il existe des zones où l'onde est inexistante et des zones où l'onde est renforcée.

3 Caractéristiques d'une onde électromagnétique

3.1 Puissance

L'onde électromagnétique est une énergie de rayonnement, on parle de puissance de rayonnement.

L'énergie de rayonnement est distribuée sur une sphère virtuelle de centre S (source).

Puissance de rayonnement :

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi r^2}$$

* P_t est la puissance de rayonnement à la source.

3.2 Polarisation d'une onde

La **polarisation** d'une onde est le plan dans lequel varie le **champ électrique**.

Remarque :

- Une onde incidente au sol est réfléchiée en polarisation inverse.
- La réflexion d'onde électromagnétique sur des objets sphériques s'accompagne d'un changement du sens de polarisation.

3.3 Fréquence et longueur d'onde

La fréquence d'une onde électromagnétique correspond à la fréquence des champs électriques et magnétiques.

La longueur d'onde λ est le trajet parcouru par l'onde après une **période T** d'oscillation.

$\lambda = c.T$	or	$f = 1/T \rightarrow \lambda = c/f$
-----------------	-----------	-------------------------------------

NB : Plus la longueur d'onde est grande plus la fréquence est petite.

3.4 Bruits dans les communications

- **Bruits cosmiques** : Ils proviennent de diverses étoiles. Le soleil émet des bruits non négligeables qui peuvent durer de quelques secondes à quelques jours.
- **Bruits atmosphériques** : Ils proviennent des éclairs (en moyenne, 100 « éclairs/sec). Ils dépendent donc des saisons et de la géographie. Ils sont négligeables au-dessus de 50MHz
- **Bruits des appareillages électriques** : Dus aux allumages automobiles, lumières fluorescentes et moteurs électriques. Les radars y sont sensibles.
- **Précipitations statiques** : Particules chargées, déposées après la pluie ou la neige, près des antennes de réception. Remède : éloigner les objets pointus
- En plus des bruits qui limite la portée, il y a les limitations engendrées par **l'absorption atmosphérique**.
- Au-dessus de 10 GHz, l'atm absorbe certaines fréquences.

3.5 Effets accompagnant les rayonnements électromagnétiques

- Les rayons lumineux excitent la rétine de l'œil
- La chaleur provoque l'émission de rayons infrarouge
- Les rayons ultras violet provoquent le bronzage.
- L'énergie portée par une onde est proportionnelle à la fréquence.
- Les rayons cosmiques sont gênants pour les véhicule spatiaux...
- Les ondes SHF sont utilisé dans les fours à micro-ondes
- Un puissant rayonnement de haute fréquence peut nuire à l'organisme

4 Mode de propagations d'ondes hertziennes

Une onde se propage d'une antenne d'émissions à une antenne de réception de diverses manières :

- En suivant la courbure du sol,
 - Au travers de l'atmosphère,
 - Par réflexion au moyen de réflecteurs naturels ou artificiels.
-
- **Ondes de sol ou de surface** se propagent le long du sol sans être gênées par les obstacles et peuvent atteindre des milliers de km en très basses fréquences.
 - **Onde directes ou d'espaces** se propagent en ligne droites. Elles sont utilisées s'il y a portée optique entre les antennes. Très hautes fréquences
 - Transmission par **réflexion ionosphériques** est possible grâce à la couche ionosphérique contenue dans l'atmosphère. Très hautes fréquences.
 - Transmissions par **diffractions troposphériques**. La troposphère change brusquement d'indice de réfraction et facilite les communications à longues distances.

4.1 Ondes de surface

Elles suivent la courbure de la terre.

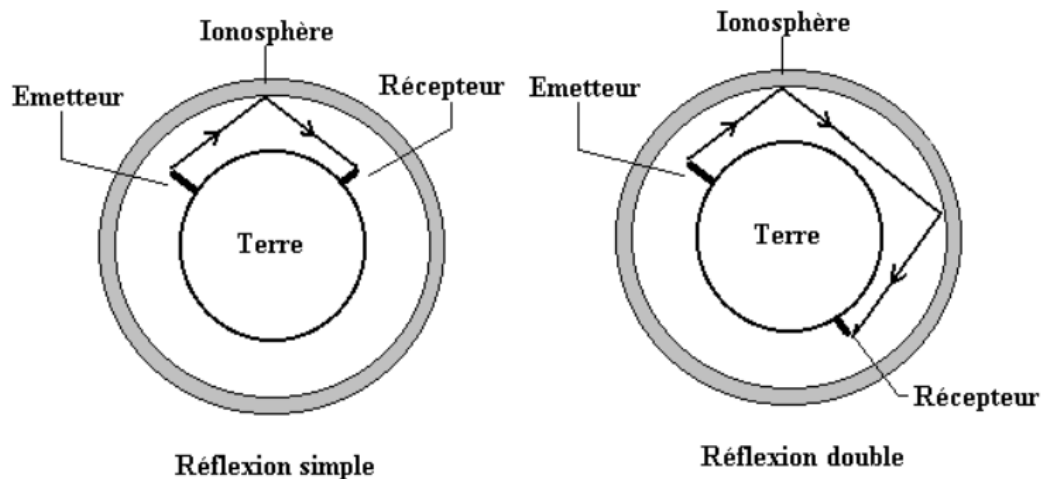
La portée dépend de la nature du sol, de la fréquence, de la puissance d'émission.

L'absorption d'énergie est beaucoup plus faible en polarisation verticale.

4.2 Réflexion ionosphérique

L'atmosphère est divisée en 3 couches :

- Troposphère : de la surface du sol → 10KM (Température diminue quand altitude augmente)
-
- Ionosphère : 50 < altitude < 400km



L'ionosphère se subdivise en différentes sous-couches D,E,F₁ et F₂ :

- **Couche D** : Altitude = 70km, épaisseur = 10 km, négligeable la nuit. Réfléchit certaines onde VLF et LF, absorbe partiellement les MF et les passer les HF.
- **Couche E** : Entre 80 et 140km. Ne laisse passer que les ondes dont la fréquence est sup. à 25 Mhz. Elle réfléchit les ondes HF et permet une portée de 1000km.
- **Couche F₁** : Epaisseur = 20km, se recombine avec la couche F₂ la nuit elle réfléchit ou réfracte certaines ondes HF.
- **Couche F₂** : Couche la plus réfléchissante et persiste la nuit, elle assure des transmissions éloignées en HF.

NB : Si la fréquence dépasse 30Mhz, l'onde traverse toutes les couches et ne sera pas renvoyées vers le sol.

- Si l'angle augmente la portée augmente
- Si l'angle < l'angle critique → Pas de réflexion mais réfraction.

4.3 Ondes d'espace

Ondes d'espace ou ondes directes se propagent en ligne droite → portée optique entre les antennes.

La surface de la terre n'étant pas planes → portée limitée.

4.4 Dispersion troposphérique

Les réflexions troposphériques prennent de plus en plus d'importance dans les fréquences UHF.

Les ondes incidentes sont donc réfractées ou réfléchies, souvent plus d'une fois, avant de retomber dans diverses directions vers le sol

5 Fréquences appropriées aux divers modes de propagation

Ondes VLF

Elles se propagent en onde de surface et peuvent atteindre une portée de plusieurs milliers de km.

Elles peuvent être émises de nuit par réflexion ionosphérique, cas dans lequel elles sont réfléchies par les couches D et E.

Elles pénètrent sous l'eau à quelques dizaines de mètres.

Ondes LF

Elles peuvent atteindre quelques milliers de km lorsqu'elles sont propagées en ondes de surface et peuvent être réfléchies par l'ionosphère la nuit.

Ondes MF

Portée de quelques centaines de km en ondes de surface elles peuvent être réfléchies la nuit par les couches D et E de l'ionosphère.

Ondes HF

Peuvent atteindre quelques dizaines de km en ondes de surface.

Ondes VHF

Plus utilisable en réfraction ionosphériques mais seulement en ondes directes.

NB : relire page 46-47-48

Les antennes

1 Définitions

Une antenne est un dispositif servant à **émettre** ou à **recevoir** des ondes électromagnétiques. Elle est émettrice ou réceptrice respectivement si elle est alimentée ou non en courant.

Une antenne **d'émission** est un **conducteur** qui transforme une **énergie électrique** en **énergie de rayonnement électromagnétique**.

Une antenne de **réception** transforme un **rayonnement électromagnétique** en **courant induit**.

2 Rayonnement d'une antenne à grande distance

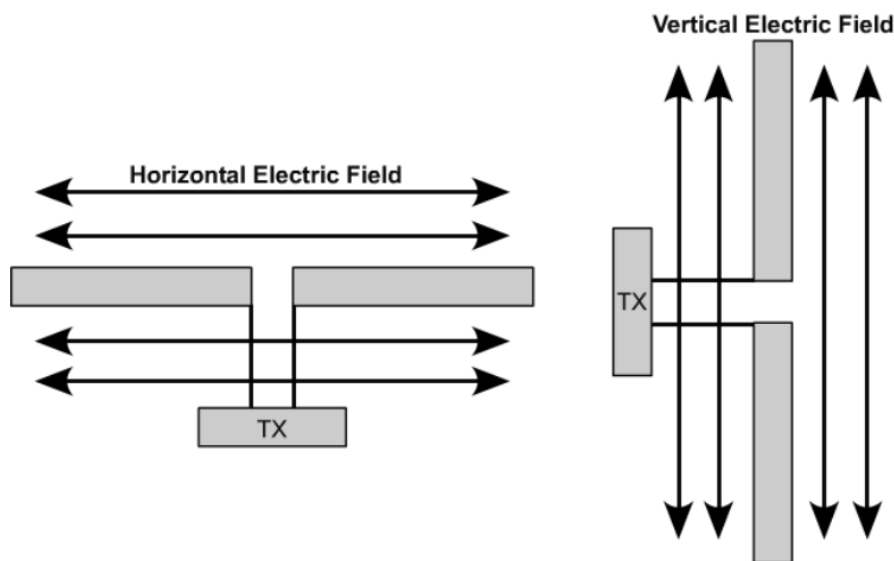
En réalité, une antenne doit être considérée comme chargée par la résistance qu'offre l'air au rayonnement des ondes. C'est dans cette résistance que se dissipe la majeure partie de la puissance de l'onde électromagnétique. **L'antenne peut être considérée comme un élément adaptateur « d'impédance »** entre le générateur et la charge que constitue l'espace → *l'espace est le siège d'onde progressives*.

3 Notions de bases importantes

3.1 La polarisation d'une onde

La polarisation d'une onde est déterminée par le plan de variation du champ électrique :

- Si le plan est **vertical**, on a une polarisation **verticale**.
- Si le plan est **horizontal**, on a une polarisation **horizontale**.



3.2 Densité de puissance de rayonnement p_r .

Cette **densité** de rayonnement est proportionnelle au **carré de l'intensité du champ électrique** S_E en un **point de l'espace**.

$$p_r = \frac{S_E^2}{120\pi} \quad \text{en } W / m^2$$

S_E : l'intensité du champ électrique se mesure en **V/m** . C'est également la référence afin de mesurer l'impact des ondes électromagnétiques sur la santé.

DAS / SAR

DAS : Débit absorption spécifique = **SAR** : Specific Absorption Rate

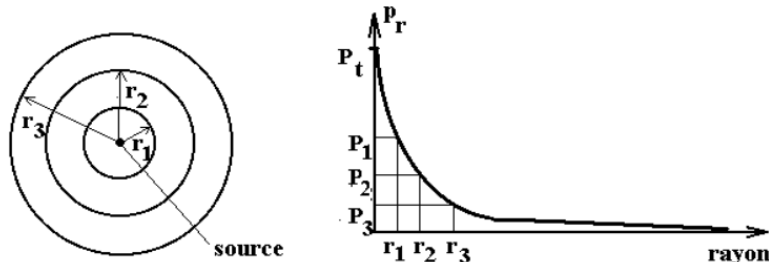
C'est l'énergie de l'onde électromagnétique absorbée par matière absorbante par unité de temps et par unité de masse. Le DAS est exprimé en watts par kilo (**W/kg**).

3.3 Puissance de rayonnement d'une onde.

Une source S de puissance de rayonnement P_t , émettant uniformément dans toutes les directions de l'espace, distribue à une distance r , une densité de puissance p_r telle que :

$$p_r = \frac{P_t}{4\pi r^2}$$

en réalité, ce sont des sphères de rayon croissant et ayant comme centre la source.



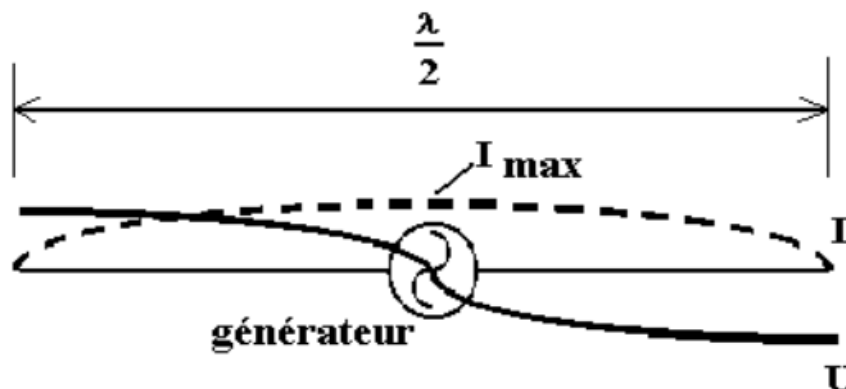
$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{P_t}{4\pi r_1^2} \\ p_2 &= \frac{P_t}{4\pi r_2^2} \\ p_3 &= \frac{P_t}{4\pi r_3^2} \end{aligned}$$

3.4 Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est le lieu géométrique des puissances de rayonnement égales dans l'entourage de celle-ci.

4 L'antenne résonnante

Les calculs et l'expérience nous montrent que la diffusion du rayonnement est optimale avec une antenne dont la longueur « l » est égale à une demi longueur d'onde ($\lambda / 2$) de l'onde émise.



Cette antenne est appelée : antenne résonnante ou de Hertz ou antenne à dipôle ou demi onde.

Ce type d'antenne est alimenté par son centre car c'est à cet endroit que l'impédance est la plus faible → Le courant est maximum à cet endroit également.

Remarque :

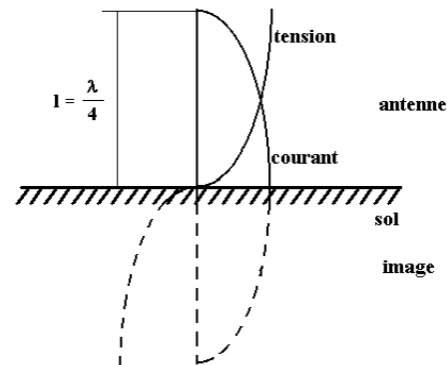
- Cette antenne se comporte comme un filtre. En effet, lorsque le rapport entre le diamètre de l'antenne (d) et la longueur des d'onde émise (λ) augmente, la bande passante augmente aussi.
- La résistance au rayonnement varie également en fonction du rapport d/λ :

$\frac{d}{\lambda}$	Proche de 0	Proche de 10^{-4}	Proche de 10^{-2}
Résistance au rayonnement : R_r	73ohms	64ohms	55ohms

4.1 L'effet de sol

La terre agit comme un miroir pour toutes les antennes et contribue au rayonnement total
→ Il faut considérer deux antennes rayonnantes un non une seule si cette dernière est dressée sur le sol.

Une antenne connectée à sa base sur le sol, est en fait prolongée : L'antenne de Marconi d'une longueur de $\lambda/4$ connectée au sol se comporte comme une antenne dipôle ($\lambda/2$)



5 Les paramètres importants d'une antenne

Nous allons considérer les différents paramètres suivants :

1. Le diagramme de rayonnement.
2. La polarisation.
3. La résistance et l'impédance.
4. La bande passante.
5. La largeur du faisceau (angle d'ouverture).
6. Le gain en directivité et en puissance.
7. La longueur effective.
8. La hauteur effective.

5.1 Résistance de l'antenne

La puissance électrique consommée par l'antenne peut se diviser en deux parties :

1. Une partie perdue en chaleur résultant à la résistance ohmique de l'antenne.
2. La partie utile transformée en rayonnement électromagnétique.

Par conséquent, on peut diviser une antenne comme 2 résistances en série :

1. **R** : résistance de rayonnement.
2. **r** : résistance ohmique.

On définit le **coefficient d'efficacité** η d'une antenne comme suit :

$$\eta = \frac{R}{R + r} \quad \text{en pratique, } 75\% < \eta < 95\%$$

La résistance de rayonnement R est définie comme étant la résistance qui dissiperait une énergie électrique = à l'énergie rayonnée ou bien :

$$R = \frac{\text{Puissance émise par l'antenne}}{(\text{Courant maximum au point d'alimentation})^2} \quad (P = RI^2)$$

5.2 Impédance d'une antenne

Une antenne dipôle est purement résistive. Son impédance devient inductive ou capacitive, selon que la longueur est plus grande ou plus faible que la longueur de résonance $\lambda/2$

$$\mathbf{Z=R+jX} \quad \text{en Ohms}$$

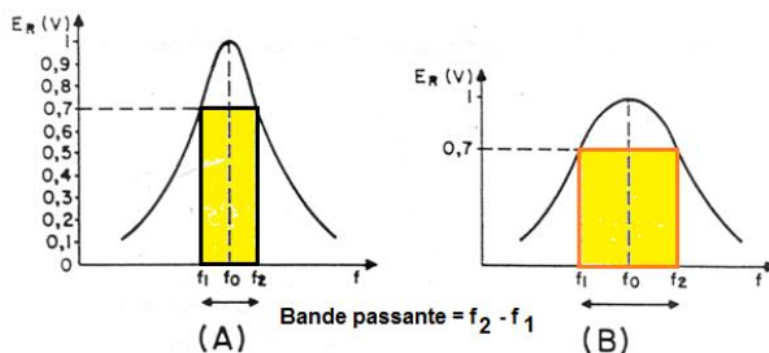
5.3 La bande passante d'une antenne

La bande passante est la différence de fréquences (f_1 - f_2) pour laquelle la **tension induite** E_R diminue de 3dB ou autrement dit, ne vaut plus de 70% de la valeur maximale.

$$-3\text{dB} \cong 20 \log \left(\frac{70,7}{100} \right) \cong 20 \log \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right) \text{ en tension et } -6\text{dB} \cong 10 \log \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right) \text{ en puissance}$$

$$-3\text{dB} \cong 10 \log \left(\frac{50}{100} \right) \cong 10 \log \left(\frac{1}{2} \right) \text{ en puissance (la moitié de la puissance)}$$

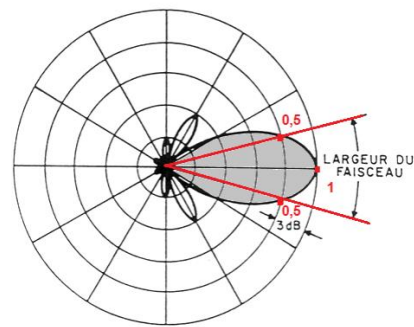
Le diamètre est un des paramètres importants influençant fortement la bande passante de l'antenne.



Bande passante d'une antenne.
A — pour un faible diamètre d'antenne,
B — pour un plus gros diamètre d'antenne.

5.4 Largeur du faisceau ou angle d'ouverture

Dans le cas d'une antenne directionnelle, l'angle d'ouverture est défini comme étant l'angle qui existe entre les points dont la densité de puissance de rayonnement est égale à la moitié de la puissance de rayonnement maximale. C'est aussi la séparation angulaire correspondant à **une atténuation d'intensité de 3dB** sur le diagramme de rayonnement de l'antenne.



Longueur de faisceau d'une antenne.
Dans cet exemple, la largeur de faisceau est 30°.

5.5 Le gain de directivité de l'antenne

Par définition c'est le rapport entre la densité de puissance dans la direction du lobe principal et la densité de puissance qui aurait existé dans une antenne omnidirectionnelle

$$\text{Gain en directivité} = \frac{\text{densité de puissance dans la direction du lobe principal}}{\text{densité de puissance qui aurait existé dans une antenne isotropique}}$$

5.6 Gain de puissance d'une antenne

C'est le gain de directivité exprimé en dB.

$$G_{\text{puissance en dB}} = 10 \log G_{\text{directivité}}$$

5.7 Longueur d'onde effective d'une antenne

Vu la différence de vitesse de propagation des ondes dans le conducteur constituant l'antenne et l'espace, la longueur d'onde dans l'antenne est plus courte que celles des ondes qui se propage dans l'espace.

- Pour les fréquences inférieures à 30MHz :

$$\lambda_e = \frac{c}{f} \cdot 0,94$$

- Pour les fréquences supérieures à 30MHz :

$$\lambda_e = \frac{c}{f} \cdot k$$

5.8 Hauteur effective d'une antenne

Ce paramètre est propre à l'antenne. Il est donc tout à fait indépendant de la longueur du mât sur lequel l'antenne est fixée.

La hauteur effective détermine la tension V induite dans l'antenne par un champ électromagnétique d'intensité :

- V : tension induite en volts.
- E : Intensité du champ électrique en V/m
- h_e : Hauteur effective en m

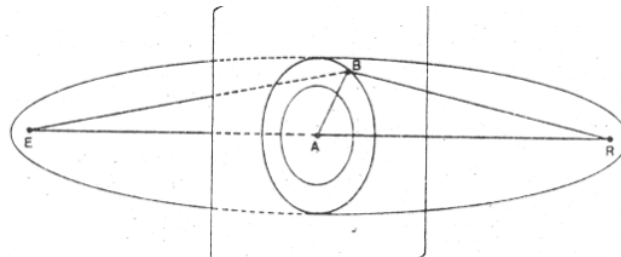
$$V = E \cdot h_e$$

Pour une antenne dipôle $\lambda/2$, la hauteur effective est de $h_e = \lambda/\pi$

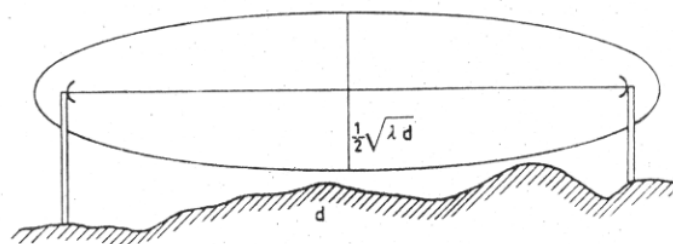
6 Critère d'une liaison en visibilité

Pour transmettre des informations par ondes électromagnétiques, il ne suffit pas que les deux antennes se voient. Il faut qu'il existe un certain volume ellipsoïde entre les deux antennes ne contenant aucun obstacle et ce afin de limiter les phénomènes de diffractions :

Soit $\Delta l = EBR - EAR < \lambda/2$



Première ellipse de Fresnel pour $\Delta l = \lambda/2 \rightarrow$



Définition d'une liaison en visibilité à la surface de la terre.

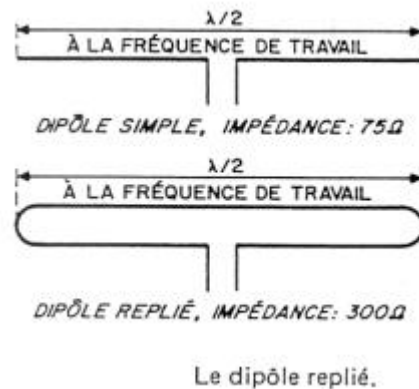
7 Différents modèles d'antennes

7.1 Le dipôle replié

Chaque brin sont en phase → ils s'additionnent.

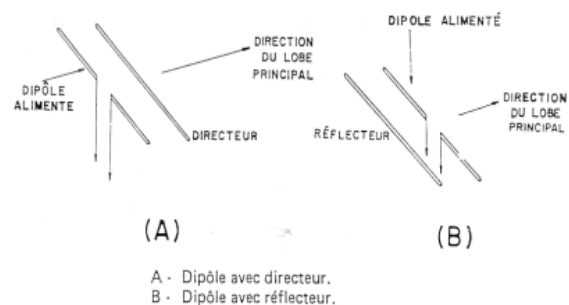
Caractéristiques principales :

- Résistance d'antenne plus grande de 300 ohms
- Directionnalité égale à l'antenne dipôle simple
- Bande passante plus grande que celle du dipôle simple
- Hauteur effective double de celle du dipôle simple
- Plus robuste du point mécanique



7.2 Antenne avec éléments passifs, antenne Yagi

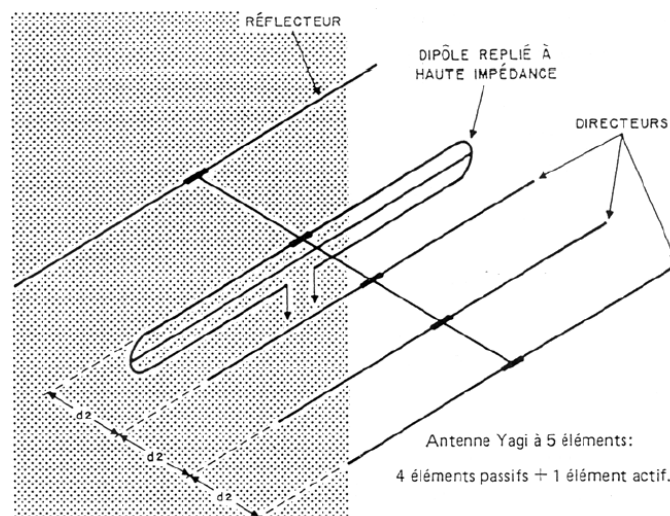
Un conducteur situé à une certaine distance d'une antenne, est le siège d'un important courant induit. Le conducteur à son tour rayonne et ce rayonnement s'ajoute au rayonnement de l'antenne. Le diagramme du rayonnement dépend de la position relative des conducteurs et de l'antenne. Suivant la position du conducteur par rapport à l'antenne, ce conducteur est appelé directeur ou réflecteur.



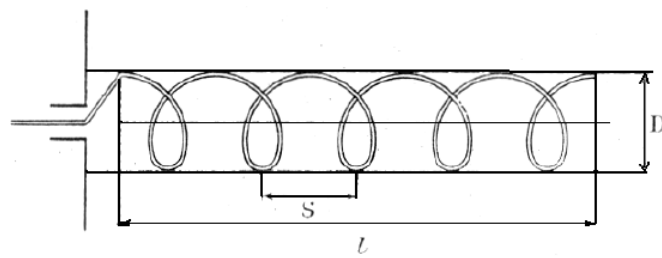
7.2.1 Antenne de Yagi.

L'antenne de Yagi utilise plusieurs éléments passifs avec un seul dipôle alimenté électriquement en vue d'obtenir un très grand gain en directivité.

La hauteur effective devient : $h_e = \lambda G_D / \pi$



7.3 Antenne en hélice.



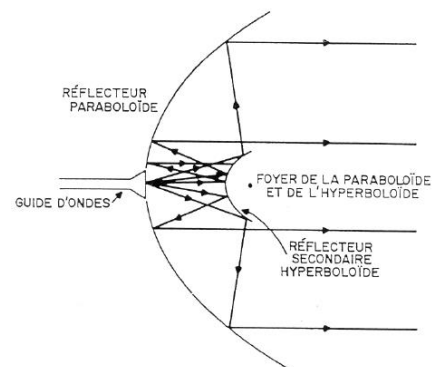
D : diamètre du cylindre générateur de l'hélice,
 $C = 2\pi D$: circonférence du cylindre,
 S : pas de l'hélice,

n spires séparées par la distance S et traversées par un courant respectivement déphasé d'un angle correspondant à la propagation du courant dans la spire précédente.

- Il existe des conditions à respecter entre C , S , l afin d'obtenir un rayonnement axial.
- La polarisation de ce type d'antenne est circulaire c'est-à-dire alternativement une polarisation de type vertical et horizontal.

7.4 Antennes paraboliques.

- Plus l'angle d'ouverture est réduit, plus gain est important dans une direction.
- Inconvénient, la source de rayonnement se situe au foyer de la parabole.
- Satellite géostationnaire : altitude 36000km



8 Quelques informations sur les satellites de télécommunications.

8.1 Types satellites.

Satellites passifs et actifs

8.2 Orbites et couverture

Elliptique (vitesse varie)

Circulaire polaire (passe au-dessus des deux pôles et peuvent couvrir à long terme toute la surface du globe)

Circulaire inclinée (ne couvre pas toute la terre, avantage commercial (pas les pôles))

Géostationnaire (peut employer, même révolution que la terre)

8.3 Techniques d'accès multiple

8.3.1 AMRF : Accès Multiple à Répartition en Fréquence

- Premier utilisé, il n'est pratiquement plus utilisé
- Adapté aux transmissions analogiques
- Equipement relativement important et lourd : un modulateur + un démodulateur par communication → si n communications simultanées, il faut n démodulateurs et n modulateurs.
- Le satellite doit également pouvoir amplifier et traiter n porteuses en même temps
- La bande passante du transpondeur d'un satellite est divisé en 500 sous bande de fréquences par transpondeur.
- Chaque sous bande est associé à une station.
- Les affectations peuvent se faire à la demande

Inconvénients :

Si une station n'émet pas, sa sous-bande est perdue (vide, pas utilisée par une autre station)

Pas de possibilité d'augmenter la taille d'une sous-bande pour une station qui désirerait avoir un plus grand débit.

8.3.2 AMRT : Accès Multiple à Répartition en Temps

- Plus utilisé que la précédente et présente un meilleur rendement
- Si de nouvelles stations arrivent, il suffit de découper de nouvelles tranches de temps.

Il existe l'AMRT statique et dynamique

AMRT statique :

- Découpe de tranches de temps affectées aux différentes stations
- Toutes les stations émettent alors sur la même fréquence durant leur slot de temps en utilisant l'entièreté de la bande passante.
- Les stations ne possèdent donc qu'un seul démodulateur/modulateur
- Chaque tranche est composée d'un en-tête afin de retrouver la porteuse et d'identifier la station émettrice. Bien entendu, plus la trame est longue, moins l'en-tête prend de place proportionnellement aux données

Inconvénients :

- Synchronisation temporelle indispensable entre toutes les stations + synchronisation en début de tranches afin d'éviter les chevauchements des signaux. Un intervalle est réservé à cet effet entre chaque tranche.

- Si une tranche n'est pas utilisée, elle est perdue → AMRT dynamique

AMRT dynamique :

- Permet d'allouer une tranche aux stations qui en ont fait la demande
- Cette technique augmente la difficulté de gestion et augmente le temps de réponse car il faut au minimum un aller-retour (270ms) pour qu'une station obtienne de la part de la station de gestion une tranche de temps.
- Le taux d'utilisation n'est pas du tout excellent.

8.3.3 AMRC : Accès Multiple à Répartition par Code

Chaque 'temps bit' est décomposé en m intervalles de temps élémentaires appelés chips.

Utilisations d'un codage binaire propre à chaque station (codage différents des 0 et des 1 pour chaque station). Le codage des 1 et 0 sont complémentaires :

- 1=> -1-1-1+1+1-1+1+1
- 0=> +1+1+1-1-1+1-1-1

8.3.3.1 Accès aléatoire ALOHA

Aloha

- Le nom provient des expériences effectuées par l'université d'Hawaï afin de relier les différents centres informatiques situés sur plusieurs îles.
- Principe : les stations émettent sans se soucier des autres. Il n'y pas d'écoute du canal avant la transmission. Il y a réémission si une station constate qu'il y a eu une collision (pas de souci dans le cas de courtes distances). Mais lors des communications par satellite. Les stations ne seront averties d'une collision que 270ms après (aller-retour). La retransmission ne se fera qu'après un temps aléatoire.
- Le taux d'utilisation est faible : 20 %

Aloha en tranches ou discrétisé

- Découpage du temps en tranches correspondant chacune au temps de transmission d'un paquet.
- Synchronisation au début de chaque tranche.
- Si détection de collisions, on réémet l'ensemble de la tranche de temps et non plus une partie de paquet.
- Le taux d'utilisation passe alors à 36%.

Aloha avec réservation

- Basé sur une notion de probabilité : si une station commence à émettre un paquet, il y a de forte chance qu'elle en envoie un suivant de suite => l'idée de réserver plusieurs tranches de temps en une fois lorsqu'une station décide d'émettre
- Si collision réémission de l'intervalle en question.

Le bruit thermique

1 Introduction

Le bruit thermique a pour origines l'agitation des électrons dans un conducteur. Ce bruit existe pour toutes les températures supérieures au zéro absolu (-273°C).

Il se caractérise dans les circuits électriques par la présence d'une faible tension parasite de bruit.

2 Caractéristiques

Le bruit thermique possède une densité spectrale de puissance constante jusqu'à 1000GHz. Il est aussi appelé **bruit blanc**.

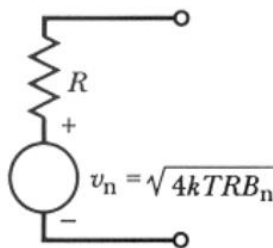
Le modèle physique de ce bruit est constitué d'un générateur de **Thévenin** dont la tension efficace sur un circuit ouvert (=circuit sans impédance de charge) est :

$$v_n = \sqrt{4kTB_n R}$$

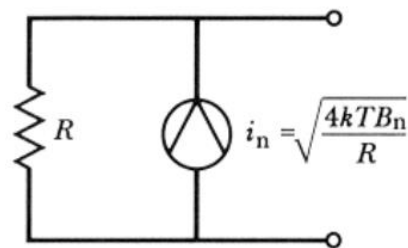
ou par un générateur de Norton dont le courant efficace en circuit ouvert est de :

$$i_n = \sqrt{\frac{4kTB_n}{R}}$$

Circuit de Thévenin



Circuit de Norton



AVEC :

K = constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T = Température en Kelvin ($0^\circ\text{K} = -273^\circ\text{C}$)

B_n = Bande de mesure en Hz

R = Résistance en Ohm.

La puissance maximale fournie à une charge par un tel générateur est obtenue lorsque l'impédance de cette charge est égale à R.

$$P_n = kTB_n \text{ en Watt}$$

→ Une source résistive fournit à une charge adaptée une puissance de bruit thermique kTB_n ,

Proportionnelle à la température et à la bande passante du dispositif

Dans ce cas la tension v est égale à :

$$V = \frac{\sqrt{4kTB_n R}}{2}$$

Et la puissance fournie à la charge R est de :

$$P = \frac{V^2}{2} = kTB_n$$

La densité spectrale de puissance de bruit est donc égale à :

$$N_0 = kT \text{ W / Hz}$$

3 Facteur de bruit et température de bruit

Si on considère un amplificateur de gain de 20 dB. La densité spectrale de puissance des signaux à l'entrée et à la sortie peut être mesurées avec un analyseur de spectre.

La puissance des signaux est plus importante après l'amplification (sortie) mais le rapport signal sur bruit est plus faible. Ceci est dû au bruit inhérent à notre amplificateur qui est venu s'ajouter au signal original.

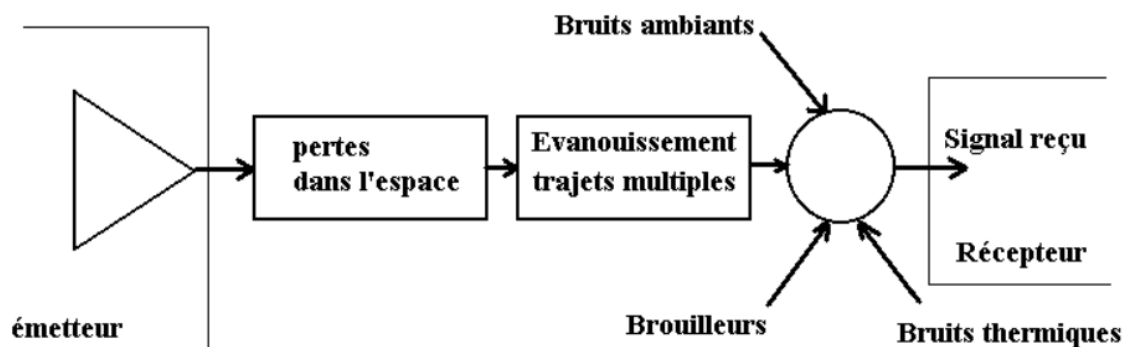
Cet apport est caractérisé par le **facteur de bruit** défini comme suit :

$$F = \frac{\text{rapport signal / bruit à l'entrée}}{\text{rapport signal / bruit à la sortie}} = \frac{rsbe}{rsbs} = 10$$

Le bruit de l'amplificateur est donc équivalent au bruit thermique d'une source de bruit :

$$T_{eq} = (F - 1)T$$

3.1 Bilan de liaison



Le **bilan de liaison** permet de définir :

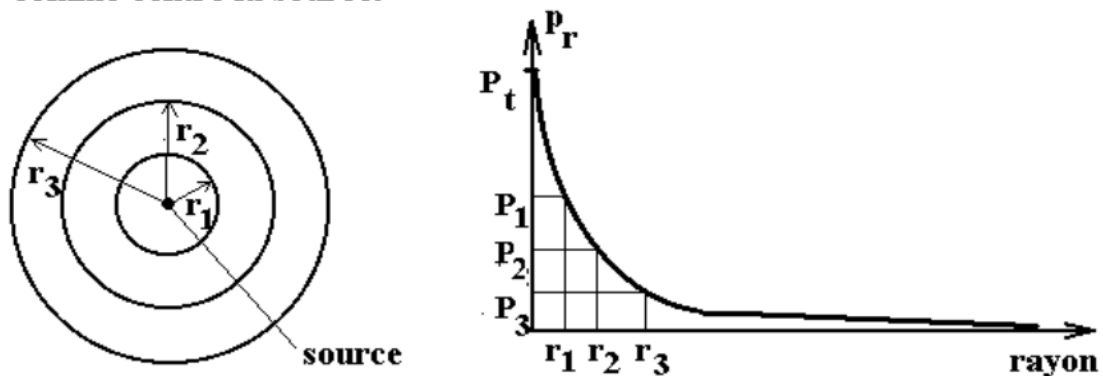
- La puissance d'émission.
- La marge de puissance.

3.1.1 Atténuation d'espace

L'espace libre : Le concept d'espace libre suppose qu'un canal libre de toute modification de la propagation RF telles que l'absorption, la réflexion, la réfraction, ou la diffraction.

L'énergie RF arrivant sur le récepteur est uniquement une fonction de la distance parcourue par l'onde. Bien entendu, ceci n'est pas parfaitement idéal.

en réalité, ce sont des sphères de rayon croissant et ayant comme centre la source.



La puissance reçue par une antenne placée sur la sphère est proportionnelle à la surface efficace d'absorption A_{er} définie par :

$$A_{er} = \frac{\text{Puissance reçue}}{\text{Densité de puissance incidente}} \quad \text{en } m^2$$

$$\Rightarrow P_r = \frac{P_t A_{er}}{4\pi r^2}$$

Définition de la **puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)** :

$$PIRE = G_t P_t$$

G_t = gain de l'antenne d'émission.

$$P_r = PIRE \cdot \frac{AER}{4\pi r^2}$$

Le gain de l'antenne est lié à la section efficace d'absorption par la relation suivante :

$$G_r = \frac{4\pi AER}{\lambda^2}$$

Des équations précédentes, on déduit la puissance reçue par l'antenne :

$$P_r = \frac{PIRE \cdot G_r}{\left(4\pi \cdot \frac{r}{\lambda}\right)^2}$$

La perte d'espace libre est définie par l'expression suivante :

$$L_s = \left(4\pi \cdot \frac{r}{\lambda}\right)^2$$

En conclusion, la puissance reçue par l'antenne est :

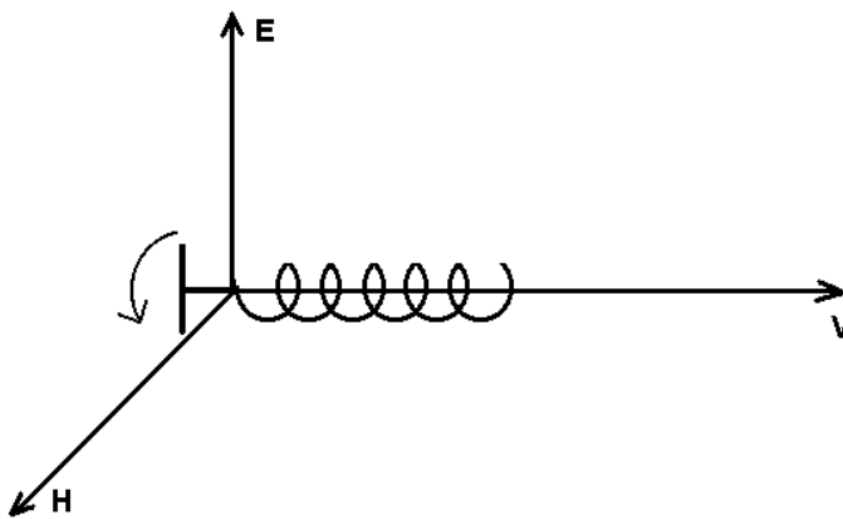
$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot AER}{4\pi r^2} = \frac{P_t \cdot Aet \cdot AER}{\lambda^2 \cdot r^2} = \frac{P_t \cdot Aet \cdot G_r}{4\pi r^2} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi r)^2}$$

Les guides d'ondes

1 Rappel : la propagation des onde électromagnétiques

Présence d'un champ électrique et magnétique répondant aux propriétés suivantes :

- Les deux champs sont des grandeurs vectorielles,
- Les deux champs sont orthogonaux,
- La direction de propagation de l'onde est donnée par la règle du tir bouchon.
- Les amplitudes des deux champs sont liées par un rapport constant. Ce dernier détermine l'impédance caractéristique du vide.



1.1 Les ondes planes

Après un temps, $t = r/c$ suffisamment long, la surface hachurée peut être assimilée à une surface plane. Dès lors, on peut admettre que E et H sont situés dans ce plan → onde plane qui se propage à la vitesse c.

1.2 Polarisation des ondes

E **vertical** et H horizontal : onde polarisée **Verticalement**.

E **horizontal** et H vertical : onde polarisée **horizontalement**.

2 Ondes électromagnétiques au voisinage d'un conducteur parfait

Un conducteur parfait = Un conducteur aux bornes duquel il ne peut exister de différences de potentiel.

Cette définition provient du fait que :

- La composante tangentielle du champ électrique le long du conducteur est toujours NULLE.

$$E_t = 0$$

Si E_t était différent de zéro, on aurait une ddp aux bornes du conducteur. Ce qui est impossible.

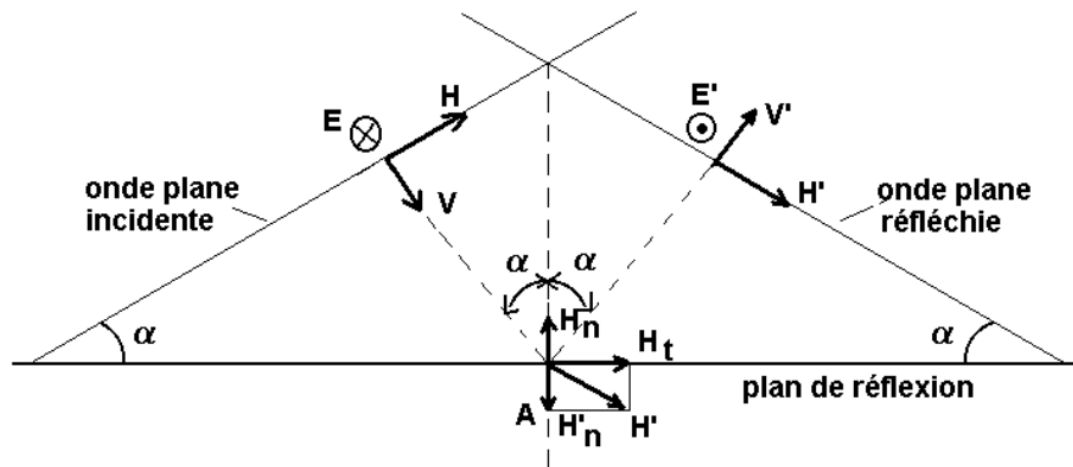
- Le conducteur est sans effet sur la composante normale du champ électrique (E_n)
- La composante normale du champ magnétique doit être NULLE pour tous les points constituant la surface du conducteur parfait

$$H_n = 0$$

Si H_n était différent de 0, le champ-magnétique alternatif engendrerait un flux variable.

- Le champ magnétique tangentiel (H_t) est sans effet sur le conducteur.

3 Réflexion des ondes électromagnétique planes



- Une onde électromagnétique est réfléchiée sans pertes par un conducteur parfait.
- La direction de propagation de l'onde incidente et la direction de propagation de l'onde réfléchiée sont dans le même plan perpendiculaire au plan du conducteur.
- L'angle incident est égal à l'angle de réflexion.

4 Définition

Les guides d'ondes sont des conducteurs creux ayant la propriété de guider les ondes électromagnétiques. Leur section peut être rectangulaire ou circulaire.

4.1.1 Avantages

- Pas de pertes par rayonnement. Les ondes sont enveloppées par les parois des guides.
- Meilleur rendement en présence d'ondes stationnaires. La puissance est limitée par la tension de rupture du diélectrique. L'air présente une tension de rupture élevée.
- Simplicité et raideur de la constitution.

4.2 Inconvénients

- Seules les fréquences élevées peuvent être utilisées. Ils conviennent aux faibles longueurs d'onde (1 à 3cm). Tout les guides d'ondes de section données ont une fréquence critique dépendant des dimensions.

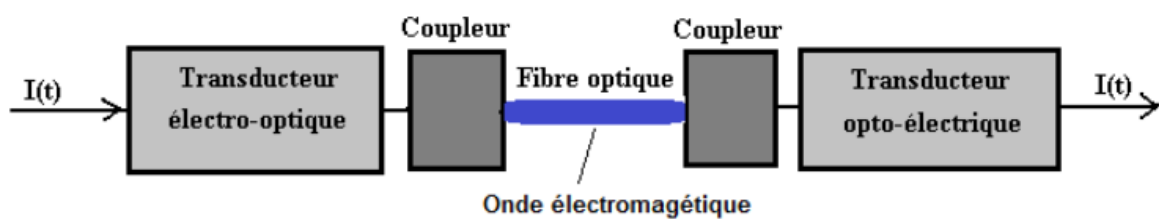
Fibres optiques

1 Introduction

Les informations se propagent sous forme de lumière sur un support en silice.
Le signal à transmettre rythme des variations d'intensités lumineuses.

Dans le cas de communication numérique, l'intensité lumineuse évolue sous forme d'impulsions.

Représentation du principe d'une chaîne de transmission à fibres optiques



2 Rappel de quelques lois d'optique géométrique.

2.1 La réflexion de la lumière (Lois de Huygens)

Le rayon lumineux se réfléchit sur un miroir plan de telle sorte que la mesure de l'angle d'incidence \hat{i} est toujours égale à la mesure de l'angle de réflexion \hat{r}

$$\hat{i} = \hat{r}$$

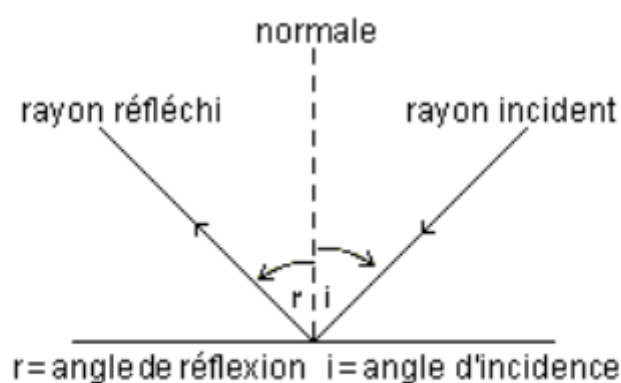


Figure 1

Lois fondamentales de la réflexion

2.2 Réfraction de la lumière (Loi de Snell-Descartes)

La réfraction de la lumière est le changement de direction que subit un faisceau lumineux lorsqu'il passe d'un milieu à un autre. On appelle « **dioptre** » la surface qui sépare les deux.

$$n = \frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}}$$

Le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle de réfraction est constant pour deux milieux transparents déterminés. Ce rapport constant est appelé **indice de réfraction**.

La réfraction de la lumière est due à des différences de vitesse de propagation de la lumière dans les divers milieux.

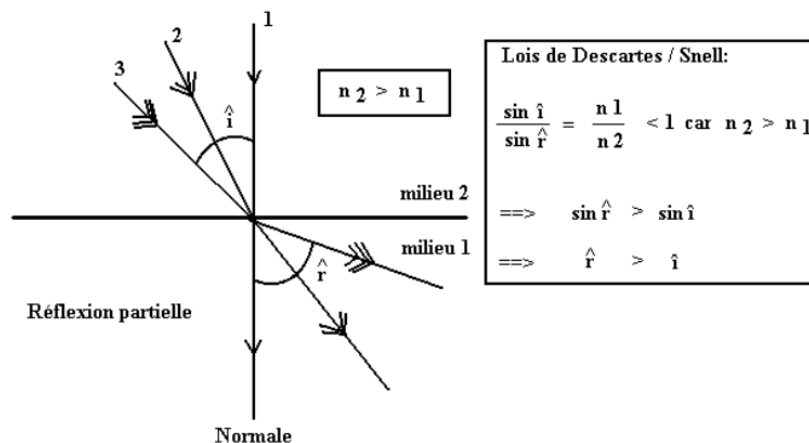
En conclusion :

La connaissance de l'indice de réfraction des différents milieux transparents nous renseigne sur **la direction de propagation de la lumière** dans ces milieux mais aussi sur **sa vitesse de propagation**.

2.3 Angle limite de réfraction et réflexion totale.

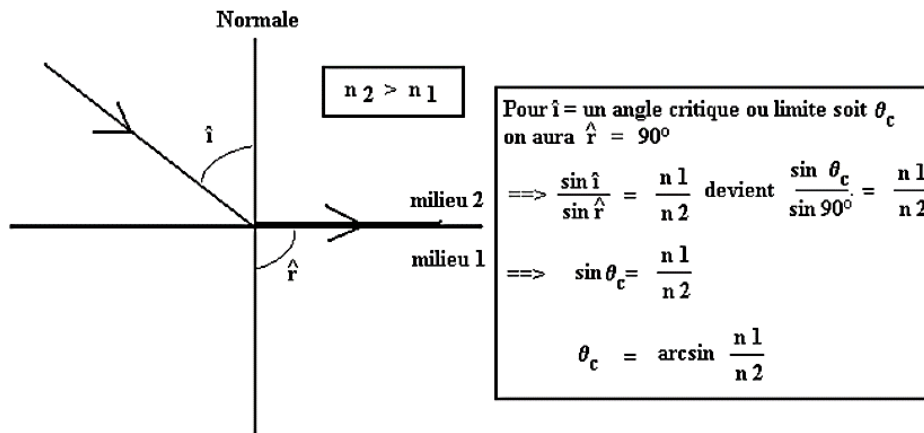
Trois cas sont possible :

a. La réfraction



b. Angle limite

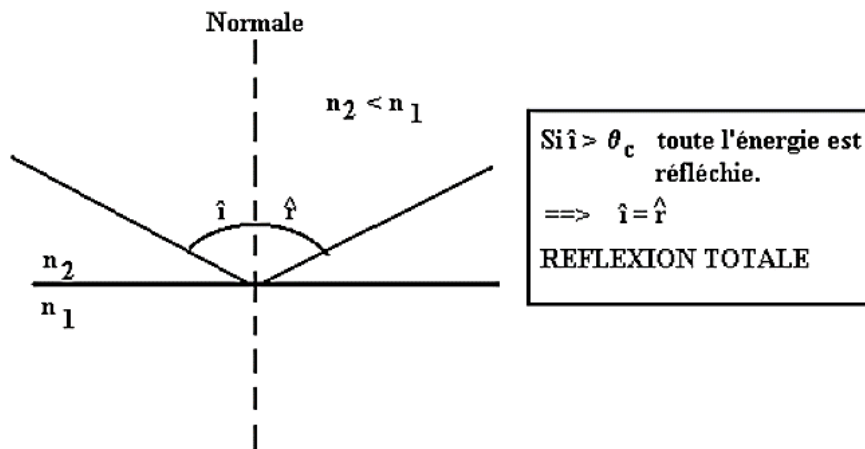
On augmente l'angle \hat{i} par rapport au point précédent.



L'angle limite de réfraction est donc l'angle maximum d'incidence lorsque la lumière passe d'un milieu dans un autre moins réfringent.

c. Réflexion totale

On augmente encore l'angle \hat{i} .



3 Pourquoi utiliser les fibres optiques

Comparons les communications optiques à la téléphonie.

Une onde lumineuse de longueur d'onde $\lambda = 0,9\mu\text{m}$ a une fréquence de :

Formule liant la longueur d'onde à la fréquence :

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{9 \cdot 10^{-7}} \cong 3,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 330000 \text{ GHz}$$

- La capacité théorique d'information sur des bandes de 100GHz est de **5 ordres de grandeur supérieur à celle des câbles coaxiaux**.
On améliore avec un facteur entre 5 et 20 :
 - Quantités de conversation téléphoniques et/ou programme vidéo sont beaucoup plus importantes.
 - Leur portée **sans répéteurs est** beaucoup plus élevée (100 fois plus grande).
- Elles sont **insensibles aux interférences électromagnétiques**. Pas de risque de boucle de terre, d'étincelles ou de court-circuit. Pas de risque d'écoutes par induction et presque pas de coupures.
- **Faible encombrement et faible poids**. L'amenée du câble, sa pose et sa dépose pour réparation sont beaucoup plus facile. (Bande passante large)
- **Des inconvénients existent** : Connexion difficiles, bruits internes important, ...

4 Constitution des fibres optiques

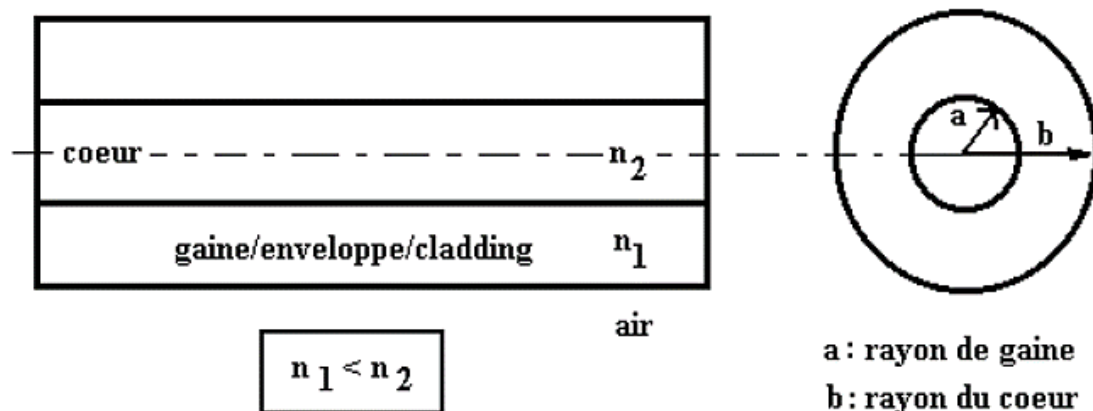
D'une manière générale, une fibre optique est constituée d'un milieu diélectrique intérieur (d'indice de réfraction n_2), le cœur. C'est dans ce dernier que la plus grande partie de l'énergie lumineuse est véhiculée.

Le cœur peut être entouré d'un second milieu dont l'indice de réfraction (n_1) doit être plus faible, la gaine ou cladding.

La structure peut être aussi entourée de couches concentriques de matériaux plastiques destinés à lui fournir une protection et une meilleure résistance mécanique :

- Renfort
- Éléments de relaxation des contraintes,
- Éléments de remplissage des vides
- Revêtement anti-abrasion,
- Couverture imperméable.

4.1 Structure de base d'une fibre optique



De même, on définit un paramètre important concernant les indices de réfractons dans les différents milieux :

La variation relative de l'indice de réfraction :

$$k = \frac{n_2 - n_1}{n_2}$$

4.2 Revêtement de la fibre

Afin de minimiser des pertes lors de la réflexion totale, **le dioptre doit impérativement être propre, poli et dépourvu de rayures, tâches, empreintes, etc. ...**

Le revêtement doit **assurer l'isolement** dans le cas où la fibre, placée dans un faisceau ou dans un câble, pourrait être en contact avec une autre fibre → Eviter un échange de rayonnement lumineux entre ces deux fibres.

Conserver constante l'ouverture numérique sur toute sa longueur.

4.3 Atténuation dans les fibres

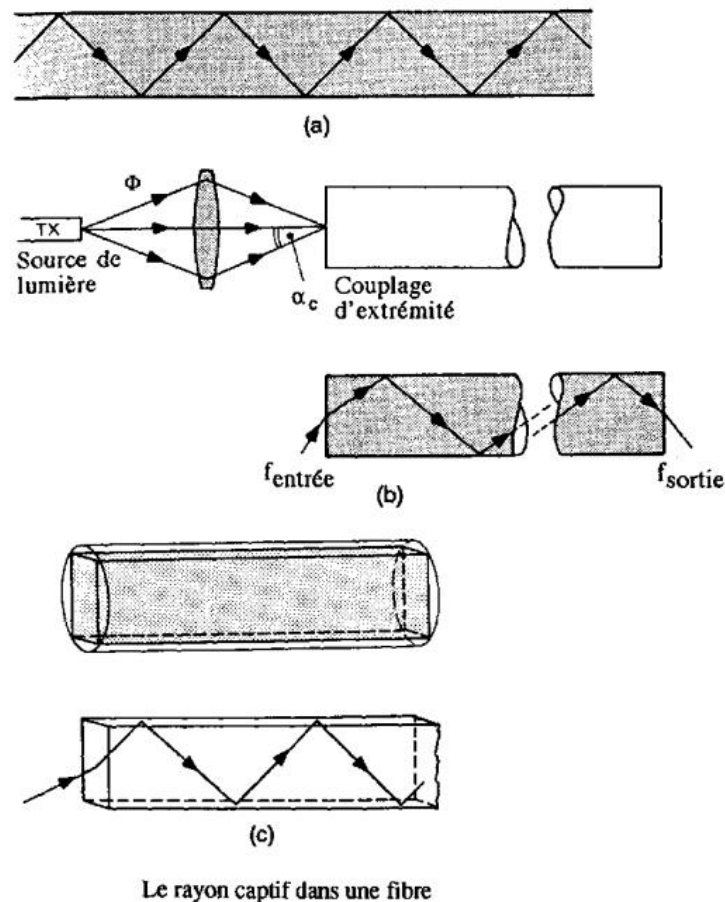
A chaque réflexion particulière, il existe toujours quelques pertes et le rayons en subit des milliers chaque mètre de son parcours dans la fibre.

Autre problème dans les fibres : **Phénomènes absorptions du matériau et de diffusions sur des hétérogénéités**, entre les réflexions.

Les remèdes sont : Pour la réflexion, l'enrobage de la fibre. Pour l'absorption et les diffusions, on utilise un matériau transparent de grande pureté.

4.4 Quelques mots sur la dispersion modale

Un faisceau lumineux est composé de plusieurs rayons



On constate que les rayons rentrent dans une fibre avec diverses incidences.

Les différents chemins possibles dans la fibre sont appelés les MODES.

Le nombre de modes possibles est cependant très important dans de nombreux cas → **MULTIMODE**

A la sortie de la fibre, la distribution des amplitudes résulte de la distribution statistique des chemins optiques et des différences d'atténuations (plus de réflexion pour les modes élevés → plus de pertes).

Il en résulte donc que pour transmettre correctement des impulsions de courte durée et fréquentes, il est recommandé d'avoir une dispersion de modes la plus faible possible. Dans le cas contraire, des impulsions consécutives se fondront les unes dans les autres.

4.5 Types de fibres optiques

1. Fibre multimode

*a. Fibres multimodes à **saut d'indice***

1. Cœur plus gros très homogène
2. Résistant
3. Liaison courte distance
4. Frontière entre cœur et enveloppe très marquée.
5. Si Débit trop haut, ne fonctionne plus

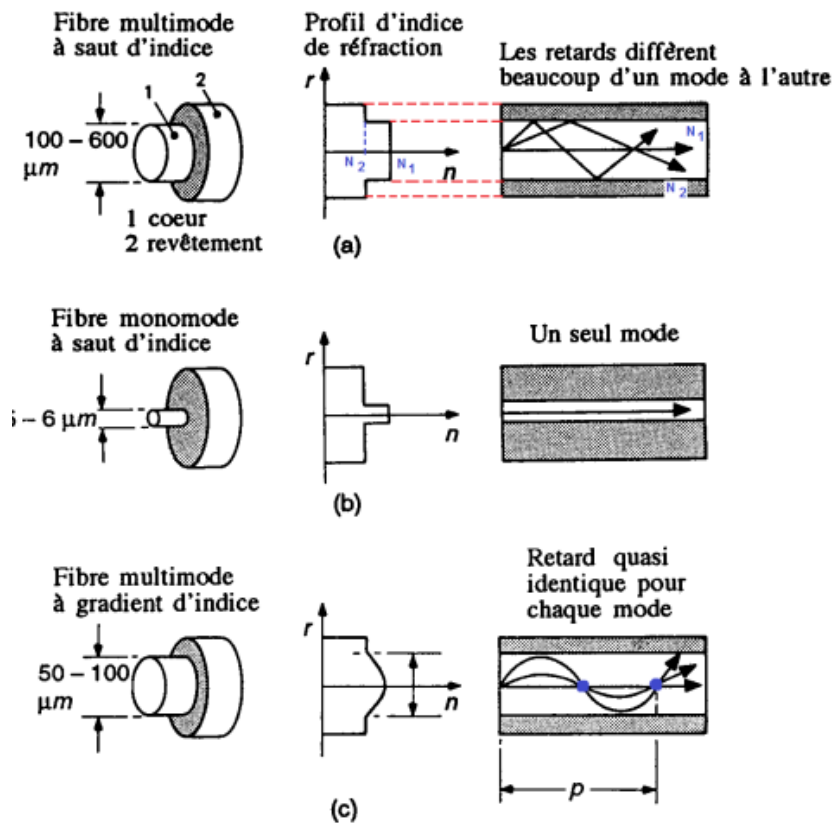
*b. Fibres multimodes à **gradient d'indice***

1. Chaque mode coupe l'axe en même temps.
2. Cœur plus gros très homogène
3. Résistant
4. Liaison courte distance
5. Ne se propage pas en ligne droite mais en méandres
6. Frontière entre cœur et enveloppe très marquée.
7. Si Débit trop haut, ne fonctionne plus

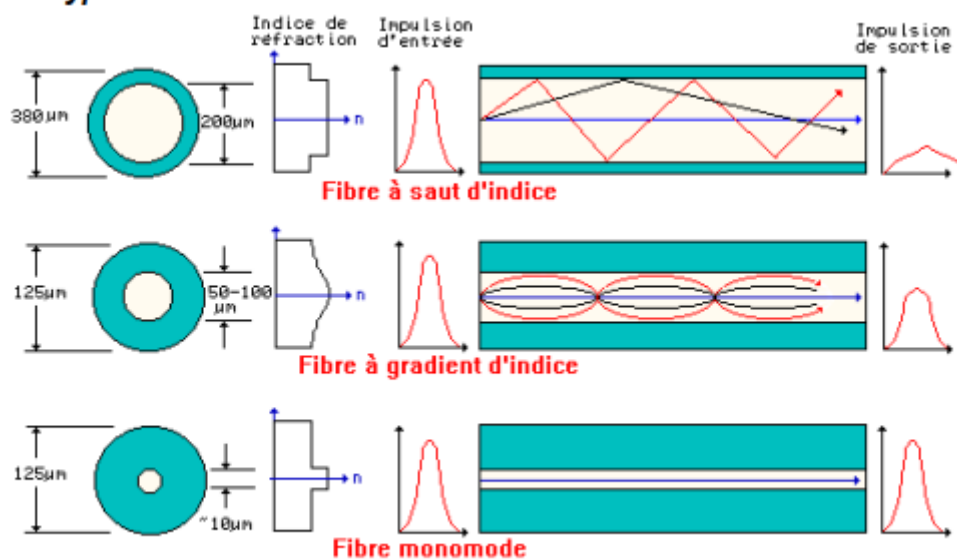
*ii. **Résumé : Très bonne collecte de la lumière et très faible dispersion modale grand ouverture numérique et large bande passante mais + cher que celle à saut d'indice***

2. Fibres monomodes à saut d'indice

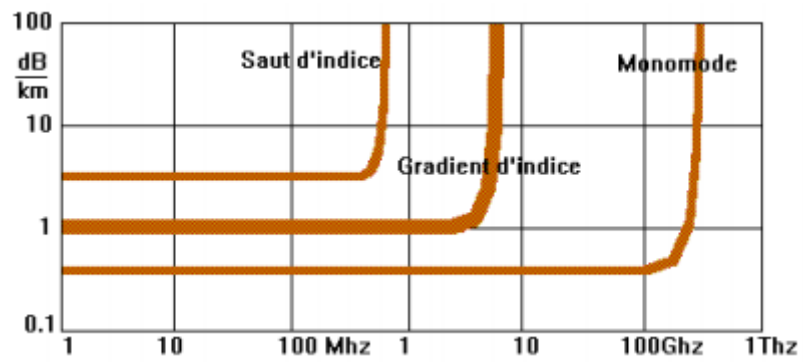
- a. Ligne droite impossible
- b. Va plus loin avec débit plus élevé
- c. Plus grande bande passante
- d. Cœur plus petit → Enveloppe plus large
- e. Plus fragile, difficile à aligner, coupler, connecter
- f. Plus cher que multimode



4.6 Différences de transfert d'une même impulsion dans chaque type de fibres



4.7 Comparaison de performance entres les types de fibres



5 Ouverture numérique (ON)

Suivant l'angle d'incidence d'un rayon lumineux sur l'interface cœur/enveloppe,

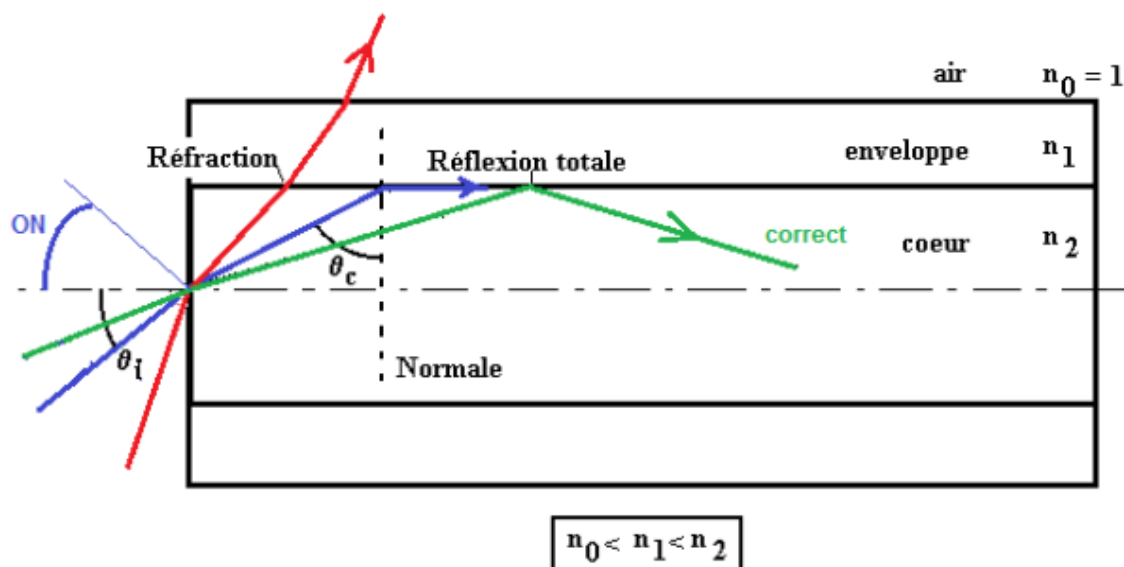
Le rayon peut-être soit transmis à l'enveloppe par réfraction et ensuite à l'air (tjs réfraction) soit se propager par suite de multiples réflexions dans le cœur de la fibre.

Ce dernier cas ne sera possible que si l'angle d'incidence est **plus grand** que l'angle critique.

! L'ouverture numérique s'assure qu'un signal rentre dans la fibre mais surtout, qu'il y reste. !

Cherchons l'angle critique :

$$ON = \sin \theta_l$$



Application de la Loi de Snel/Descartes :

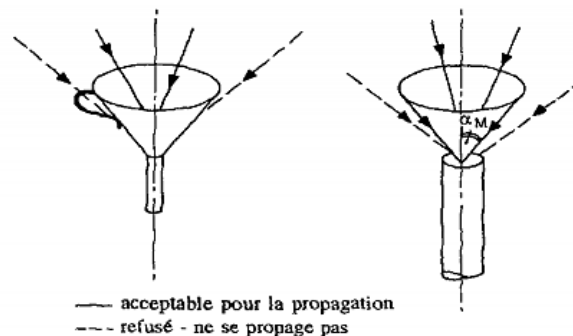
$$\begin{aligned} n_0 \sin \theta_i &= n_2 \sin(90^\circ - \theta_c) \\ &= n_2 \cos \theta_c \\ &= n_2 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} \\ &= n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} \\ &= \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \end{aligned}$$

$$\sin \theta_i = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_2^2 - n_1^2} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \quad \text{car } n_0 = 1 \text{ (air)}$$

$$ON = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$$

L'angle solide d'angle au sommet Θ_t est appelé **Cône d'acceptance**.

Le cône d'acceptance signifie que tous les rayons lumineux se présentant sur la fibre avec un angle plus petit ou égale à l'angle d'acceptance Θ_t , seront guidés dans la fibre.

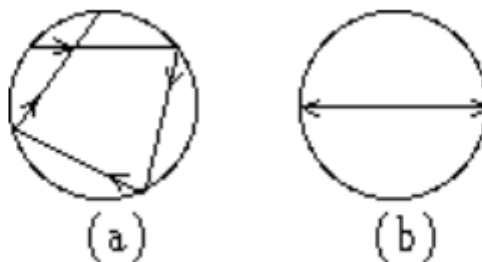


- Pour couper la lumière dans la fibre, la lumière doit impérativement converger dans le cône et l'image de la source doit présenter une dimension du même ordre de grandeur que celle du cœur.
- Une petite image s'obtient en faisant converger tous les rayons lumineux.
- Les dimensions du cône sont fonctions de la différence entre les indices de réfraction des milieux constitutifs de la fibre.

6 Vitesse de déplacement dans la fibre

Les rayons lumineux se divisent en deux groupes :

1. Rayons hélicoïdaux qui ne coupent jamais l'axe.
2. Rayons méridionaux qui coupent l'axe périodiquement.



Rappel :

Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3.10^8$ m/s

Une lumière monochromatique circule à la vitesse de : dans l'air $\rightarrow n = 1,000293$

$$v = \frac{c}{n}$$
$$m = m_0 \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

On ne peut pas dépasser la vitesse de la lumière \rightarrow Einstein $E = mc^2$ la masse croît avec la vitesse donc pour $v = c$ la vitesse serait infinie ?!

Vitesse de phase (V_p)

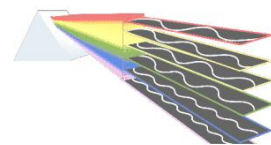
$$V_p = \frac{V}{\cos \theta_f}$$

Pour des fronts suffisamment oblique et des modes d'ordre assez élevé, $\cos \theta_f$ peut devenir inférieur à $1/n \rightarrow v_p > c$

En fait la vitesse effective dans le guide est inférieure à la vitesse de la lumière dans le cœur ($v = c/n$) et donc à la vitesse de la lumière dans le vide (c)

Remarque importante :

Tout flux de rayonnement électromagnétique transportant des informations contient en fait une combinaison d'informations. En effet la variation de la vitesse et de l'indice de réfraction avec la fréquence engendre ce que l'on appelle **la dispersion**. (Ex : une lumière blanche qui traverse un prisme se décompose à la sortie en les 7 couleurs de l'arc-en-ciel car toutes les composantes ne sont pas réfractées avec le même angle.)



Ce type de dispersion est la **dispersion réfractive**. Cela permet d'introduire la différence entre vitesse de phase et vitesse de groupe.

En propagation guidée, la distinction entre vitesse de phase et vitesse de groupe existe même s'il n'y a qu'une seule fréquence.

Dans les fibres multimodes, **la dispersion intermodale** s'ajoute à la dispersion réfractive. (Chaque mode a sa propre vitesse de phase et de groupe).

Dans les fibres monomodes, phénomène semblable, **la dispersion intramodale**.

7 Complément sur les sources d'atténuation dans les fibres

Ces atténuations ont pour sources :

- L'absorption du matériau, → *Impuretés*
- La diffusion dans les matériaux → *hétérogénéité de la structure de petite dimension*
- Les pertes de radiations → *irrégularités géométriques de l'interface cœur/enveloppe*

Remarques :

Les atténuations sont mesurées en dB.

8 Sectionnement et connectique des fibres

Les jonctions entre les liaisons optiques et le raccordement aux terminaux sont des sources d'atténuation importantes.

8.1 Pertes entre deux fibres différentes

Trois cas possibles :

1. L'ouverture numérique est différente → *Différence entre les deux indices de réfractions*
2. Diamètre des cœurs peut être différent entre 2 fibres.
3. La formes des cœurs est différentes.

8.2 Comment sectionner une fibre correctement ?

Avant de la sectionner il faut légèrement la fléchir à l'aide d'un gabarit afin d'avoir une surface plane de l'enveloppe. → Surface parfaitement plane

8.3 Comment souder deux fibres ensemble ?

Trois procédés :

1. Soudure par fusion
 - a. Parfaitement alignée, fusion faite avec arc électrique, supprime réflexion de Fresnel pertes : 0,10dB
2. Soudure mécanique
 - a. Permet d'avoir un alignement parfait, enduites d'un gel pour supprimer l'air, réduit réflexion de Fresnel, pertes : 0,30dB
3. Utilisation de connecteurs.

8.4 S'assurer d'un bon alignement

1. **L'entaille en V** : permet d'assurer un alignement parfait, le moins couteux mais le plus efficace.
2. **Avec un microscope** : Vue large de la zone
3. **LID (Light injection and detection)** : Injecte un flux lumineux dans le cœur d'une des fibres.
4. **PAS (Profil alignment system)** : Dirige une lumière perpendiculairement au fibres.
5. **Alignement mécanique** : Trois points d'axe

Monomode plus facile à aligner qu'une multimode.

8.5 Terminaison des fibres

Les fibres sont fournies avec seulement une terminaison. Par conséquent il faut installer un dispositif de connexion de l'autre côté.

8.6 Les connecteurs pour fibres optiques

Le rôle des connecteurs est de pouvoir coupler différentes fibres entre elles.

Les pertes doivent être minimisées. Celle-ci on comme source :

1. Niveau de tolérance dans les connecteurs
2. Niveau de tolérance dans la fibre
3. Couplage entre deux types de fibres différentes

Perte de l'ordre de 0,3dB.

8.6.1 Type de connecteurs

1. **ST**
2. **SC**
3. **FDDI**
4. **ESCON**

Ils ont en embout de 2,5mm soit :

- En céramique : Meilleur mais fragile
- En plastique : mois cher, durée de vie courte
- Acier inoxydable : Solide, longue vie

8.7 Dispositifs associés

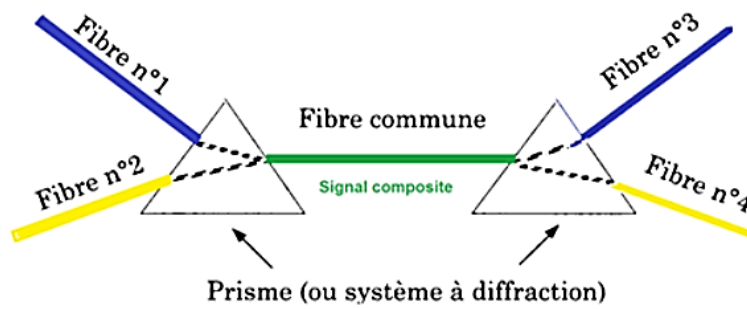
1. Adaptateurs : Permette de passer d'un type de connecteur vers un autre
2. Splitters, coupleur : Divise ou combine un/deux faisceau(x)
3. Interrupteurs tout ou rien : Combinaison de splitter et coupleur en Y

8.7.1 WDM (Wavelength Division Multiplexing = Multiplexage de longueur d'onde)

Ce procédé ne fonctionne qu'avec les fibres optiques et les ondes électromagnétique

Pour utiliser au mieux les fibres optiques, on essaye de transmettre plusieurs signaux sur des faisceaux lumineux de longueur d'onde différentes.

WDM : Le principe est de doubler la bande passante en modifiant l'émetteur et le récepteur.



Principe du multiplexage en longueur d'onde (WDM).

8.7.1.1 DWDM

L'on peut avoir encore plus de source que dans la WDM

En DWDM il est possible de parcourir entre 100 et 160km sans régénérer le signal.

8.7.1.2 CWDM

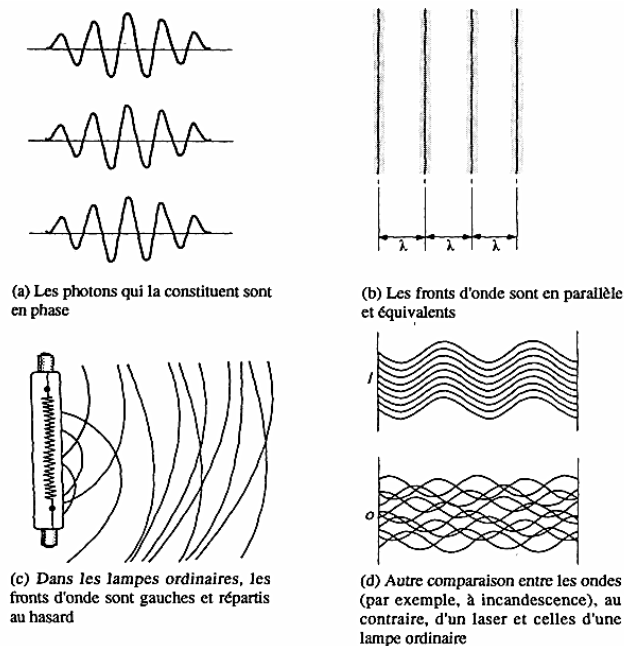
- Moins cher que la DWDM
- Pas le laser régulière en température

La différence entre ces 3 principes est **l'espace entre chaque porteuse**.

Les lasers

1 Introduction

Un laser produit des rayons lumineux de même longueur d'onde, qui se propage en phase dans la même direction.



La lumière laser est donc monochromatique et cohérente.

Cette cohérence de la phase, présente dans les sources radiofréquence et micro-ondes, est absente dans les DELs. Ces dernières sont relativement cohérentes pour avoir une longueur d'onde mieux définie qu'une source de lumière ordinaire.

1.1 Quelques mots sur l'étude du faisceau laser

1.1.1 Opération sur les faisceaux

Opérations possibles sur le faisceau laser :

- Modulation d'intensité,
- Déflexion,
- Contrôle de la section,
- Correction d'astigmatisme,
- Optimisation de la focalisation,
- Atténuation statique,
- Séparation en sous faisceaux,
- Purification du faisceau,
- Filtrage du bruit, ...

1.1.2 La Cohérence

1.1.2.1 *La cohérence temporelle*

Cohérence temporelle : *Fréquence unique et phase stable.*

Pour obtenir une cohérence temporelle la plus grande possible, il ne faudrait qu'un seul mode longitudinale → Une seule raie de largeur réduite → monochromaticité parfaite.