

# Propagation des ondes électromagnétique

# Plan

- Le phénomène de propagation
- Propagation libre et guidée
- Les structures de guidage
- Les différents types de fibre optique
- Retard sur une ligne de transmission
- Déphasage introduit par un câble
- Modèle électrique d'une ligne
- Grandeurs caractéristiques d'un câble coaxial
- L'équation des télégraphistes
- Les solutions de l'équation des télégraphistes
- La ligne adaptée
- Répartition de la tension sur une ligne adaptée
- Impédance d'entrée d'une ligne adaptée
- Coefficient de réflexion sur la ligne de transmission
- Outils d'analyse : ABAQUE DE SMITH

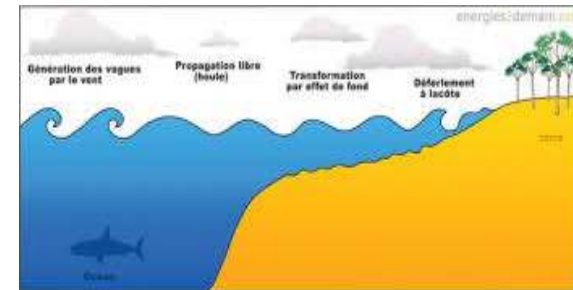
# Introduction

## I. Propagation d'une onde dans un milieu matériel

### Concept d'onde

Le concept d'onde permet de parler en terme physico-mathématiques de phénomènes aussi divers que :

#### Les vagues à la surface de l'eau



**Onde sonore** (ondes sonores considérées comme des ondes de pression se propageant dans l'air)

**La lumière** (de nature électromagnétique, combinaison de deux champ, électrique et magnétique, dont le couplage est régi par les équation de Maxwell)



# I. Propagation d'une onde dans un milieu matériel

Une particule n'occupe à chaque instant qu'un seul point de l'espace. Les équations du mouvement de la particule sont des équations différentielles par rapport au temps.

Alors qu'une onde est caractérisée par son amplitude  $S(r,t)$  et sa fréquence, définie en tout point de l'espace-temps. A chaque instant l'onde est présente en plusieurs point de l'espace.

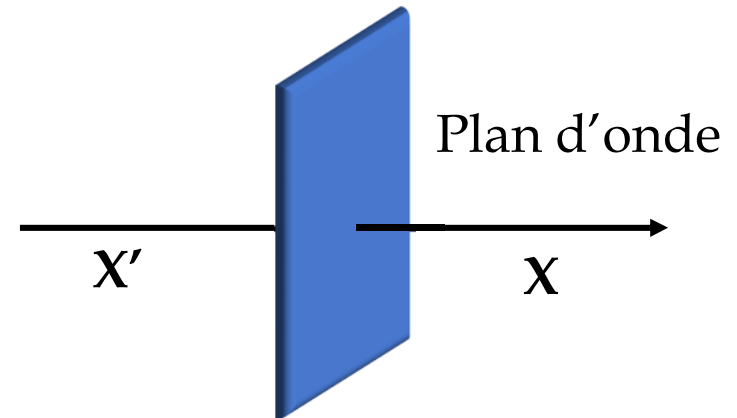
Le lieu des points où l'amplitude  $S(r,t)$  de l'onde prend simultanément une même valeur est la surface d'onde.

La surface d'onde se déplace en bloc au cours du temps. Ce déplacement est régit par des équations dites équations de propagation.

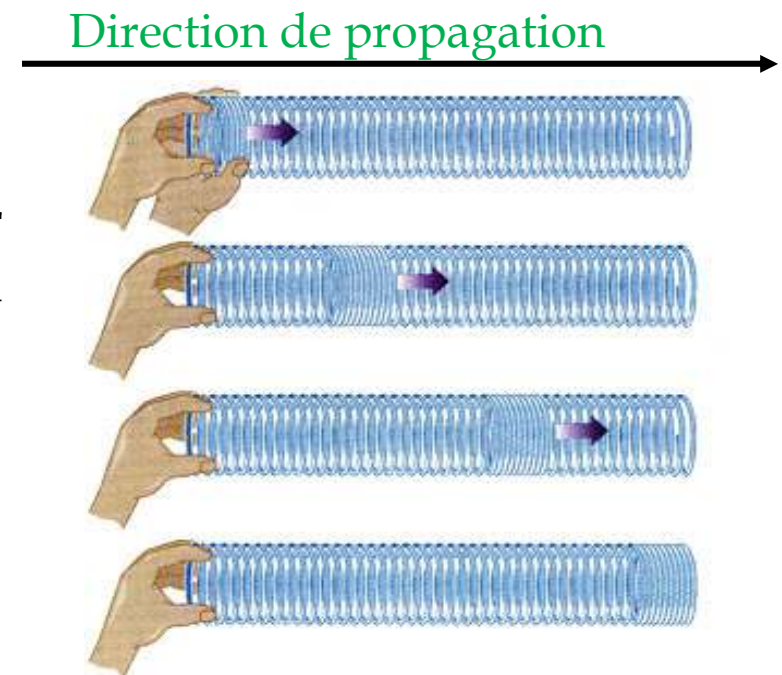
Les équations de propagation font intervenir les dérivées de l'amplitudes  $S(r,t)$  par rapport aux à l'espace et à celle du temps.

## II. Différents types d'ondes

a. **Les ondes planes:** La grandeur  $S(r, t)$  qui se propage possède à chaque instant la même valeur en tout point **d'un plan** perpendiculaire à la direction de propagation Plan d'onde

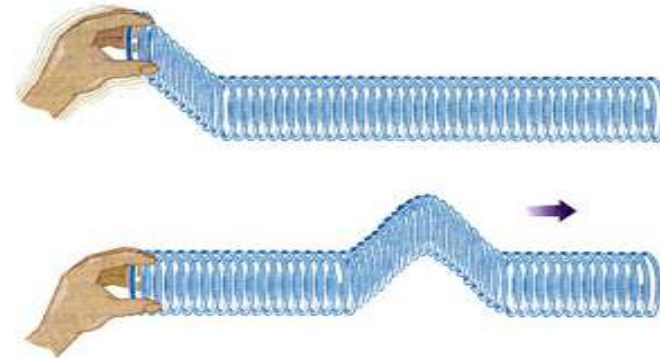


b. **Les ondes longitudinales:** la grandeur  $S(r,t)$  a une seule composante qui est la direction de propagation.



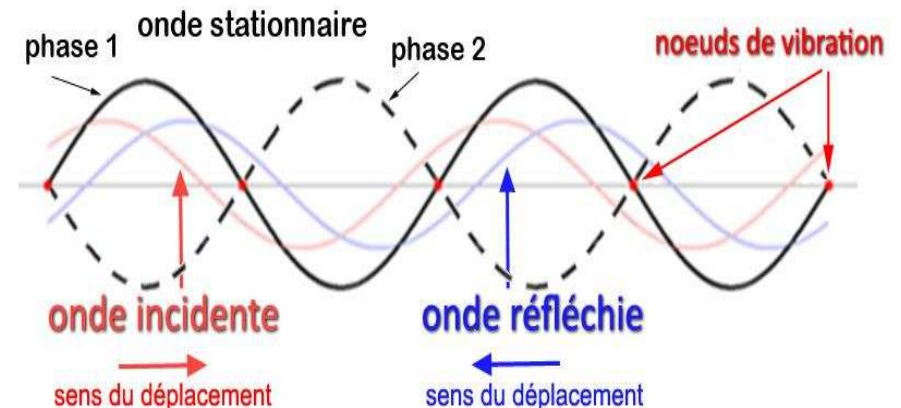
## II. Différents types d'ondes

c. **Les ondes transversales :** La grandeur physique n'a pas de composante selon la direction de propagation



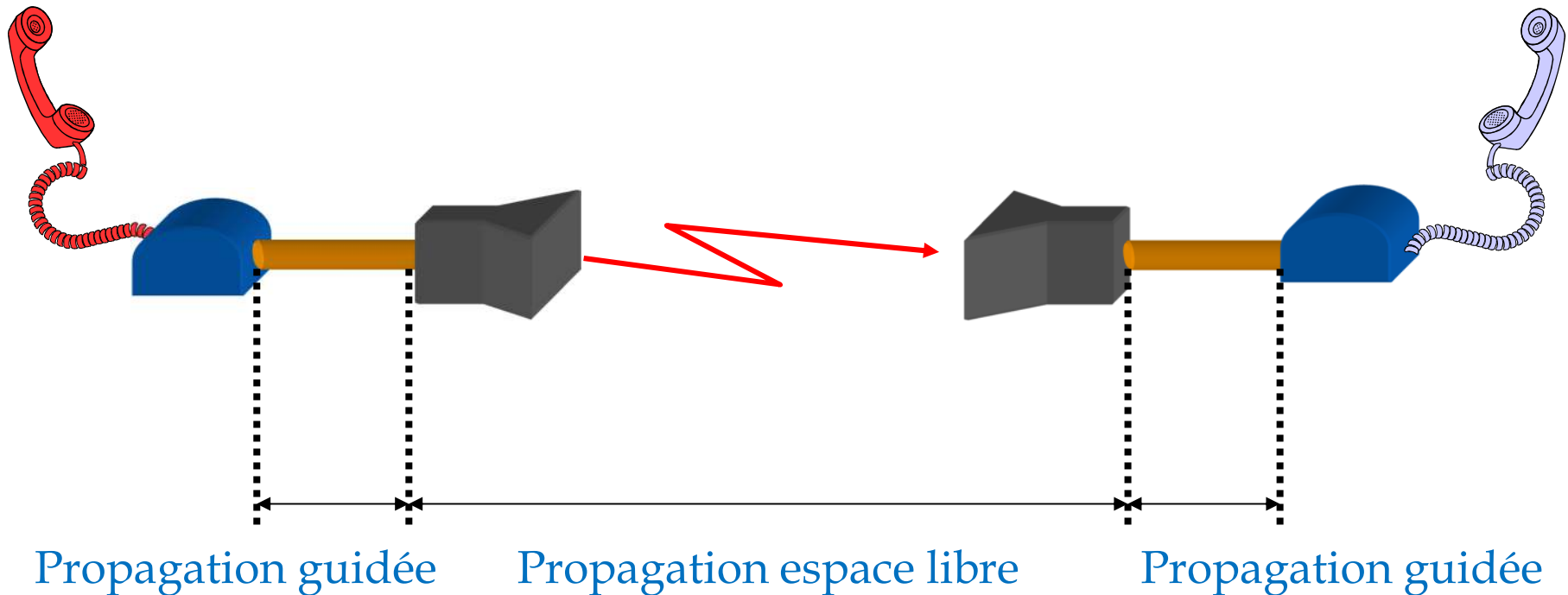
d. **Les ondes progressives:** la grandeur physique  $S$  se propage dans un milieu physique. Il n'y a pas d'ondes dans le sens opposé

e. **Les ondes stationnaires:** est le phénomène résultant de la superposition de deux ondes de même amplitude de même fréquence se propageant dans des sens opposés.



### III. Types de propagation des ondes

On distingue deux types de propagation :



### III. Types de propagation des ondes



#### Propagation filaire

Réseau Téléphonique Commuté (RTC)

Réseau par courant porteur (PLC)

Câble

Fibre optique

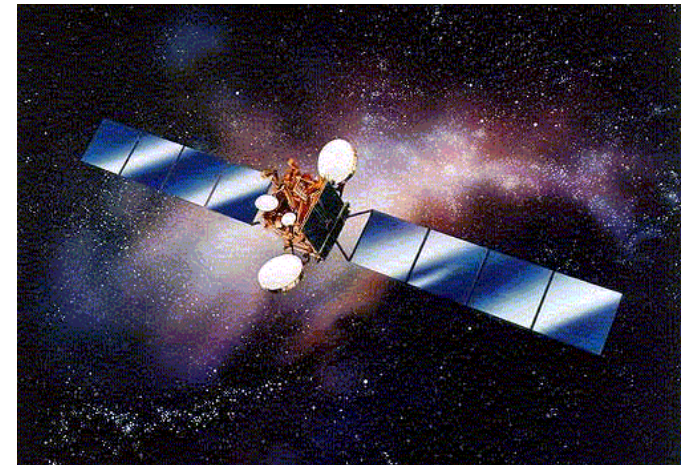
#### Propagation hertzienne

Liaison satellite

Téléphonie mobile (GSM, DCS, GPRS, UMTS)

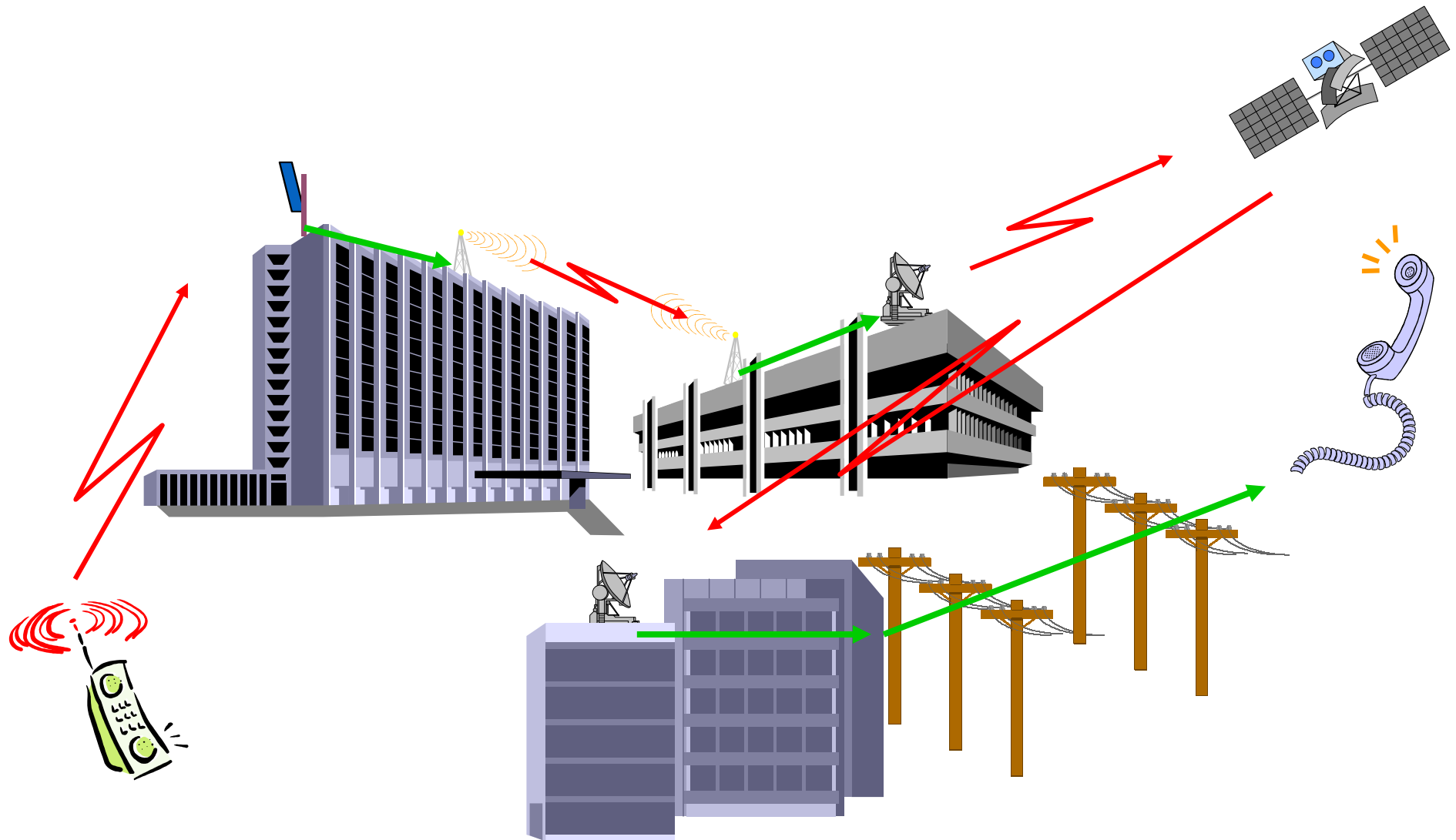
Réseaux locaux sans fil (WLAN, UWB)

Boucle Locale Radio (WiMax)





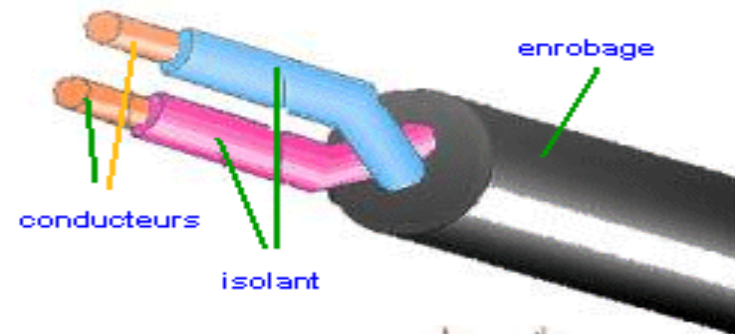
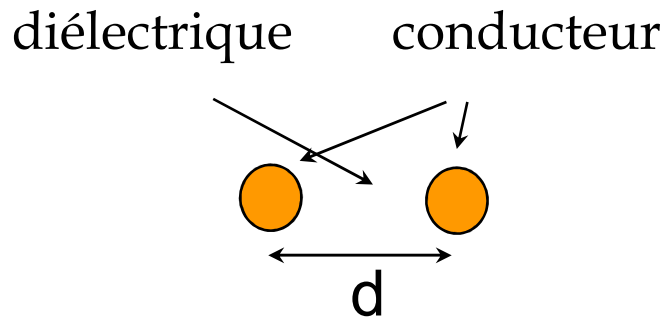
### III. Types de propagation des ondes



## IV. Les principaux types de lignes

Pour guider une onde électromagnétique plusieurs techniques sont utilisées :

### 1. Ligne bifilaire



**Exemple** : caractéristiques d'une ligne bifilaire UTP données par le fabricant

tension de service : 300 V

type de l'isolant : polyoléfine

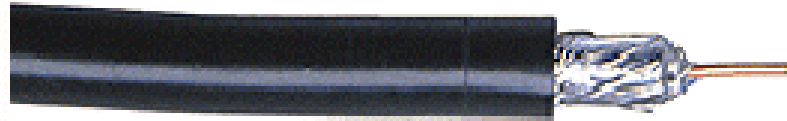
impédance caractéristique :  $Z_c = 100$  ohms

Capacité entre conducteurs pour 1 mètre de ligne :  $C = 56$  pF/m

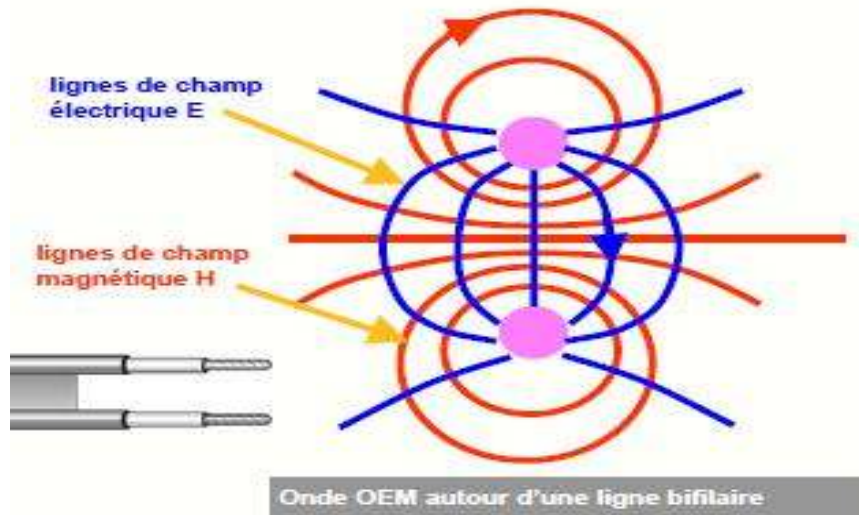
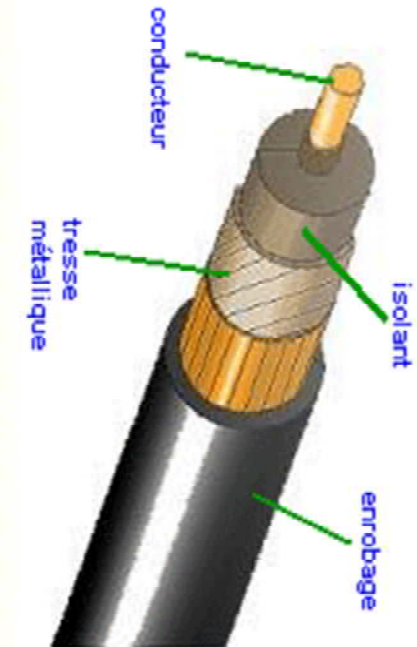
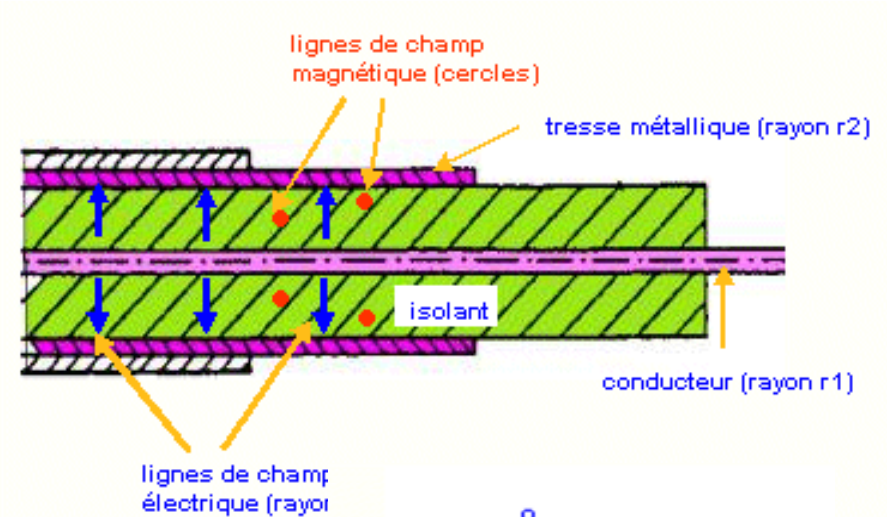
atténuation : 6,6 dB pour 100 m à 10 MHz

vitesse de propagation du signal :  $v = 180\,000$  km/s =  $c/1,7$

## 2. Câble coaxial



il est constitué d'un conducteur central et d'une tresse périphérique isolant  
ces deux conducteurs sont séparés par un diélectrique isolant  
l'onde OEM se propage entre le conducteur central et la tresse  
les lignes de champ électrique E sont des rayons  
les lignes de champ magnétique H des cercles

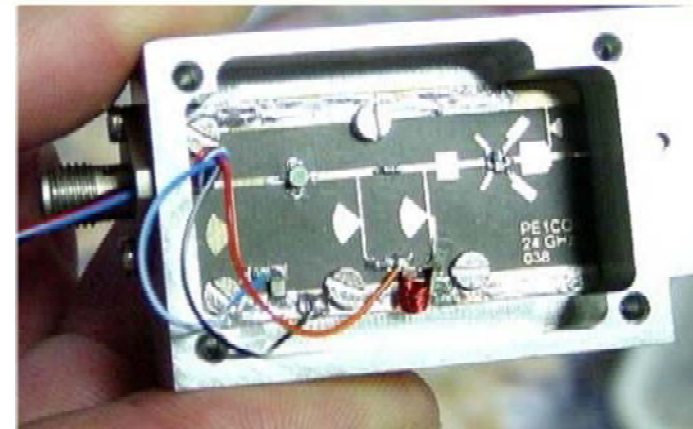
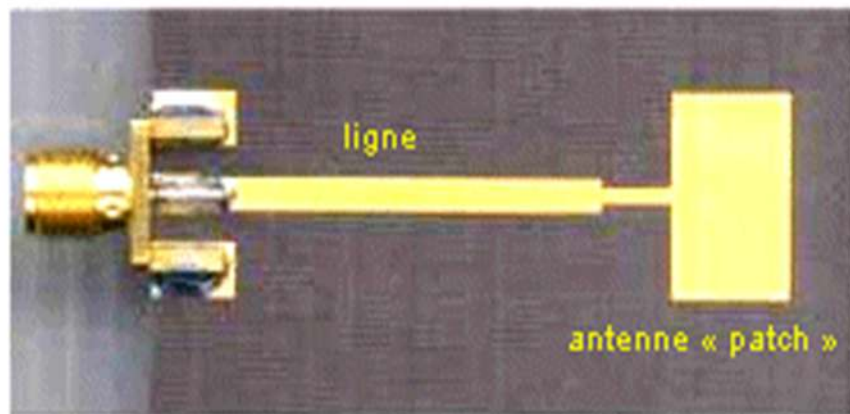
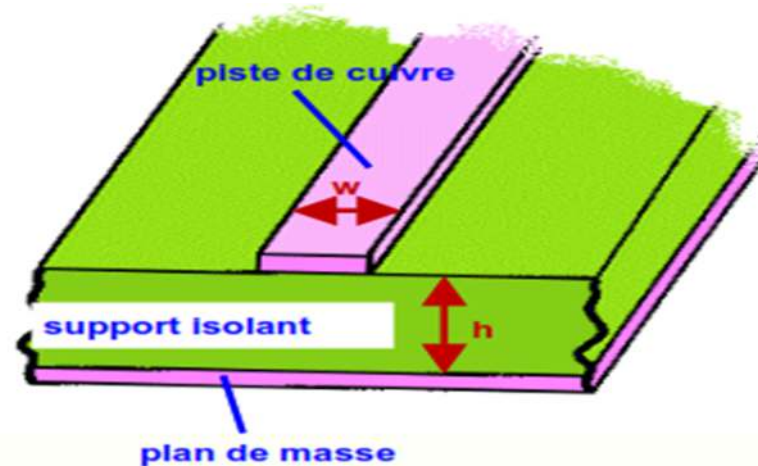


Exemple :  
entre l'antenne TV et le poste de télévision ;  
dans le réseau câblé urbain ;  
dans certains câbles sous-marins et liaisons téléphoniques

### 3. Lignes Micro-ruban (Microstrip line )

La **ligne imprimée** ou microstrip est très utilisée pour relier entre eux des composants RF sur un circuit imprimé, dès que la longueur de la piste est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du signal transporté:

- elle est constitué d'une **piste en cuivre** et d'un plan de masse
- ces deux conducteurs sont séparés par un **diélectrique isolant** ( époxy, téflon)
- l'onde OEM se propage au-dessus du plan de masse autour de la piste



### 3. Lignes Micro-ruban (Microstrip line )

- les lignes de **champ électrique E** vont de la piste au plan de masse
- les lignes de **champ magnétique** entourent la piste

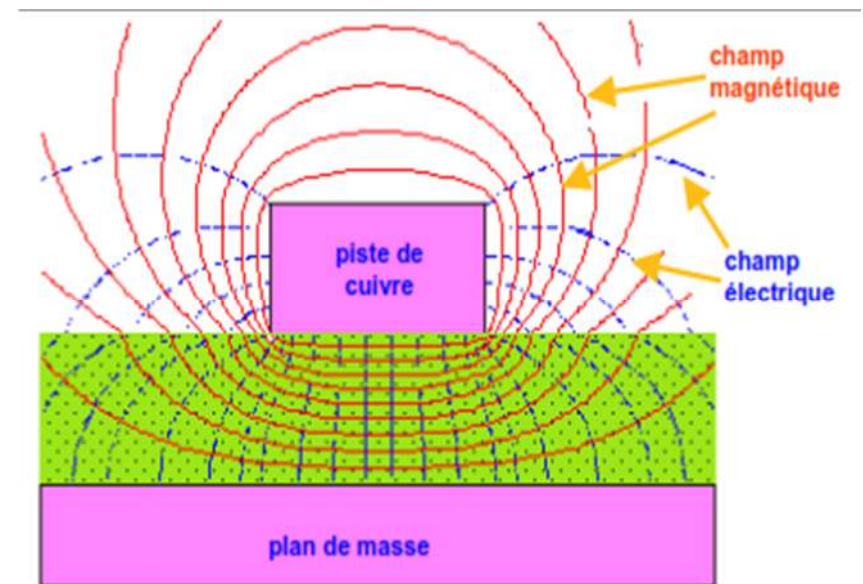
#### Exemple :

ligne imprimée sur époxy d'épaisseur standard  $h = 1,6$  mm

- largeur de la piste :  $w = 2,5$  mm
- impédance caractéristique :  $Z_c = 50$  ohms
- Capacité entre conducteurs pour 1 mètre de ligne :  $C = 120$  pF/m
- l'atténuation reste acceptable jusqu'à 2 GHz
- vitesse de propagation du signal :  
 $v = 160\,000$  km/s =  $c/1,9$

#### Avantages :

- Peu coûteuses
- Pertes acceptables
- Transmission : pour des faibles distances et faibles puissances.



## 4. Guides d'ondes métalliques

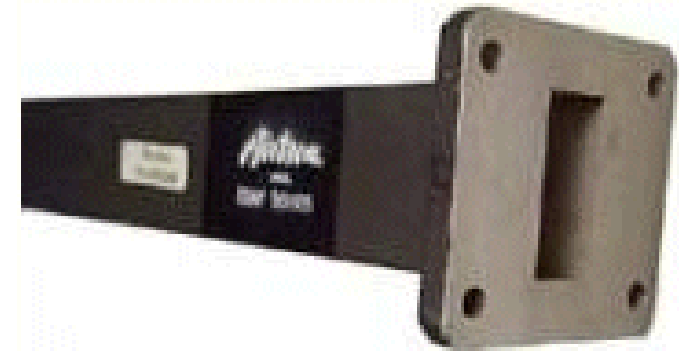
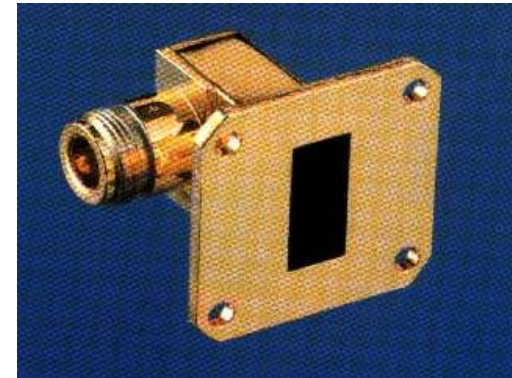
Le guide d'onde est un conducteur métallique creux de section rectangulaire, circulaire ou elliptique dans lequel se propage l'OEM :

le passage d'une ligne à un guide et inversement se fait à l'aide d'une antenne placée au bon endroit  
l'air étant un très bon diélectrique, les pertes liées à l'isolant sont très faibles  
pour un bon guide, les surfaces internes sont parfaitement polies, ce qui pose des problèmes de fabrication  
les guides de grande longueur restent d'un prix très élevé

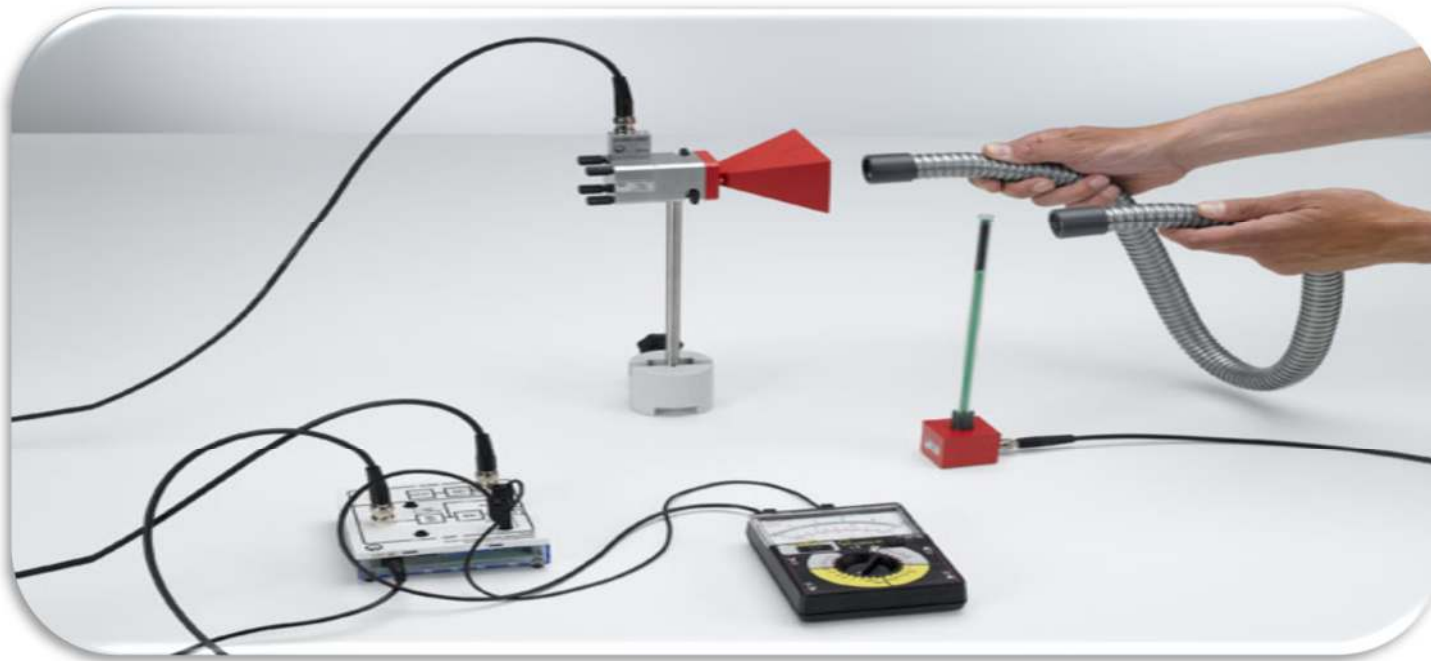
Tube métallique (diélectrique=air)

Pertes très faibles

Dimensions transverses de l'ordre de la longueur d'onde



## 4. Guides d'ondes métalliques



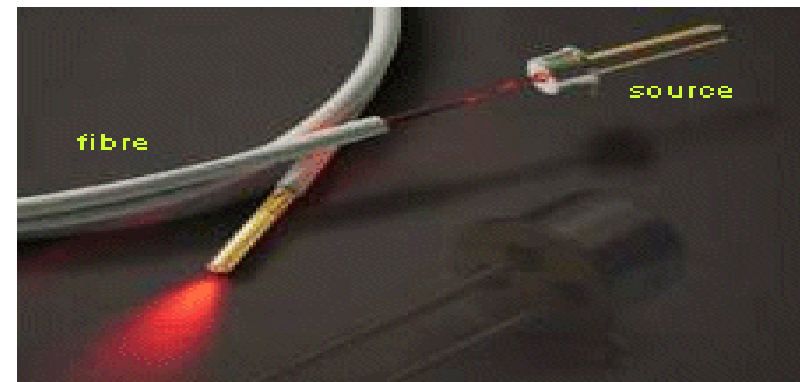
Utilisés lorsque :

- les puissances à transmettre sont élevées
- les distances à parcourir dépassent quelques décimètres.

## 5. Les guides d'ondes diélectriques

Il existe un autre type de guide d'onde, entièrement isolant, appelé guide d'onde diélectrique dans lequel l'onde électromagnétique se propage dans le verre ou le plastique : **la fibre optique**.

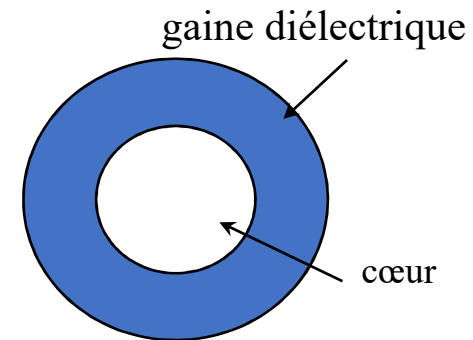
- Une **fibre optique** est un fil en verre ou en plastique très fin, qui a la propriété d'être un excellent guide de la lumière.
- Inventée dans les années 1960
- Ce guide d'ondes a d'abord été exploité dans le domaine médical pour réaliser des diagnostics in vivo (dans le corps du malade), et pour le traitement de certaines pathologies par effet thermique, tels que :
  - i. pulvériser un calcul rénal,
  - ii. découper une tumeur ou réparer une rétine.





## 5. Les guides d'ondes diélectriques

La partie centrale (cœur) est un diélectrique, entourée par un autre diélectrique (gaine) de permittivité légèrement plus faible. La propagation s'effectue par réflexions successives à l'interface des 2 diélectriques. Aux fréquences optiques,



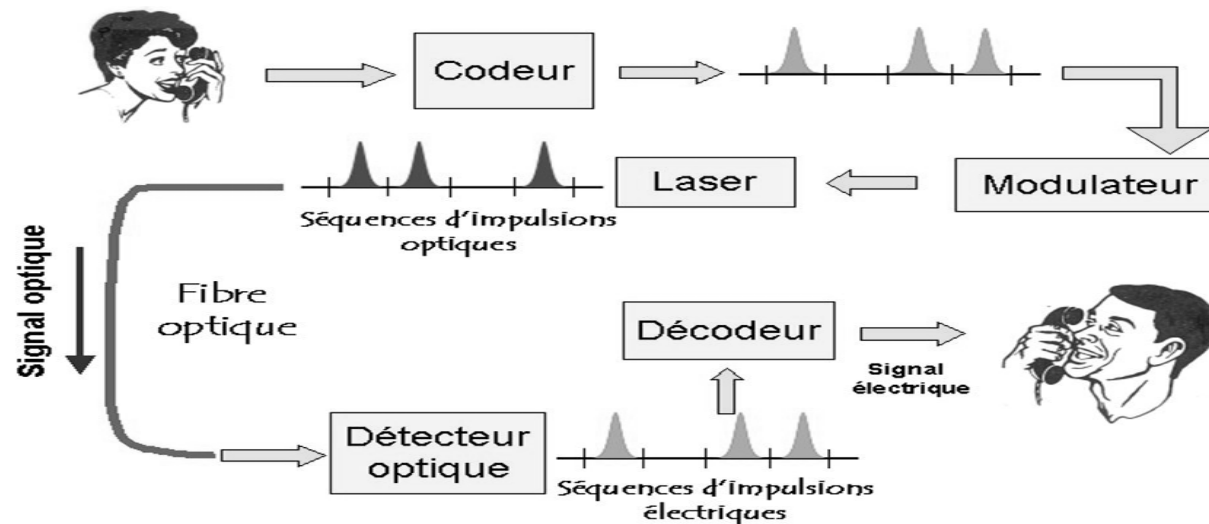
**fibres optiques**

- les applications de la fibre optique se sont rapidement développées, et se sont étendues à des domaines très divers, tels que les capteurs, **le câblage** et la **connectique** en **électronique** et **optoélectronique**, la **décoration**, ou le **transport d'informations**.

## 5. Les guides d'ondes diélectriques

### Caractéristique fibre optique :

- l'onde électromagnétique qui s'y propage est de très haute fréquence ( longueur d'onde comprise entre 0,4 et 1,5 microns )
- les dimensions du cœur varient entre le micron pour les fibres monomodes et plusieurs dizaines de microns pour les fibres multimodes
- la fibre a de nombreux avantages par rapport au câble coaxial: bande passante très large, pertes faibles, coût très bas



Principe de communication par fibre optique

## 5. Les guides d'ondes diélectriques

### Les différents types de fibres optiques

#### ❖ Les fibres multimodes :

- Propagent plusieurs modes qui ont des parcours différents, d'où distorsion de phase et déformation du signal transmis.
- à cause de leur diamètre plus grand, l'injection de lumière et le raccordement sont plus simples.

#### Les deux catégories de fibre optique multimodes

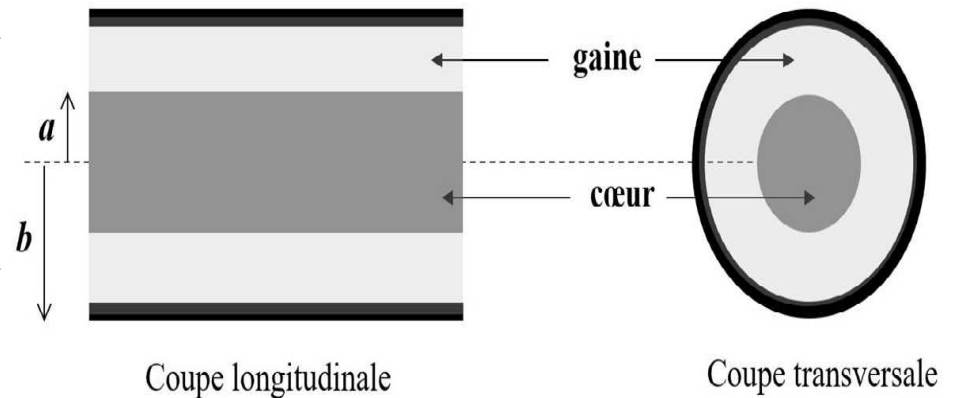
- ✓ Multimode à saut d'indice;
- ✓ Multimode à gradient d'indice.

## Les différents types de fibres optiques

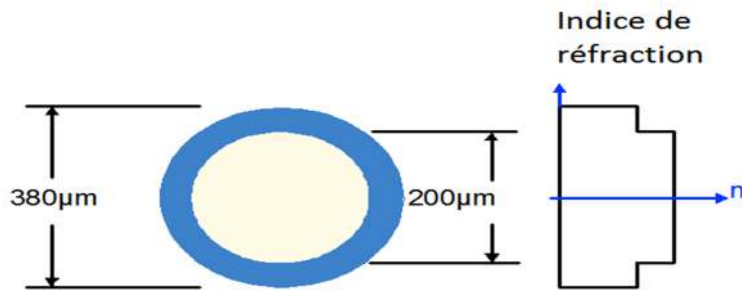
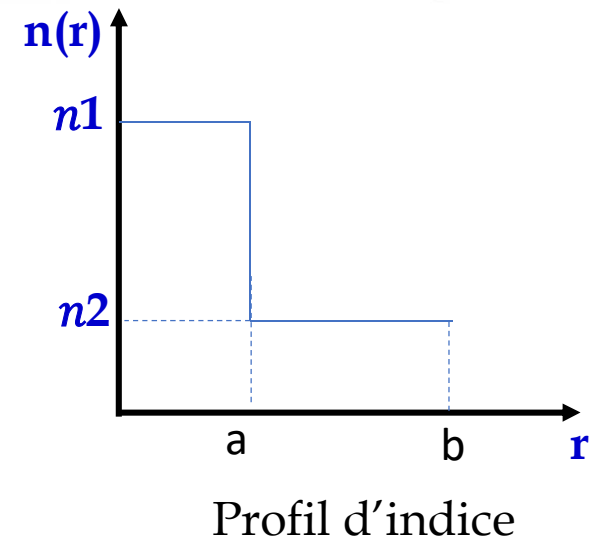
### Description physique de la fibre à saut d'indice

Le cœur de la fibre est constituée d'un matériau de silice amorphe légèrement dopé, d'indice  $n_1$ .

Il est entouré d'une gaine optique en silice légèrement dopée de manière à ce que son indice  $n_2$  soit très légèrement inférieur à celui du cœur.



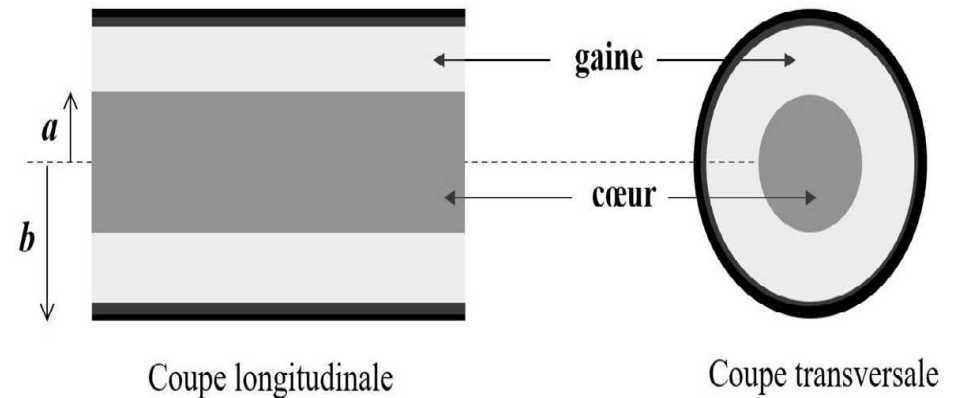
l'indice de réfraction reste constant dans le cœur et varie de manière brusque lorsqu'on passe du cœur à la gaine.



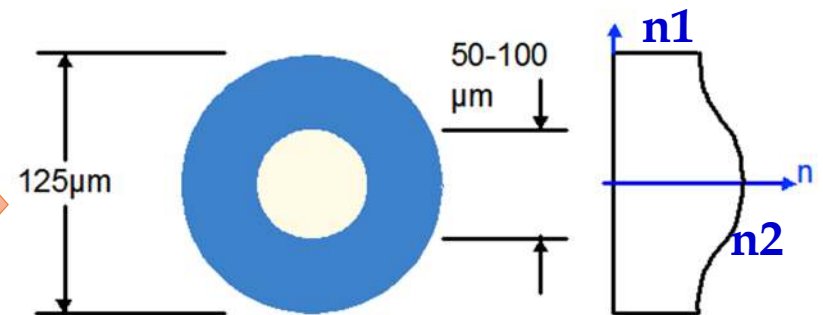
## Les différents types de fibres optiques

### Description physique de la fibre à gradient d'indice

est une fibre dans laquelle l'indice décroît graduellement dans la direction transversale de la fibre, du centre du cœur vers la gaine, jusqu'à atteindre la valeur de l'indice de réfraction  $n_1$  de la gaine.



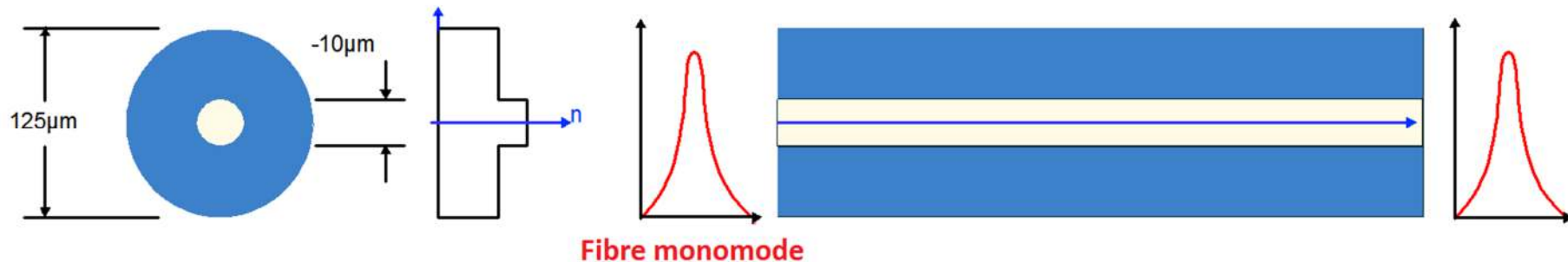
Le cœur se caractérise par un indice variable qui augmente progressivement de  $n_1$  à l'interface gaine cœur jusqu'à  $n_2$  au centre de la fibre.



## Les différents types de fibres optiques

### ❖ Les fibres monomodes:

- ne propagent que le mode fondamental et le parcours de l'OEM par réflexions successives à l'intérieur de la fibre, est unique et bien défini
- les signaux sont transmis sans déformations, ce qui est intéressant pour des signaux analogiques



La fibre monomode possède un cœur très fin, de la taille d'un cheveu !

L'atténuation sur ce type de fibre est quasi nulle, c'est ce qui en fait sa force.

Débit: environ 100 Gbit/s

Portée maximale: environ 100 Km

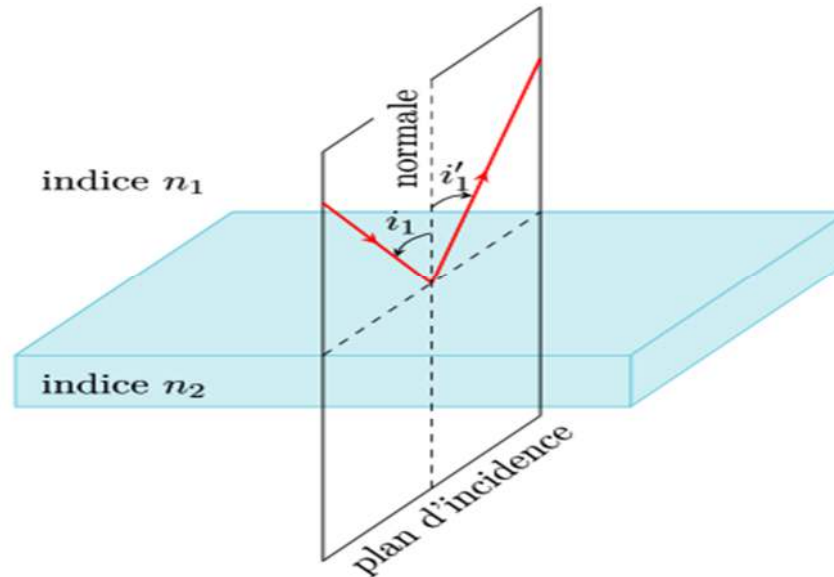
Affaiblissement: 0,5 dB/Km

# Lois de réflexion et de réfraction

## Réflexion

On parle de réflexion lorsqu'un rayon lumineux change brutalement sa direction tout en restant dans le même milieu de propagation. L'expérience montre les lois de réflexion suivantes :

- i. Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale à la surface sont dans le même plan appelé plan d'incidence.
- ii. Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux  $i_1 = i'_1$



Si le milieu d'incidence est le plus réfringent, il existe un angle d'incidence limite au-delà duquel il n'y a plus de lumière réfractée : il y a réflexion totale.

## Réfraction

On parle de réfraction lorsqu'il y a un changement de la direction de propagation de la lumière quand celle-ci traverse un dioptré et change donc de milieu transparent.

Définition

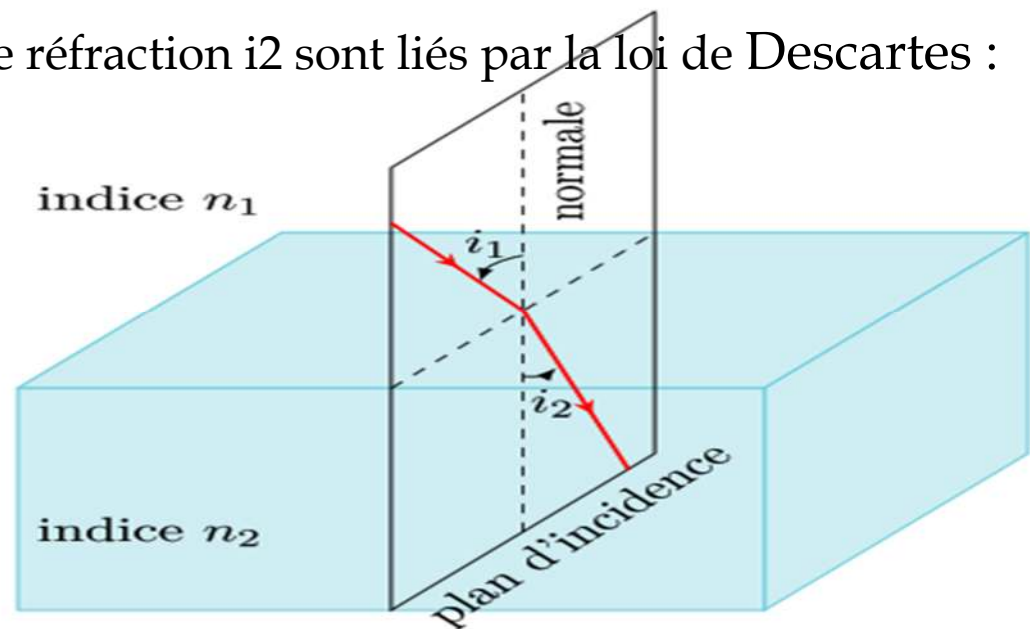
**Dioptré** : surface de séparation entre deux milieux transparents.

L'expérience montre que la réfraction obéit aux lois suivantes :

- i. Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale à la surface sont dans le même plan d'incidence.
- ii. Les angles d'incidence  $i_1$  et de réfraction  $i_2$  sont liés par la loi de Descartes :

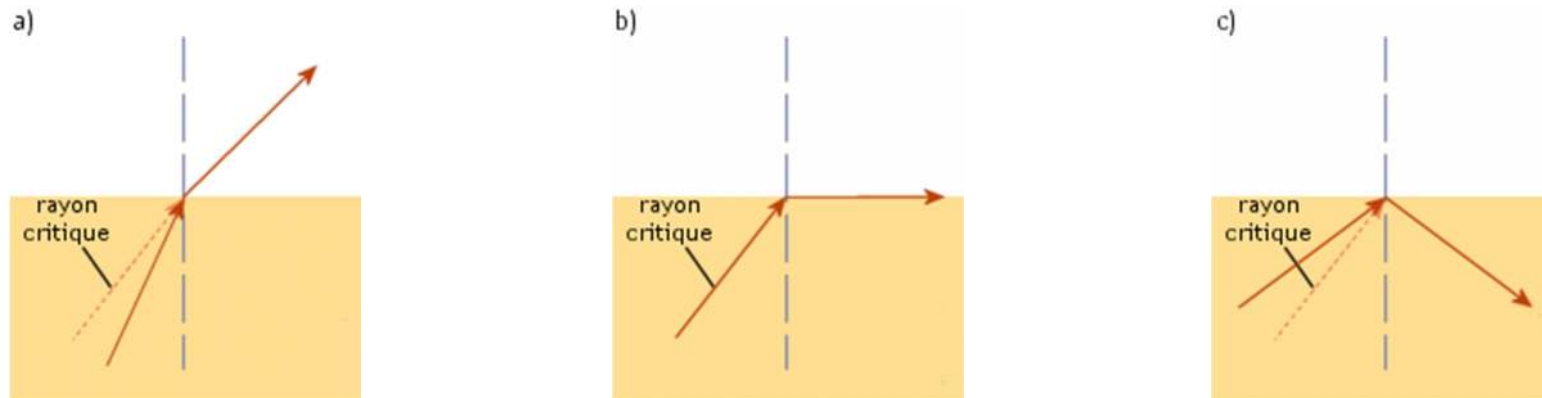
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

Passage du milieu  $n_1$  au milieu  $n_2$





## Réfraction



Dans la situation a), on assiste à un cas de réfraction basique, dans lequel on retrouve un rayon incident, puis un rayon réfracté.

Dans la situation b), cette fois-ci l'angle d'incidence est dit critique. Il s'agit de l'angle de réfraction maximal qui vaut  $90^\circ$ .

Dans la situation c), on retrouve un rayon dont l'angle d'incidence est supérieur à l'angle du rayon critique. Il s'agit d'un cas de **réflexion totale interne**.

# La Réflexion Totale Et Son Application À La Fibre Optique

## Angle d'incidence limite

Prenons par exemple le passage d'un rayon lumineux de l'air dans l'eau étant donné que l'eau est un milieu plus réfringent que l'air, le rayon réfracté va donc se rapprocher de la normale.

Plus l'angle d'incidence est grand, plus la déviation du rayon lumineux est importante. Pour un angle d'incidence de  $90^\circ$ , c'est-à-dire lorsque le rayon incident rase la surface de l'eau, l'angle de réfraction atteint sa valeur maximum: **c'est l'angle limite de réfraction.**

déterminer la valeur de l'angle limite de réfraction?

En considérant que l'indice de réfraction de l'air,  $n_1$  vaut 1 et celui de l'eau,  $n_2$  vaut  $4/3$ .

## Exercice 1 :

Un faisceau de lumière blanche tombe sur le diamant avec un angle d'incidence  $i=45$ .

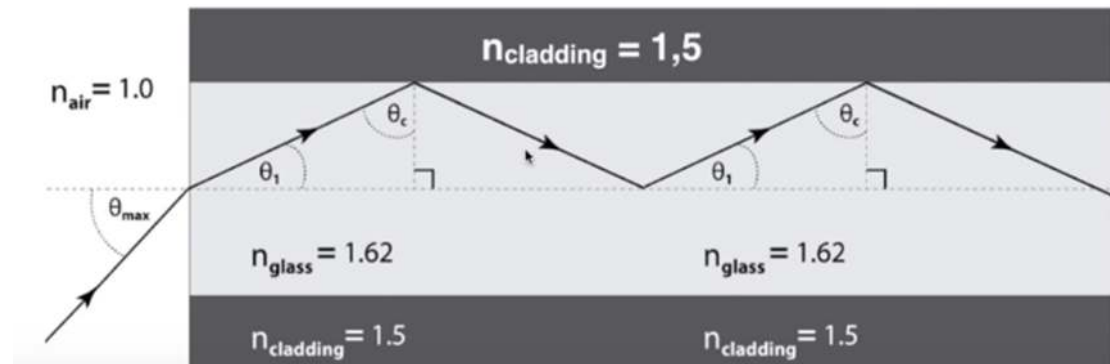
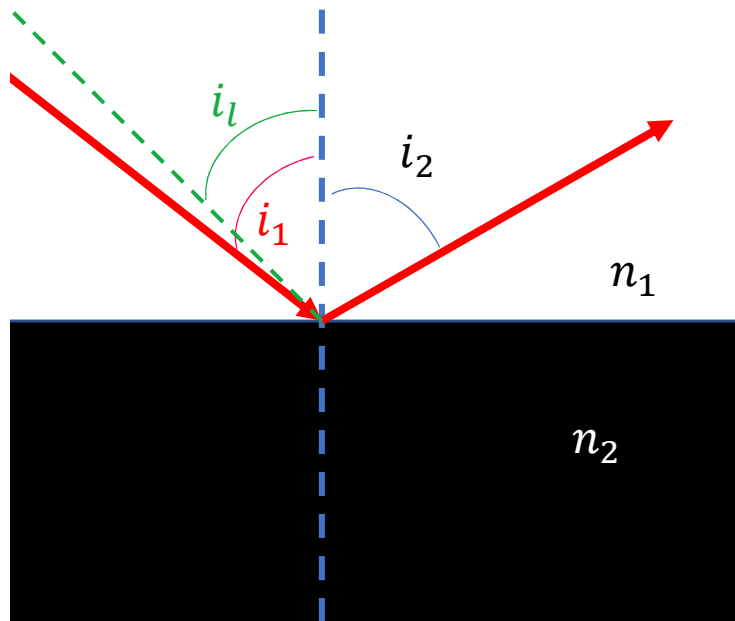
Le diamant a un indice  $n_R=2,435$  pour le rouge de longueur d'onde 486 nm et un indice  $n_J=2,417$  pour le jaune de longueur d'onde 589 nm.

Déterminer l'angle que le rayon rouge et le rayon jaune forment à l'intérieur du diamant.

## La Réflexion Totale Et Son Application À La Fibre Optique

Phénomène de réflexion totale si :

- ❖ L'indice de réfraction du second milieu traversé est inférieur à celui du 1<sup>er</sup> milieu traversé :  $n_1 > n_2$ .
- ❖ Si l'angle d'incidence  $i_1$  est supérieur à une certaine valeur appelé « angle d'incidence limite » noté  $i_l$ .

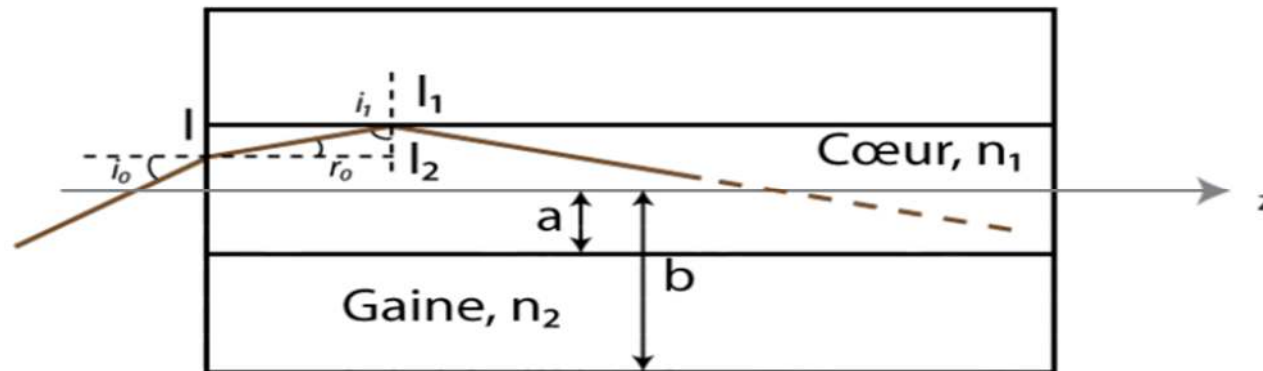


*Phénomène de réflexion totale dans une fibre optique*

## La Réflexion Totale Et Son Application À La Fibre Optique

### Exercice 2 : La fibre optique à saut d'indice :

Pour guider la lumière dans une direction donnée, on réalise des fibres optiques, longs fils cylindriques dont l'indice diminue quand on s'éloigne de l'axe. La lumière suit la direction moyenne de l'axe grâce au phénomène de réflexion totale, à condition que le faisceau incident ait une ouverture angulaire convenable. Dans le modèle qui suit, on considère que la fibre est constituée d'un cœur cylindrique de rayon  $a$ , d'indice  $n_1 = 1,510$  et d'une gaine de rayon extérieur  $b$ , d'indice  $n_2 = 1,495$ .



1. Un rayon incident se propage dans l'air dans un plan axial de la fibre et arrive en I, à une distance ( $OI < a$ ) de l'axe, sur une extrémité de la fibre, sous un angle d'incidence  $i_0$ . On note  $i_1$  l'angle que fait le rayon avec la normale séparant la gaine du cœur. Déterminer la condition sur  $i_1$  tel qu'il y a guidage dans la fibre.
2. Exprimer la relation entre  $i_0$  et  $i_1$ .
3. En déduire la condition sur  $i_0$ , de la forme  $\sin(i_0) < \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ , permettant le confinement du rayon dans la fibre.

## IV. Analyse des circuits hyperfréquences

L'analyse des circuits hyperfréquences se fait en fonction de la théorie de propagation des ondes.

Pourquoi ?

- A hautes fréquences, les équations typiques des circuits électriques ne s'appliquent pas. La longueur d'onde des signaux est du même ordre de grandeur que les dimensions des circuits.
- En fait, les équations typiques des circuits électriques sont une généralisation de la théorie des micro-ondes.
- On est typiquement intéressé à la puissance, la tension, le courant et l'impédance, qui peuvent être exprimés en termes de concepts de théorie des circuits.

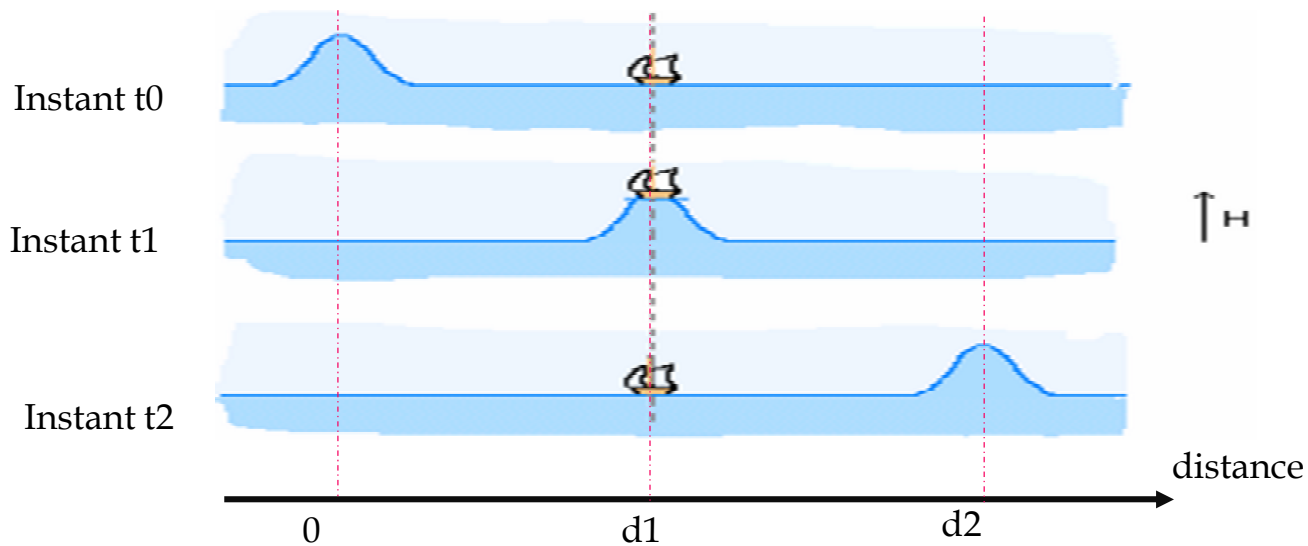
## V. La ligne de propagation - Analyse par la théorie des circuits

La démarche est la suivante :

- i. Construction d'un modèle de la ligne de propagation.
- ii. Etablissement des équations différentielles couplées régissant la propagation d'une onde de tension ou de courant sur la ligne.
- iii. Résolution des équations différentielles couplées en régime harmonique : ondes progressives et régressives, vitesse de phase, longueur d'onde.
- iv. Caractéristiques des ondes : mise en évidence des concepts d'impédance caractéristique, d'exposant de propagation, et de coefficient de réflexion.
- v. Introduction d'outils d'analyse : abaque de Smith, paramètres S.
- vi. Analyse temporelle de phénomènes de propagation : résolution des équations différentielles dans le domaine temporel.

## VI. Phénomène de propagation d'onde

La **propagation des ondes** est un phénomène physique dont découlent l'évolution et la progression d'une onde au sein d'un milieu, ou encore certains mouvements d'une particule dans l'espace et le temps.





## VI. Phénomène de propagation d'onde

On dit qu'une grandeur  $f$  scalaire ou fonction vectorielle des variables de l'espace  $(x,y,z)$  et du temps  $(t)$  se propage si sa valeur en un point de l'espace  $(x_0,y_0,z_0)$  à l'instant  $(t_0)$  se retrouve en un point quelconque  $(x,y,z)$  à l'instant  $(t)$  et en vérifiant :

$$dt = t - t_0 = \frac{\Delta d}{v}$$