

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mousfa-Benboulaïd- Batna 2-
Faculté de la technologie
Département d'Electronique

Supports de Transmission

SUPPORT DE COURS

Présenté par

Dr. Randa BEDRA

L'année universitaire : 2019-2020

Semestre : 5

Unité d'enseignement : UED 3.1

Matière : Supports de transmission

VHS : 22h30 (cours : 1h30)

Crédits : 1

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

Les canaux et les supports de transmission forment la partie centrale des systèmes de télécommunications. Ils affectent souvent les signaux transmis par différents types de perturbations et de dégradations dues essentiellement à leurs caractéristiques. Connaître ces supports de transmission est une nécessité absolue pour les étudiants en télécommunications.

Connaissances préalables recommandées :

La communication analogique. Les applications des télécommunications.

Contenu de la matière :

Chapitre 1. Caractéristiques des supports de transmission :

Bande passante, atténuation, sensibilité aux bruits, impédance caractéristique, coefficients de réflexion, de transmission et rapport d'onde stationnaire (TOS), Utilisation de l'abaque de Smith.

Chapitre 2. Conducteurs électriques :

Coaxiaux, paires torsadées,

Chapitre 3. Fibres optiques :

Caractéristiques, types de fibres optiques, avantages,

Chapitre 4. Faisceaux Hertziens :

Généralités, principales fréquences et bandes ou canaux, liaisons satellite

Chapitre 5. Faisceaux infrarouges :

Références bibliographiques:

1. C. Servin ; Réseaux et Télécoms ; Dunod, 2006.
2. G. Pujolle, Cours réseaux et télécoms : Avec exercices corrigés, 3^e édition ; Eyrolles, 2008.
3. G. Barué ; Télécommunications et Infrastructure ; Ellipses, 2002.

Chapitre 1. Caractéristiques des supports de transmission :

1. Introduction :

L'infrastructure d'un réseau, la qualité de service offerte, les solutions logicielles à mettre en œuvre dépendent largement des supports de transmission utilisés. Les supports de transmission exploitent les propriétés de conductibilité des métaux (paires torsadées, câble coaxial), celles des ondes électromagnétiques (faisceaux hertziens, guides d'onde, satellites) ou encore celles du spectre visible de la lumière (fibre optique). Généralement on classe les supports en deux catégories :

- Les supports guidés (supports cuivre et supports optiques) ;
- Les supports libres (faisceaux hertziens et liaisons satellites).

La complexité des systèmes provient généralement du fait qu'une liaison peut emprunter différents supports (figure 1).

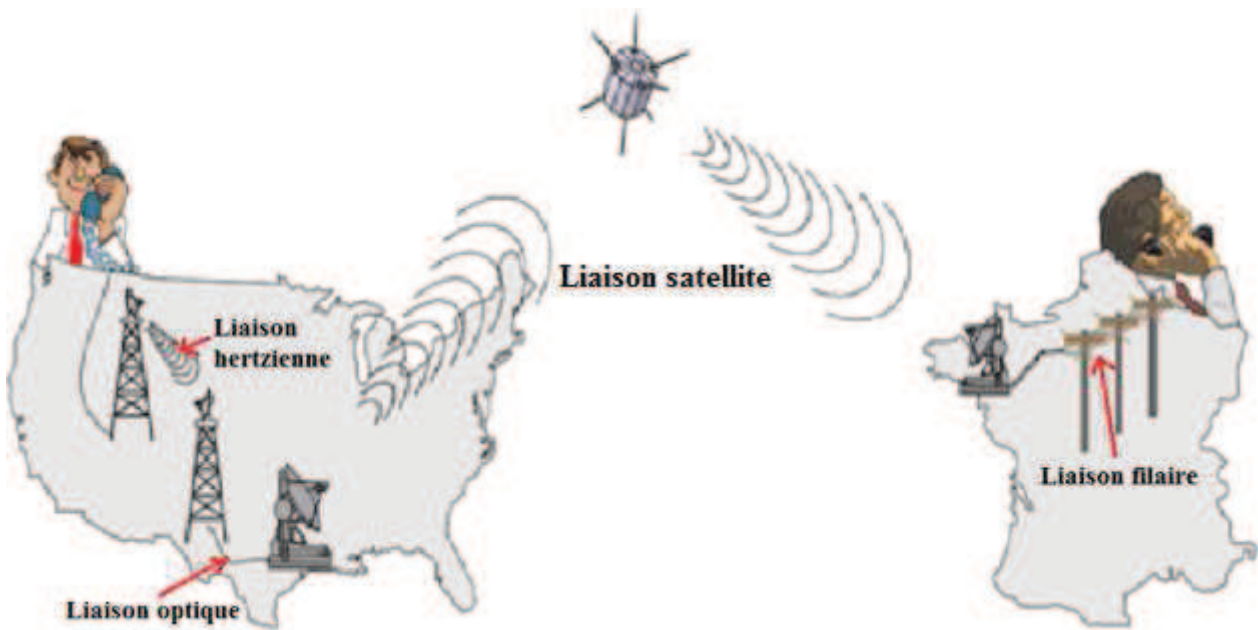


Fig. 1: Une liaison de transmission met en œuvre plusieurs types de support.

Le système de transmission devra alors réaliser l'adaptation du signal à transmettre à chaque type de support utilisé. Les caractéristiques des supports diffèrent selon la nature physique de celui-ci et du mode de propagation choisi. Cependant, certaines caractéristiques sont communes à tous les types de support (bande passante...), d'autres sont spécifiques (impédance caractéristique...). Les supports sont à l'origine de nombreux problèmes de transmission, aussi il est important de bien en connaître les caractéristiques pour en comprendre l'utilisation et prévenir les différents problèmes d'exploitation pouvant survenir.

2. Définitions :

2.1. Support de transmission : Le support de transmission (Ligne ou canal de transmission) est un ensemble de deux ou plusieurs conducteurs acheminant de concert un signal électrique, d'une source (ou émetteur) vers une charge (ou récepteur).

Le support de transmission au sens de la propagation est la portion du milieu physique utilisée pour la transmission particulière étudiée.

Le canal de transmission au sens de la théorie des communications inclut le milieu physique de propagation et également des organes d'émission et de réception.

2.2. Vitesse de propagation :

Dans l'air ou le vide, la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique est de $C = 3\ 10^8$ m/s (299 792 458 m/s)

Dans un coaxial ou une fibre optique on observe que $v \approx 2\ 10^8$ m/s

Dans une paire torsadée v varie 0,5 à $2\ 10^8$ m/s

La longueur d'onde est définie par $\lambda = v/f$, celle-ci sera souvent inférieure à la longueur du support de transmission et donc, induira éventuellement des phénomènes d'écho.

2.3. Décibels : Le décibel ou dB (10° du bel) est une unité logarithmique sans dimension. Elle exprime le rapport entre deux grandeurs de même nature.

Si P_2 et P_1 sont deux puissances, le rapport en décibel de P_2 sur P_1 s'écrit :

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

(Gain si positif et atténuation si négatif)

Elle fut renommée décibel en 1923 ou 1924 en l'honneur du fondateur du laboratoire et pionnier des télécoms, Alexander Graham Bell.

2.4. Le rapport signal sur bruit (RSB) (SNR en anglais): est le rapport des puissances du signal, P_S , et du bruit, P_B .

$$RSB = \frac{P_S}{P_B}$$

Ou, en dB :

$$RSB_{dB} = 10 \log \left(\frac{P_S}{P_B}\right)$$

Où log est le logarithme décimal.

La sensibilité d'un récepteur est l'amplitude du signal qu'il faut appliquer à son entrée pour obtenir à la sortie du démodulateur un rapport signal/bruit déterminé (transmission analogique) ou un taux d'erreur donné en transmission numérique (10^{-3} ou 10^{-6}).

Signification : C'est la puissance minimale en dessous de laquelle la qualité de la liaison est dégradée : craquements importants (« friture ») pour une liaison audio, image dégradée en transmission vidéo (« neige »), taux d'erreur important en transmission numérique (« pixellisation » ou « figeage » de l'image en TV vidéo numérique).

2.5 Débit binaire : quantité d'information par seconde. Exprimé en bit par seconde.

2.6. Mode de liaisons :

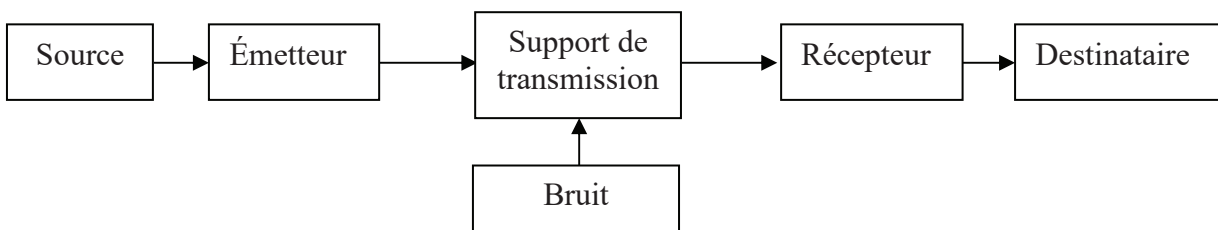
a. Simplex : Nom donné aux liaisons unidirectionnelles, c'est-à-dire qui ont toujours lieu dans le même sens, de l'émetteur vers le récepteur.

b. Semi-duplex (half-duplex) ou à l'alternant: nom donné aux liaisons bidirectionnelles qui transforment l'émetteur en récepteur et vice versa, la communication changeant de sens à tour de rôle.

c. Duplex (full-duplex) : nom donné aux liaisons bidirectionnelles simultanées, qui permettent une transmission simultanée dans les deux sens.

2.7. La chaîne de transmission :

Le schéma de base d'une chaîne de transmission peut être représenté par la figure 1



Les cinq éléments qui y figurent sont définis comme suit :

- La source produit le message à transmettre.
- L'émetteur produit un signal adapté au canal de transmission.
- Le canal de transmission constitue le lien entre émetteur et récepteur.
- Le récepteur capte le signal et recrée le message.
- Le destinataire traite le message reçu.

Tout l'enjeu consistera à choisir et concevoir adéquatement l'émetteur et le récepteur.

Avant de donner un aperçu plus détaillé de ceux-ci, précisons les notions de source et de canal.

2.8. Affaiblissement du signal :

Mesure le rapport entre la puissance du signal à l'entrée d'un système et celle en sortie. L'affaiblissement s'exprime en dB (décibel).

L'affaiblissement, exprimé en décibel (dB), est donné par la relation :

$$A = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)$$

P_1 : puissance du signal en sortie P_0 : puissance du signal de référence.

L'atténuation d'un support sera parfois calculée en néper: **1 neper = 8,69 dB**.

L'impulsion électrique représentative d'un élément binaire est affaiblie (atténuation) et déformée (distorsion) par le système de transmission (figure 2).



Fig.2: Déformation et atténuation du signal par le support de transmission

2.9. La bande passante :

C'est la plage des fréquences qui peuvent être transmises correctement sur un support de transmission. S'exprime en Hertz (Hz). Par exemple, la parole utilise les fréquences de 300 à 3400 Hz, et sa bande passante est de 3100 Hz.

La mesure de la puissance en sortie du système permet de tracer une courbe, dite **courbe de réponse en fréquence** (figure 3).

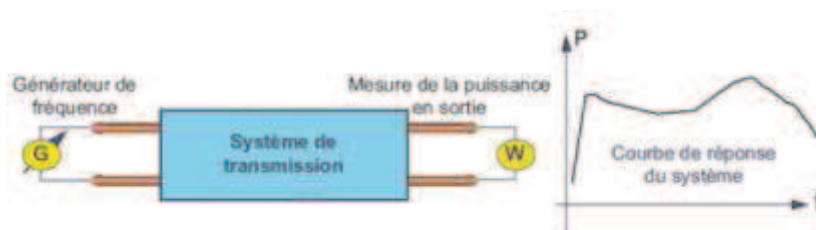


Fig. 3: Tracé de la bande passante d'un système.

La courbe de la figure 2 montre que le système de transmission n'atténue pas toutes les composantes de la même manière. Dans ces conditions, le signal en sortie du système n'est plus l'image de celui en entrée, on dit qu'il y a distorsion (figure 2), cette distorsion est dite d'amplitude. De même, on constate que toutes les harmoniques ne sont pas transmises dans les mêmes délais, la déformation qui en résulte est dite distorsion de phase. Les distorsions d'amplitude et de phase sont indissociables, cependant la distorsion d'amplitude est plus importante que la distorsion de phase.

Par conséquent, les systèmes de transmission (lignes, amplificateurs...) ne transmettent pas toutes les composantes du signal de façon identique. Les signaux sont transmis avec une distorsion faible jusqu'à une certaine fréquence appelée fréquence de coupure. Au-delà de cette fréquence, toutes les composantes sont fortement atténuées. On appelle bande passante (figure 2.7) l'espace de fréquences tel que tout signal appartenant à cet intervalle, ne subisse, au plus, qu'un affaiblissement déterminé par rapport à un niveau de référence prédéfini. L'affaiblissement, exprimé en décibel (dB), est donné par la relation :

$$A = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)$$

P_1 : puissance du signal en sortie P_0 : puissance du signal de référence.

La bande passante est définie pour une atténuation en puissance de moitié, ce qui correspond à -3 dB (figure 4).

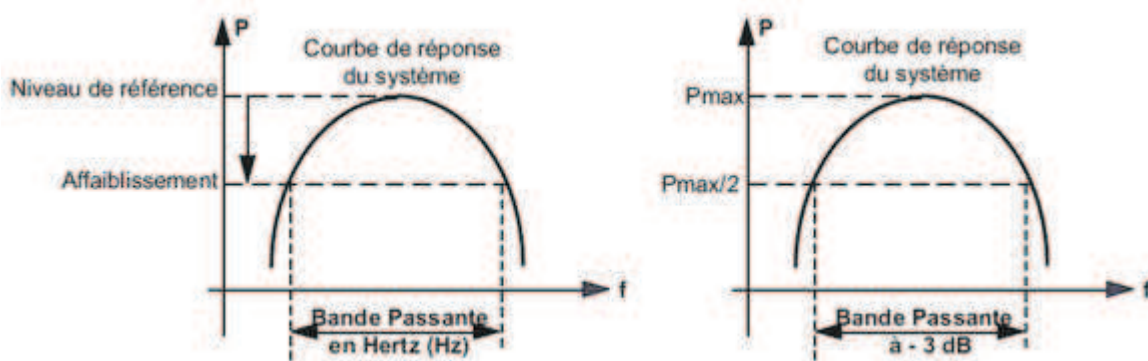


Fig.4: La bande passante à -3 dB.

Notons que le terme de bande passante est utilisé non seulement pour désigner un espace fréquentiel (bande passante en Hz), mais aussi pour qualifier le débit binaire d'un système (bande passante exprimée en bit/s).

3. Modélisation d'une ligne :

Une ligne de transmission est constituée de deux conducteurs de cuivre séparés par un isolant. La figure 5 modélise un élément d'une ligne en matérialisant ses composantes physiques. Elle présente au courant électrique un effet résistif (R) responsable de l'atténuation du signal, des effets réactifs qui se décomposent en effet selfique (L) et en effet capacitif (C), et enfin la conductance (G) qui exprime la perte par effet résistif entre les deux conducteurs (généralement négligeable).

Une ligne peut être assimilée à une succession de tronçons de longueur (dx).

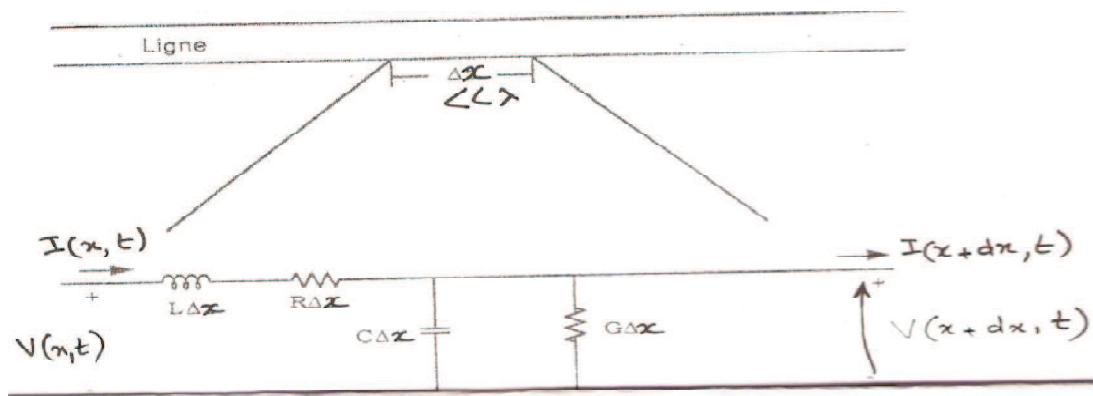
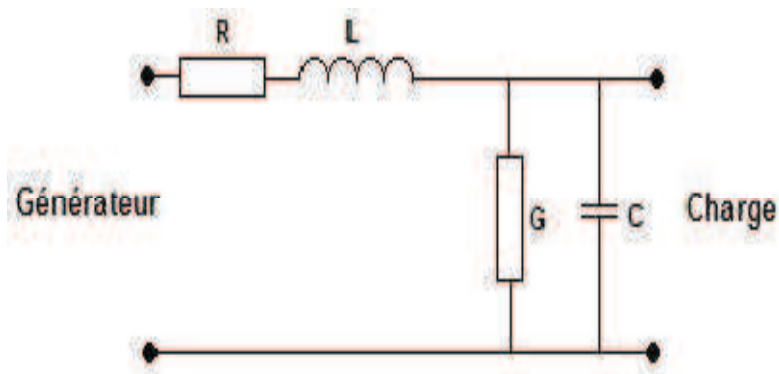


Fig.5 : Schéma équivalent d'un élément (dl) d'une ligne de transmission.

R, L, C, G sont les **paramètres primaires** de la ligne de transmission.

Le quadripôle équivalent est composé des paramètres (R, L, G, C pour dx).



| | |
|--|---|
| R : Résistance des conducteurs (Ω/m) | R : pertes ohmiques (conducteur) (Ω/m) |
| L : Inductance (H/m) | L : énergie magnétique emmagasinée (H/m) |
| G : Conductance (fuite des isolants) (Ω^{-1}/m) | G : perte diélectrique dans l'isolant |
| C : Capacité (entre les conducteurs) (F/m) | C : énergie électrique emmagasinée (F/m) |

$$\frac{du}{dx} = -(R + jL\omega) \cdot i(x) \quad \text{et} \quad \frac{di}{dx} = -(G + jC\omega) \cdot u(x)$$

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{d[(R + jL\omega) \cdot i(x)]}{dx} = (R + jL\omega) \frac{di}{dx} = (R + jL\omega) \cdot (G + jC\omega) \cdot u(x)$$

$$\frac{d^2u(x,t)}{dx^2} - LC \frac{d^2u(x,t)}{dt^2} - (RC + LG) \frac{du(x,t)}{dt} - RGu(x,t) = 0$$

C'est une équation différentielle de la forme $u''(x) - \gamma^2(x) = 0$ appelée **équation des télégraphistes**.

Avec $\gamma^2 = (R + jL\omega)(G + jC\omega)$ et dont la solution est :

$$u(x) = u_{(-)} e^{-\gamma x} + u_{(+)} e^{\gamma x} \quad (\text{Onde incidente} + \text{onde réfléchie}).$$

Equations des télégraphistes:

Equation des télégraphistes du tension:

$$\frac{d^2u(x,t)}{dx^2} - LC \frac{d^2u(x,t)}{dt^2} - (RC + LG) \frac{du(x,t)}{dt} - RG u(x,t) = 0$$

Equation des télégraphistes du courant:

$$\frac{d^2i(x,t)}{dx^2} - LC \frac{d^2i(x,t)}{dt^2} - (RC + LG) \frac{di(x,t)}{dt} - RG i(x,t) = 0$$

3.1. Paramètres secondaires :

a. Coefficient de propagation :

$$\gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)} = \alpha + j\beta$$

α est le facteur d'amortissement et β le facteur de phase.

α : Atténuation (neper/m) ; (1 neper = 8,69 dB)

β : Propagation (rd/m) d'où on peut tirer $v = \omega/\beta$

$$\alpha^2 = \frac{1}{2} [\sqrt{(R^2 + L^2\omega^2)(G^2 + C^2\omega^2)} + (RG - LC\omega^2)]$$

$$\beta^2 = \frac{1}{2} [\sqrt{(R^2 + L^2\omega^2)(G^2 + C^2\omega^2)} - (RG - LC\omega^2)]$$

A partir de ces résultats, on définit la vitesse de propagation ou vitesse de phase :

$$v_\varphi = \frac{\omega}{\beta}$$

b. Impédance caractéristique (indépendant de la longueur) :

On appelle impédance (Z) de l'élément de ligne de longueur (dl), le rapport (du/di). La notion d'impédance en courant alternatif recouvre une notion similaire à celle de résistance en courant continu, elle s'exprime en ohm (Ω). Le rapport du/di pour une ligne supposée de longueur infinie s'appelle **impédance caractéristique** notée (Z_c) en Ω :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$$

avec $\omega = 2\pi \cdot f$, où ω est la pulsation du courant exprimée en radian/s, et f , en Hz, la fréquence du signal.

Ligne sans pertes

Si $R = 0$ et $G = 0$, la ligne de transmission est sans pertes et les résultats précédents se simplifient :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\gamma = \sqrt{j^2 LC \omega^2} = j\omega\sqrt{LC}$$

$$\alpha = 0$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC}$$

Il n'y a pas d'affaiblissement si la ligne est sans perte. La vitesse de phase v_ϕ vaut :

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

4 Adaptation d'impédance :

En transmission de données, le temps de propagation ne sera pas négligeable devant la longueur d'onde du signal, il sera donc nécessaire d'assurer une adaptation aux extrémités du câble afin d'éviter un écho perturbant.

On montre (figure 6) qu'une ligne de longueur finie refermée sur un récepteur, dont l'impédance (Z_r) est telle que ($Z_r = Z_c$), se comporte comme une ligne de longueur infinie.

Le transfert de puissance est maximum entre le générateur et le récepteur. La ligne est dite adaptée (**adaptation d'impédance**).



Fig.6: Notion d'adaptation d'impédance.

4.1. Conséquence de la désadaptation d'impédance : l'écho

À chaque rupture d'impédance ($Z_r \neq Z_c$), le transfert de puissance n'est pas optimal, une partie de l'énergie incidente est réfléchi. Cette énergie (onde réfléchi ou écho) se combine à l'énergie incidente pour former des ondes stationnaires. En transmission numérique, l'écho a pour conséquence de générer des « bits fantômes », introduisant des erreurs de transmission. La figure 4.11 illustre un système complètement désadapté. A chaque point de raccordement une partie de l'énergie est réfléchi. La source reçoit deux fois le signal d'écho, le premier dû à la rupture d'impédance locale (écho local) est peu gênant. Le second dû à la rupture d'impédance distante (écho distant) est plus gênant, des dispositifs spécifiques (annuleur d'écho) ont en charge de supprimer les effets de cet écho.

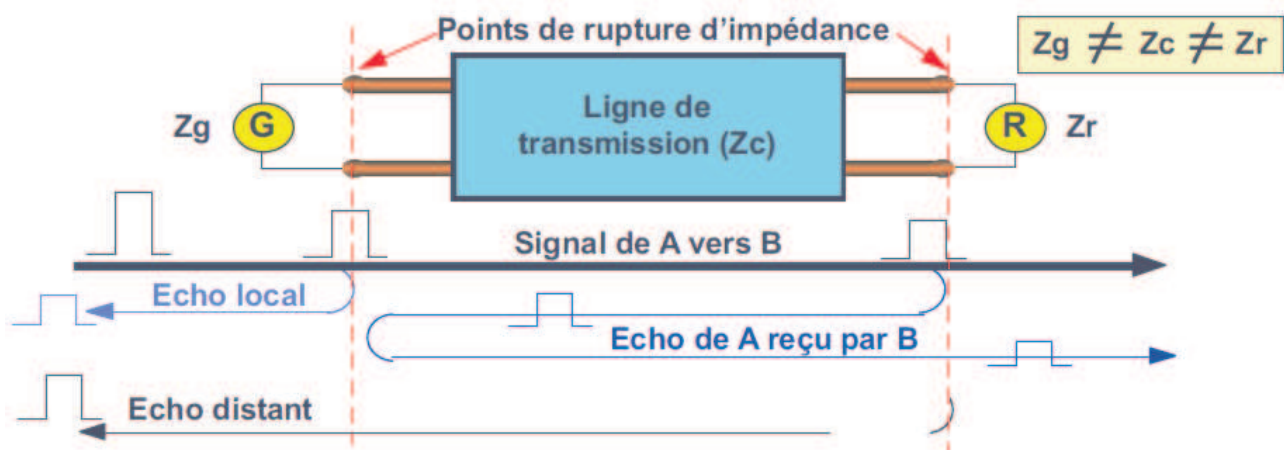


Fig.7: Notion d'écho.

Pour éviter ces réflexions parasites, il est nécessaire, tout au long de la ligne et à chaque raccordement d'un nouvel élément à la liaison, de réaliser la continuité de l'impédance : c'est l'adaptation d'impédance. Cependant, celle-ci n'est pas toujours réalisable. Par exemple, la ligne qui raccorde un usager à un réseau peut être en 2 fils, alors que la transmission dans le réseau de l'opérateur s'effectue en 4 fils (2 fils par sens de transmission), le passage de 2 à 4 fils provoque une rupture d'impédance et des échos. L'emploi d'annuleur d'écho est alors indispensable (figure 8).

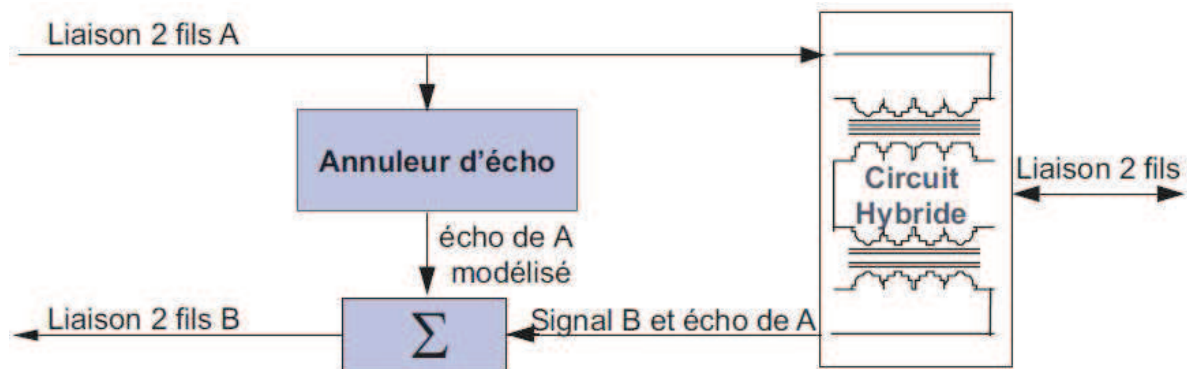


Fig.8: Principe de l'annulation d'écho.

Le filtre annuleur d'écho de la figure 8 réalise une estimation du signal d'écho en amplitude et phase (modélisation mathématique). Ce signal est ajouté en opposition de phase au signal de l'autre canal. Le système est symétrique pour les deux canaux de communication (injection d'une partie du signal B dans A).

5 L'onde stationnaire :

Pour un câble d'impédance (Z_c) fermé sur une impédance (Z_r) on définit :

Le taux d'ondes stationnaires (TOS) : $TOS = \frac{Z_r}{Z_c}$

Le coefficient de réflexion : $\Gamma = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c} = \frac{(TOS - 1)}{(TOS + 1)}$

Exemples :

- $Z_r = 0$ (court-circuit), $TOS=0$ et $\Gamma = -1$: réflexion totale avec inversion.
- $Z_r = \infty$ (ouvert), $TOS=\infty$ et $\Gamma = 1$: réflexion totale.
- $Z = Z_c$ (adaptation), $TOS=1$ et $\Gamma = 0$: onde incidente totalement absorbée.
- $Z_c = 50\Omega$ $Z_r=75\Omega$, $TOS=1.5$ et $\Gamma = 0.2$: réflexion de 20% de l'onde incidente.

6 Abaque de Smith

L'abaque de Smith constitue un outil largement utilisé dans le domaine des hyperfréquences. C'est un outil de calcul graphique permettant la représentation des grandeurs complexes vues sur une ligne de transmission.

Afin d'avoir un abaque indépendant de la valeur de l'impédance caractéristique de la ligne, l'abaque doit être normalisé par rapport à celle-ci. En général l'abaque est normalisé par rapport à 50Ω qui constitue le standard d'impédance en hyperfréquences.

La relation liant le coefficient de réflexion à l'impédance caractéristique et l'impédance de charge d'une ligne est donnée par:

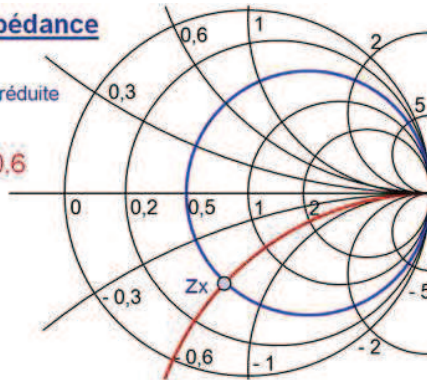
$$\Gamma = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c}$$

Utilisation de l'abaque de Smith.

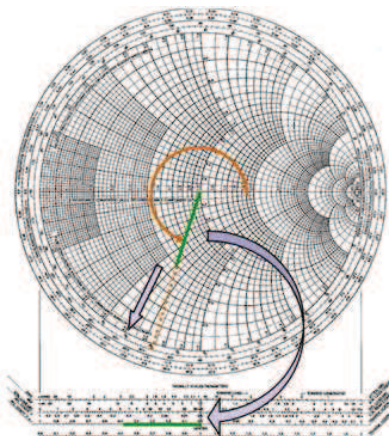
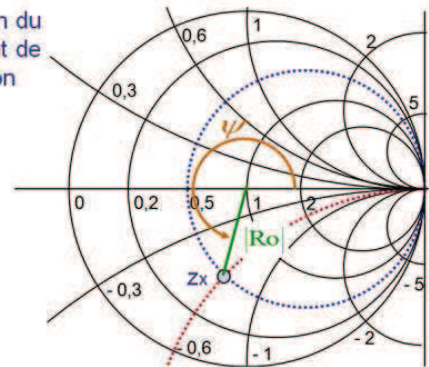
Si on connaît l'impédance

↳ Calcul de l'impédance réduite

Exemple : $z_x = 0.5 - j0.6$



⇒ Déduction du coefficient de réflexion



On trouve alors :

$$R_x = 0.48 e^{-j108^\circ}$$

On peut vérifier :

$$R_x = \frac{z_x - 1}{z_x + 1}$$

$$R_x = -0.15 - j0.46$$

Chapitre 2. Conducteurs électriques :

1. Introduction :

Les principaux types de supports de transmission :

On distingue trois grandes familles de supports de transmission:

- Les liaisons filaires (ou conducteurs électriques).
- Les liaisons hertziennes.
- Les liaisons optiques.

2. Paire bifilaire :

La ligne bifilaire est constituée de 2 fils conducteurs cylindriques identiques parallèles entre eux.

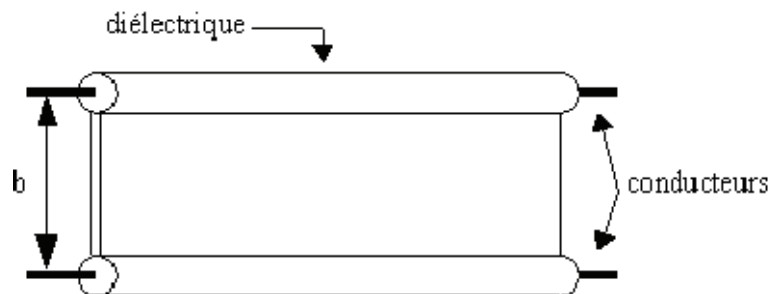


Figure 1 : Paire bifilaire

- peu coûteux,
- pertes élevées, débit limité.

3. Paire torsadées:

La paire torsadée ou symétrique est constituée de deux conducteurs identiques torsadés. Les torsades réduisent l'inductance de la ligne (L). Généralement plusieurs paires sont regroupées sous une enveloppe protectrice appelée gaine pour former un câble. Les câbles contiennent 1 paire, 4 paires (réseaux locaux), ou plusieurs dizaines de paires (câble téléphonique).

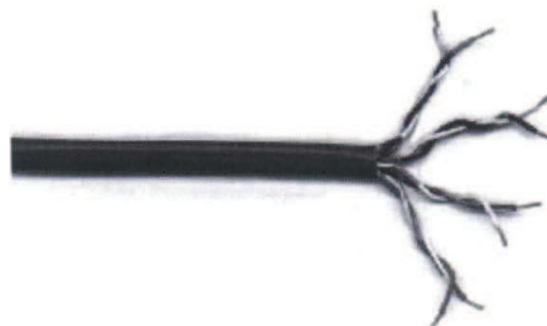


Figure 2 : Paires torsadées

Caractéristiques : Impédance caractéristique, bande passante et atténuation sont les caractéristiques essentielles des paires torsadées. Cependant, compte tenu de la proximité des différentes paires dans un câble, un phénomène spécifique apparaît : la diaphonie (figure 3).

4. La diaphonie: La diaphonie est due au couplage inductif entre paires voisines, correspond au transfert du signal d'un câble à un autre.

Elle limite l'utilisation de la paire symétrique à de faibles distances.

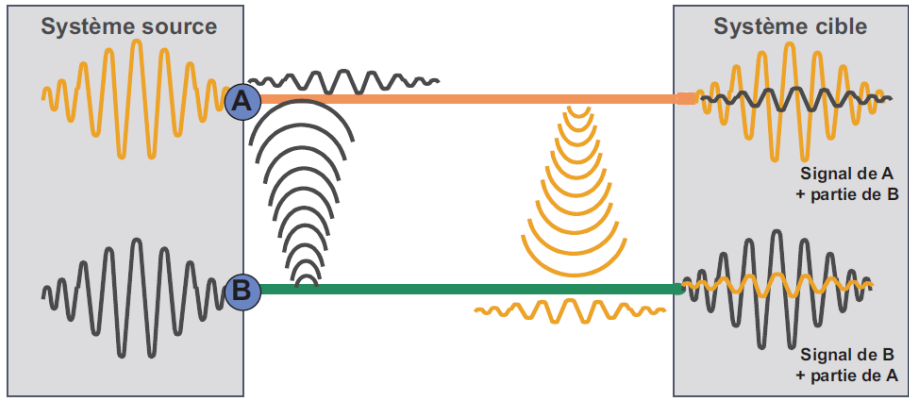


Figure 3 : Couplage inductif entre paires : la diaphonie.

Deux grandeurs ont été introduites pour mesurer ce phénomène : la paradiaphonie et la télédiaphonie. La paradiaphonie (Next ou Near end crosstalk) et la télédiaphonie (Fext ou Far end crosstalk) indiquent l'affaiblissement du signal transmis sur les paires avoisinantes par rapport au signal d'entrée, l'une est mesurée près de la source (Near), l'autre à l'extrémité (Far).

5. Paire coaxiale :

Une paire coaxiale ou câble coaxial (figure 4) est constituée de deux conducteurs concentriques maintenus à distance constante par un diélectrique. Le conducteur extérieur, tresse métallique en cuivre recuit appelée blindage, est mis à la terre. L'ensemble est protégé par une gaine isolante.

Le câble coaxial possède des caractéristiques électriques supérieures à celles de la paire torsadée. Il autorise des débits plus élevés et est peu sensible aux perturbations électromagnétiques extérieures. Le taux d'erreur sur un tel câble est d'environ 10^{-9} .

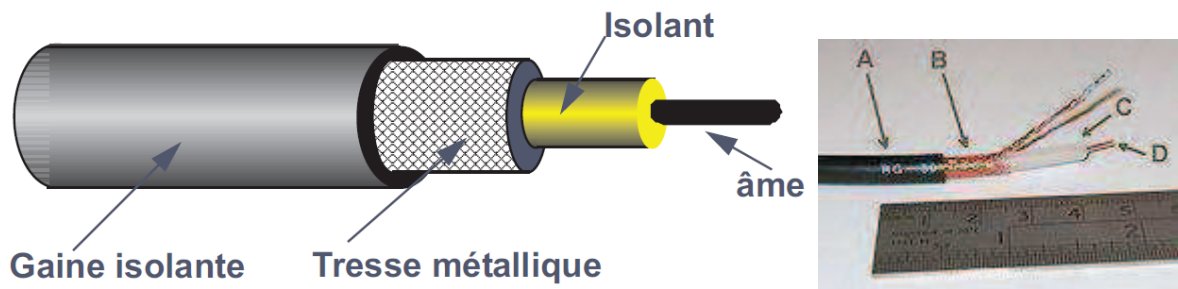


Figure 4 : Câble coaxial flexible type RG-59. A: Gaine extérieure en plastique B: Blindage en cuivre C: Diélectrique D: Conducteur central (âme) en cuivre.

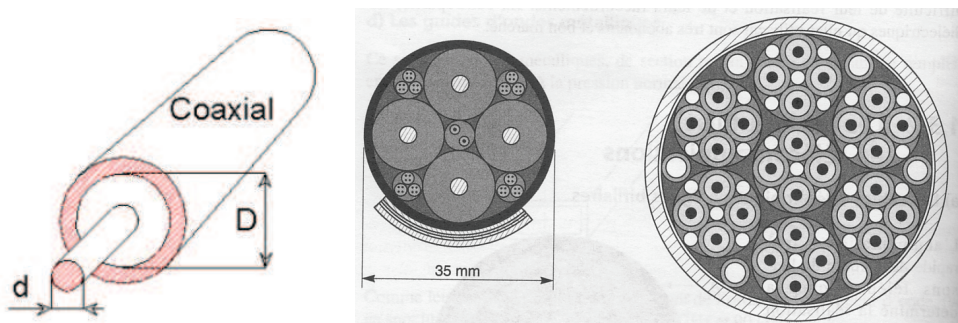


Figure 5: Câbles coaxiaux.

En transmission numérique, notamment dans les réseaux locaux, on utilise des câbles d'impédance 50Ω à des débits pouvant atteindre 10 Mbit/s sur des distances de l'ordre du kilomètre.

En transmission analogique, le câble coaxial est utilisé pour réaliser des liaisons longues distances. Son impédance est de 75Ω . Ce câble, similaire au câble coaxial utilisé en télévision La bande passante est d'environ 300 à 400 MHz.

- pertes faibles,
- bande passante (débit) élevée.

6. Les guides d'onde métalliques :

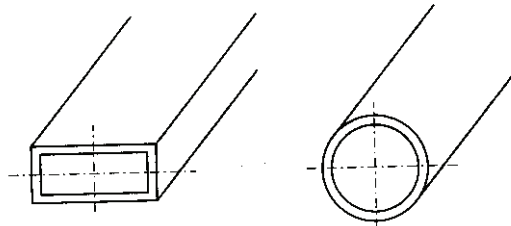
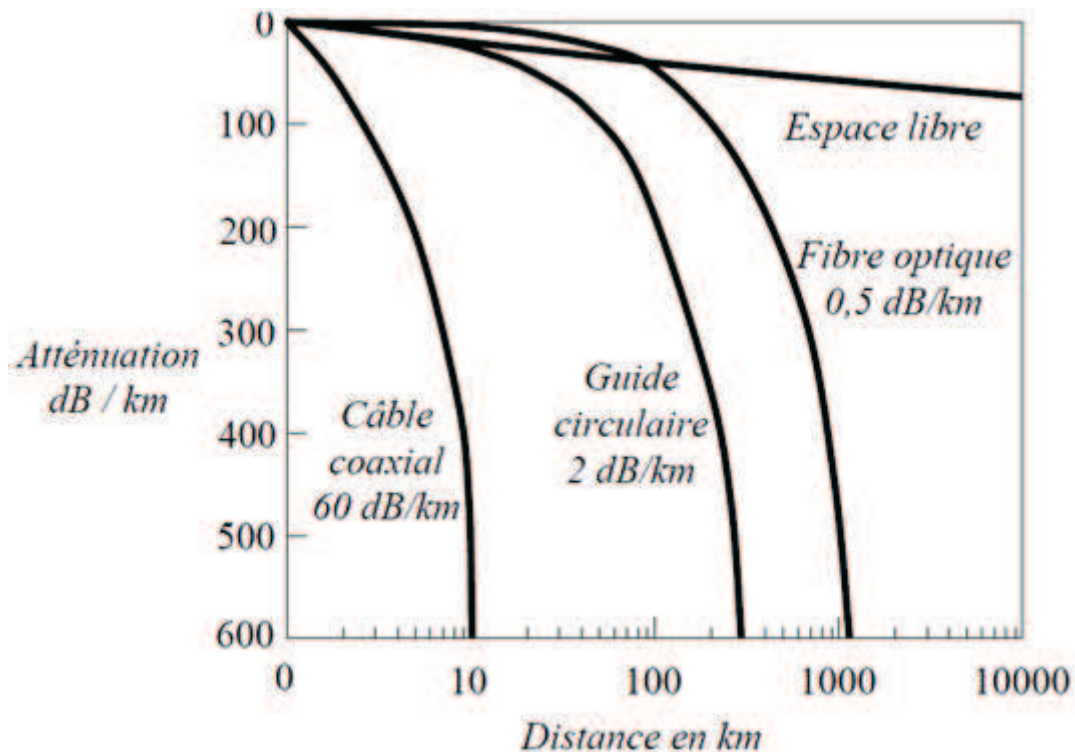


Figure 6 : Guides d'ondes métalliques.

De simples tuyaux métalliques à section circulaire ou rectangulaire permettent de conduire les micro-ondes compatibles avec leur taille latérale de l'ordre de la longueur d'onde dans la gamme de fréquence allant de 3GHz à 90GHz.

On peut atteindre un blindage totale des ondes transportées et des pertes par effet joule pratiquement nulles en utilisant l'air comme diélectrique (isolant remarquable) et en argentant ou dorant la surface interne.



Atténuation typique pour les quatre supports de transmission.

Chapitre 3. Faisceaux Hertziens :

1. Les liaisons hertziennes :

Principe

Un conducteur rectiligne alimenté en courant haute fréquence ou radiofréquence peut être assimilé à un circuit oscillant ouvert. Un tel circuit ou antenne d'émission rayonne une énergie (onde électromagnétique). Cette énergie électromagnétique recueillie par un autre conducteur distant ou antenne de réception est transformée en un courant électrique similaire à celui d'excitation de l'antenne d'émission (théorème de réciprocité). La figure 1 illustre le principe d'une liaison radioélectrique.

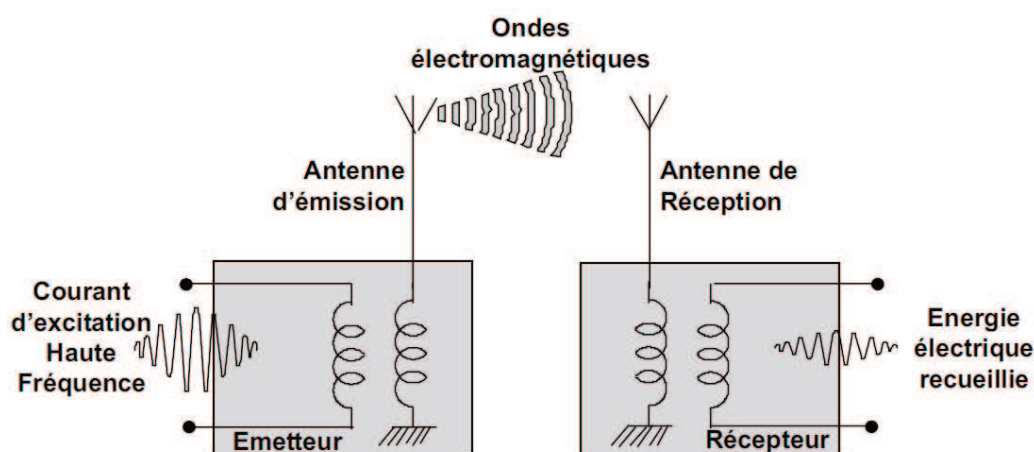


Figure 1 : Principe d'une liaison radioélectrique

Contrairement aux supports étudiés dans les paragraphes précédents, la liaison entre les deux entités émetteur et récepteur s'effectue sans support physique. Les ondes électromagnétiques (OEM) se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière. On appelle longueur d'onde (λ), la distance parcourue pendant une période du phénomène vibratoire.

Une antenne est un conducteur dont la longueur est un sous-multiple de la longueur d'onde.

Le rayonnement d'une source ponctuelle est omnidirectionnel, l'énergie se diffuse selon une sphère.

Le rayonnement d'un conducteur rectiligne s'effectue selon un demi-tore. Afin d'utiliser au mieux l'énergie rayonnée, on réalise des réflecteurs. Les réflecteurs peuvent être actifs (rideaux d'antennes) ou passifs (brins, réflecteur plan ou parabolique).

Les ondes électromagnétiques subissent peu d'affaiblissement, leur mise en œuvre est assez aisée et le coût d'infrastructure généralement faible devant les coûts de génie civil engendrés par le passage de câbles physiques. Les transmissions par ondes électromagnétiques sont utilisées chaque fois qu'il est nécessaire :

- de diffuser une même information vers plusieurs utilisateurs (réseaux de diffusion),
- de mettre en relation des stations mobiles (réseaux de messagerie),

– de relier, à haut débit, deux entités éloignées (faisceaux hertziens) ou très éloignées (satellites de communication).

2. Intérêts et inconvénients

L'intérêt principal des liaisons hertziennes est qu'elles ne nécessitent pas de support physique entre l'émetteur et le récepteur de l'information.

C'est le moyen de communication idéal pour les liaisons avec les objets mobiles: piétons, automobiles, bateaux, trains, avions, fusées, satellites, etc..

Les liaisons hertziennes sont intéressantes dans le cas de la diffusion (radio diffusion et télédiffusion), où l'on a un émetteur et plusieurs récepteurs. En effet pour couvrir une ville, il est plus simple et moins cher d'installer un émetteur et une antenne chez chaque particulier, plutôt que de relier par câble chaque particulier !

Les inconvénients principaux des liaisons hertziennes (par rapport aux autres supports) sont aussi liés à l'absence de support physique :

- Comment faire pour que tout le monde puisse communiquer en même temps ?

Ce problème n'existe pas par rapport à une liaison filaire : chacun son câble ! Dans le cas des liaisons hertziennes, ceci impose une gestion stricte des fréquences : Chaque système de transmission radio dispose d'une certaine bande de fréquence qui lui est allouée.

- Comment garantir la confidentialité de transmission entre l'émetteur et le récepteur ? N'importe quel « espion » peut intercepter une communication puisque l'information est transmise en « espace libre ».

Cet inconvénient est corrigé par l'utilisation de cryptage de l'information entre l'émetteur et le récepteur.

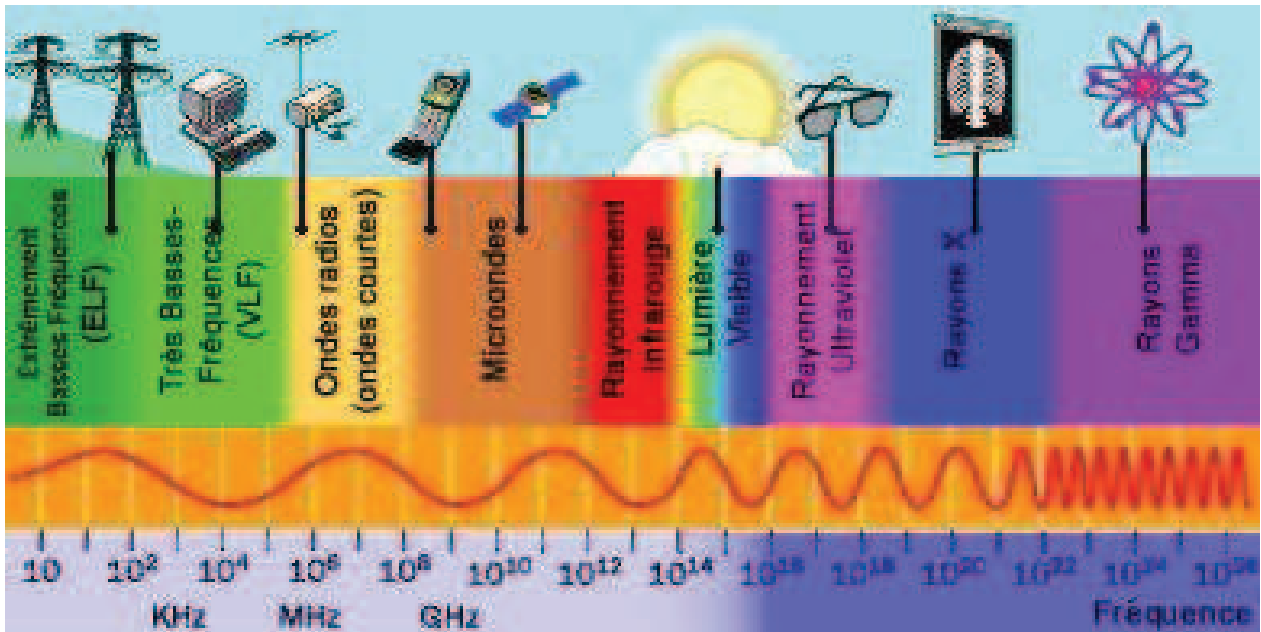
3. Les systèmes utilisant les liaisons hertziennes

Quelques exemples de systèmes utilisant les liaisons hertziennes, la liste qui suit n'est, bien sûr, pas exhaustive.

- Radiodiffusion (en modulation d'amplitude ou de fréquence)
- Télédiffusion (analogique ou numérique, terrestre ou par satellite)
- Radiocommunications : Talkie-walkie, liaison VHF pour avions ou bateaux
- Faisceaux hertziens.
- Téléphonie : réseau de téléphones sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise, téléphone mobile.
- Internet : Liaison Wi-Fi (réseau Internet sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise).

4. Principales fréquences (Spectre électromagnétiques):

La figure ci-dessous donne une vue d'ensemble des rayonnements électromagnétiques. Les limites des diverses gammes ne sont pas définies très précisément.



| | | <i>Fréquence (N)</i> | <i>Longueur d'onde λ_0</i> | |
|----------------------------------|--|----------------------|---|----------------------------|
| | | 50 Hz | 10^4 km | |
| Ondes radioélectriques RF | | 30 kHz | 10 km | Ondes kilométriques |
| | | 100 kHz | 3000 m | |
| | | 1 MHz | 300 m | |
| | | 10 MHz | 30 m | |
| | | 100 MHz | 3 m | Ondes métriques |

5. Les faisceaux hertziens

Les ondes radioélectriques peuvent, dans certains cas, remplacer avantageusement les liaisons filaires (cuivre ou optique). Les faisceaux hertziens ou câbles hertziens, par analogie aux réseaux câblés peuvent être analogiques ou numériques. Les débits peuvent atteindre 155 Mbit/s. Ils sont principalement utilisés pour des réseaux :

- de téléphonie (multiplexage fréquentiel ou temporel),
- de transmission de données,
- de diffusion d'émissions télévisées.

Pour diminuer les puissances d'émission, la technique des faisceaux hertziens utilise des antennes très directives. L'antenne réelle est placée au foyer optique d'une parabole qui réfléchit les ondes en un faisceau d'ondes parallèles très concentré, limitant ainsi la dispersion de l'énergie radioélectrique. En réception, l'antenne est aussi placée au foyer optique de la parabole.

Tous les rayons reçus parallèlement à l'axe optique de la parabole sont réfléchis vers le foyer optique, on recueille ainsi, le maximum d'énergie (figure 3).

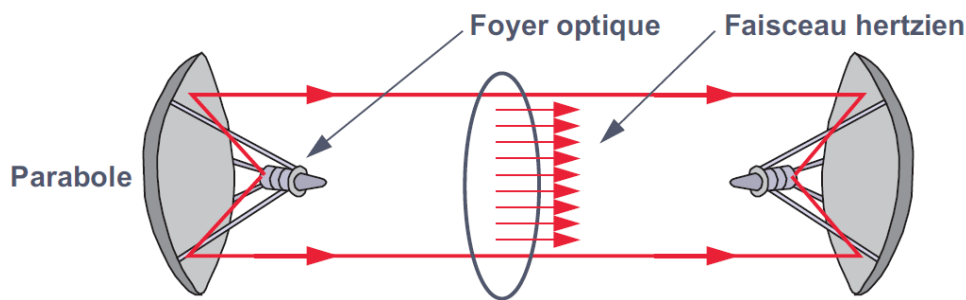


Figure 3 : Principe des faisceaux hertziens.

Les distances franchissables, par les systèmes de transmission hertzienne, peuvent atteindre 100 km. Pour couvrir des distances plus importantes, il faut disposer des relais. Les relais peuvent être passifs ou actifs. Les relais passifs sont utilisés dans les zones où le relief est important ; il s'agit de simples réflecteurs utilisés pour guider l'onde, par exemple pour suivre une vallée. Les relais actifs nécessitent une infrastructure plus complexe, le signal recueilli est remis en forme, amplifié puis retransmis. Les faisceaux hertziens utilisent les bandes de 2 à 30 GHz et autorisent des débits de 155 Mbit/s.

Les faisceaux hertziens sont sensibles aux perturbations atmosphériques et aux interférences électromagnétiques. Une infrastructure hertzienne repose sur l'existence de canaux de secours qu'ils soient hertziens ou filaires.

Les liaisons infrarouges et lasers constituent un cas particulier des liaisons hertziennes. Elles sont généralement utilisées, pour interconnecter deux réseaux privés, sur de courtes distances, de l'ordre de quelques centaines de mètres.

5.1. Zone de Fresnel

Pour qu'une transmission entre deux points puisse être considérée comme une transmission en espace libre, une zone, dite zone de Fresnel, doit être complètement dégagée.

En radiocommunication on admet que l'énergie est transmise dans un volume ellipsoïdal comme le représente la figure 4.

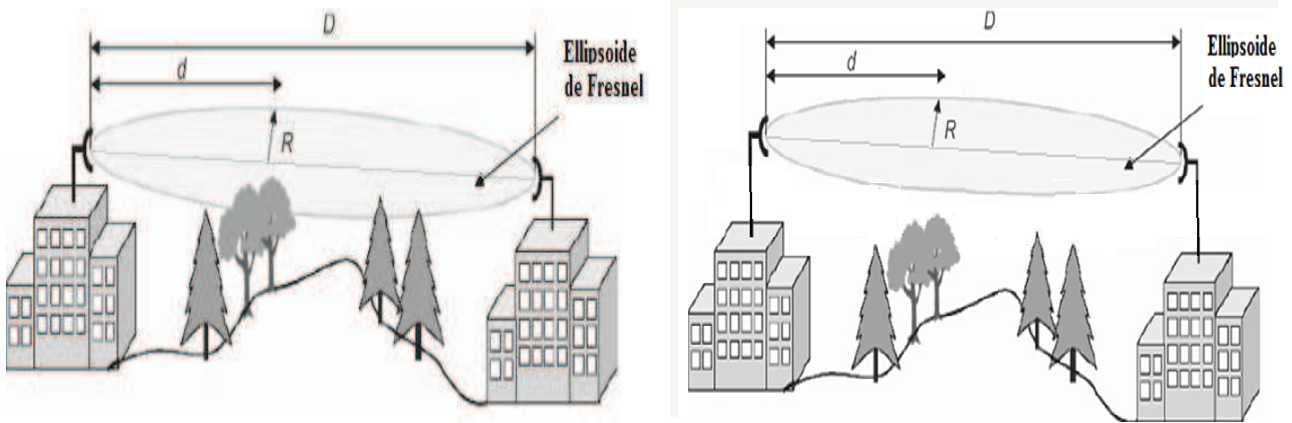


Figure 4 : Propagation en espace libre et zone de Fresnel.

Les dimensions de l'ellipse sont données par les équations suivantes. On s'intéresse principalement au rayon de l'ellipse à une distance donnée, ce résultat permettant notamment de déterminer la hauteur minimale des antennes :

$$R = 17,3 \sqrt{\frac{d(D-d)}{Df}}$$

$$r = \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \times \lambda$$

Avec D et d en km, f en GHz et R en m.

Au milieu, le rayon est maximal et vaut :

$$R = 17,3 \sqrt{\frac{D}{4f}}$$

La grandeur R correspond à la valeur strictement minimale pour laquelle l'espace entourant le rayon direct joignant les deux antennes est dégagé de tout obstacle.

Remarque : R est maximum pour $d_1 = d_2$ ou $(D=2d)$.

6. Les liaisons satellitaires

La nécessité de disposer de stations relais rend difficile la réalisation de liaisons hertziennes à très grande distance, notamment pour les liaisons transocéaniques. C'est pourquoi, dès les années 1960, on s'est orienté vers l'utilisation de satellites relais. Ce n'est qu'avec l'apparition de porteurs capables de satelliser sur des orbites d'environ 36 000 km qu'il a été possible de réaliser des liaisons permanentes avec des satellites fixes par rapport à un observateur terrestre (satellite géostationnaire). Ces satellites ont une période de révolution identique à celle de la terre (23 h 56 min), ils sont dits géosynchrones. L'orbite équatoriale est de 42 164 km, soit une altitude exacte au-dessus de la Terre de 35 800 km.

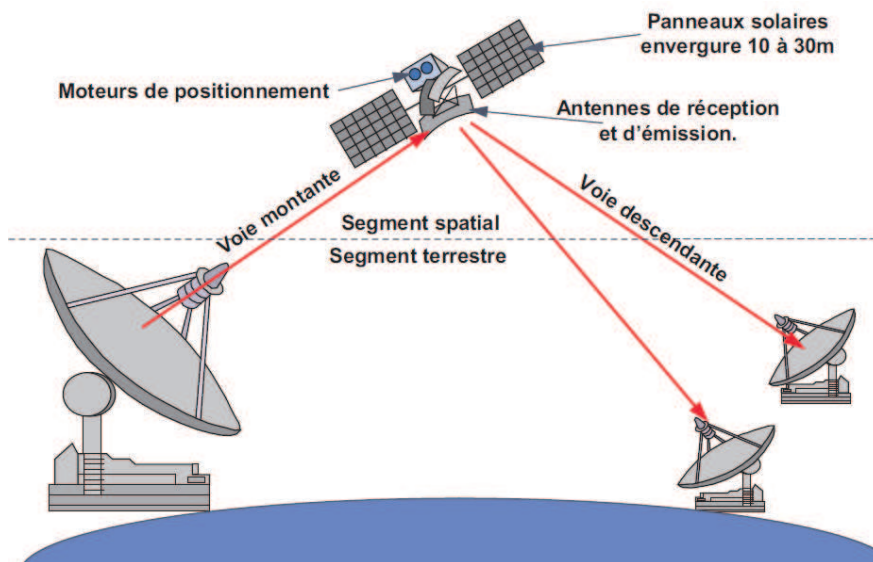


Figure 5 : Principe d'une liaison satellitaire.

6.1. Principe

Une station terrestre émet vers le satellite un flux d'information (voie montante). Le satellite n'est qu'un simple répéteur, il régénère les signaux reçus et les réémet en direction de la Terre (voie descendante). La figure 5 illustre le principe d'une liaison satellitaire.

Pour utiliser un satellite comme point nodal d'un réseau terrestre et, non comme simple relais de télécommunication, il est nécessaire d'admettre plusieurs voies montantes. Celles-ci sont alors en compétition pour l'accès au satellite. Plusieurs techniques peuvent être utilisées :

- **FDMA** (Frequency Division Multiple Access): Accès Multiple à Répartition de Fréquences: consiste à diviser la bande de fréquence du satellite en sous-bandes, chacune réservée à une voie de communication.
- **TDMA** (Time Division Multiple Access) (Accès Multiple à Répartition de Temps), la porteuse est commune à tous les canaux de communication, mais chaque canal n'en dispose que durant un intervalle de temps limité. Ce mode d'accès nécessite une synchronisation entre les stations.
- **CDMA** (Code Division Multiple Access) (Accès Multiple à Répartition par Code), dans cette technique on attribue à chaque voie de communication un code. Les informations codées sont envoyées simultanément, elles sont extraites du flux par décodage.

6.2. Les différents types de satellites

Compte tenu des temps de propagation des satellites géostationnaires, on a défini plusieurs familles d'orbite. On distingue 3 types de satellites, selon leur orbite:

- Les orbites stationnaires GEO (Geostationary Earth Orbital)
- Les orbites moyennes MEO (Medium Earth Orbital)
- Les orbites basses LEO (Low Earth Orbital)

Le tableau 1 résume les caractéristiques de ces satellites.

| | GEO Geostationary Earth Orbit | MEO Medium Earth Orbit | LEO Low Earth Orbit |
|--|--|---|---|
| Altitude | 36 000 km | 2 000 à 12 000 km | 800 à 2 000 km |
| Type d'orbite | Circulaire | Elliptique ou circulaire | Elliptique ou circulaire |
| Plan de rotation | Équatorial | Quelconque | Quelconque |
| Temps de transmission Terre-satellite | 240 ms | 110 à 150 ms | Environ 50 ms |
| Permanence spatiale et temporelle (Spatiale : communiquer en tout point Temporelle : en un point à tout moment) | OUI 3 satellites couvrent la terre (sauf les pôles) | NON (orbite défilante) Constellation de satellites | NON (orbite défilante) Constellation de satellites |
| Applications | Téléphonie fixe, télévision, transmission de données | Téléphonie mobile, transmission de données | Téléphonie mobile, transmission de données |
| Débit | Jusqu'à 155 Mbit/s | De 9,6 à 38 kbit/s | De 2,4 kbit/s à 155 Mbit/s |

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques des différents systèmes de satellites.

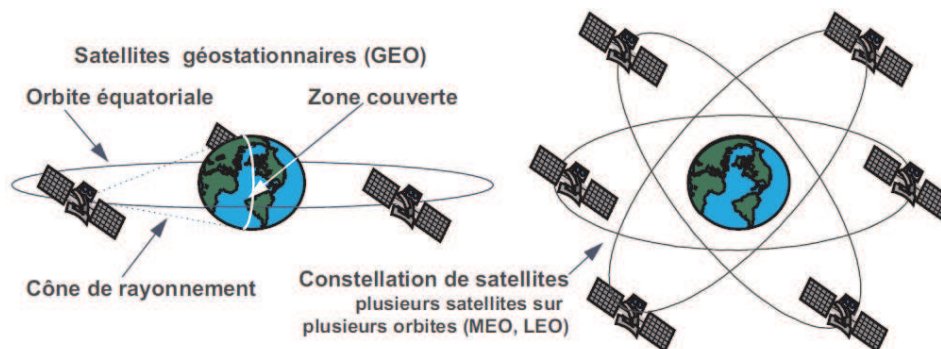


Figure 5 : Satellites géostationnaires (GEO) et constellation de satellites (MEO et LEO).

La figure 5 représente les deux modes orbitaux des systèmes de satellites. La partie de gauche illustre un système GEO. En orbite équatoriale, avec un cône de rayonnement de 120° , seuls 3 satellites suffisent pour couvrir la Terre, sauf les pôles. Les satellites géostationnaires permettent de réaliser :

- des réseaux de diffusion (radiodiffusion, télévision) ;
- des liaisons point à point ;
- des liaisons à haut débit (bande passante de 500 MHz).

Ces satellites ont un temps de propagation important (environ 240 ms) et un temps de vie limité de 10 à 15 ans par la consommation d'énergie nécessaire à leur maintien sur leur orbite.

L'énergie motrice est embarquée, donc limitée, tandis que l'énergie nécessaire au système de télécommunication est fournie par des batteries et panneaux solaires.

Chapitre 4. Fibres optiques :

1. Les liaisons optiques :

* Fibre optique : Support de verre transportant les informations binaires en modulant un faisceau lumineux. La fibre optique autorise des débits élevés et permet de couvrir des distances importantes.

- pertes faibles à très faibles,
- immunité aux bruits,
- bande passante (débit) élevée à très élevée,
- mise en œuvre délicate.

Il existe deux types de liaisons optiques :

- Liaison par fibre optique (optique guidée).
- Liaison optique en espace libre (exemple : liaison infrarouge télécommande-téléviseur).

2. Principe : Un faisceau de lumière (figure 1), au passage d'un milieu 1 vers un milieu 2 (dioptre), est réfléchi (retour au milieu d'origine) et est réfracté avec une déviation (passage dans le milieu 2). L'indice de réfraction (n_1, n_2) mesure le rapport entre la vitesse de propagation du rayon lumineux dans le vide et celle dans le milieu considéré, soit :

$$n = c/v$$

Où (n) est l'indice de réfraction absolu du milieu considéré.

(c) la vitesse de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8$ m/s).

(v) la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu considéré.

Par exemple, l'indice de réfraction du vide est évidemment de 1, celui du verre ordinaire d'environ 1,5 et de l'eau 1,33.

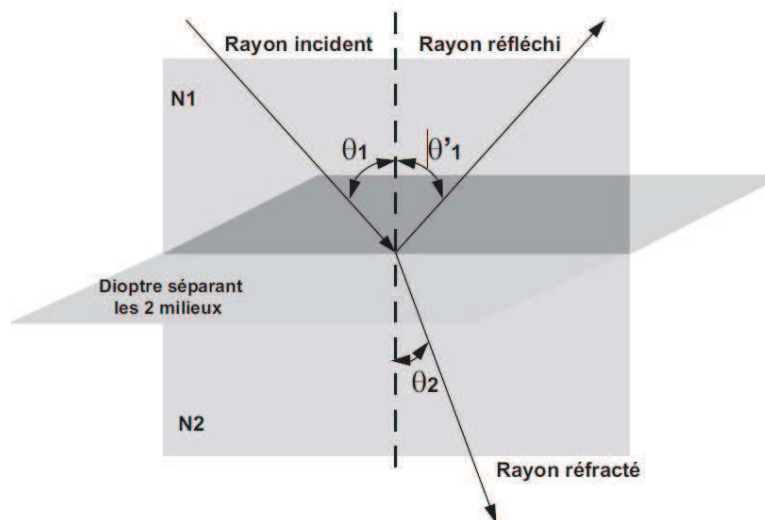


Figure 1 : La loi de Descartes ($N_1 \sin \theta_1 = N_2 \sin \theta_2$).

Lorsque l'angle d'incidence augmente (θ_1), l'énergie réfractée diminue et l'énergie réfléchie augmente. Si on augmente encore l'angle, la réfraction devient nulle ($\theta_1 = \pi/2$, condition limite de la réfraction) toute l'énergie est réfléchie, la réflexion est totale. Cette propriété est utilisée pour

réaliser des guides de lumière : la fibre optique. Une fibre optique (Figure 2) est composée d'un «fil» de silice appelé cœur, entouré d'une gaine appelée manteau et d'une enveloppe de protection. La réflexion totale est assurée par des valeurs d'indices proches tels que $n_1 > n_2$ où n_1 est l'indice du cœur et n_2 celui de la gaine.

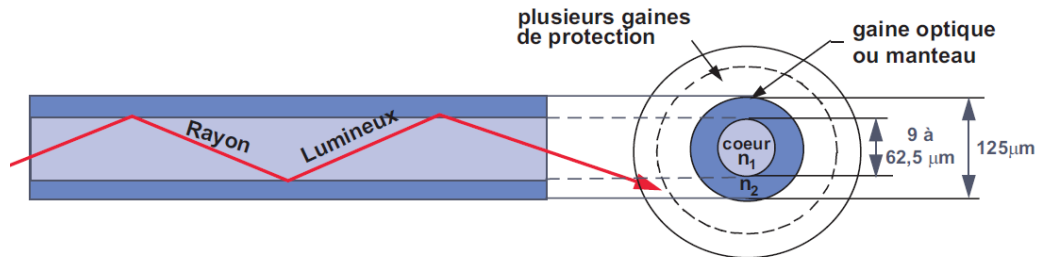


Figure 2 : La fibre optique : guide de lumière

Un système de transmission par fibre optique met en œuvre (Figure 3) :

- Un émetteur de lumière (transmetteur), constitué d'une diode électroluminescente (LED, Light Emitting Diode) ou d'une diode LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), qui transforme les impulsions électriques en impulsions lumineuses.
- Un récepteur de lumière, constitué d'une photodiode de type PIN (Positive Intrinsic Négative) ou de type PDA (à effet d'avalanche) qui traduit les impulsions lumineuses en signaux électriques.
- Une fibre optique.

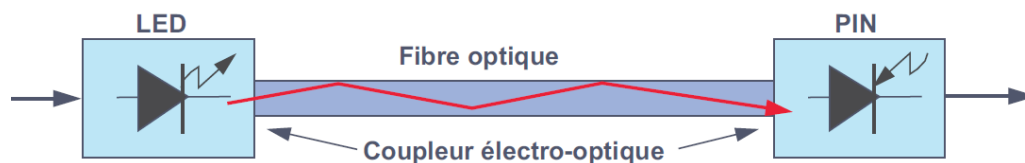


Figure 3 : Principe d'une liaison optique.

La puissance émise par une LED est peu élevée ($\cong 1$ mW) et, seul un faible pourcentage de cette puissance est récupéré dans la fibre. Pour les liaisons à haut débit on lui préfère les diodes LASER. Ces dernières autorisent une puissance à l'émission voisine de 5 mW avec un rendement de couplage d'environ 50 %. Une LED a une bande passante de 100 MHz, une diode LASER permet une largeur de bande de 800 MHz.

| <u>EMETTEUR</u> | <u>DEL</u> | <u>LASER</u> |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Mode de propagation | Multi mode | Multi mode ou monomode |
| Fenêtre | 800 à 900 nm 1250 à 1350 nm | 1300 nm 1550 nm |
| Bande passante | < 200 MHz | > 1 GHz |
| Distance | Courte | Longue |
| Sensibilité à la température | Moyenne | Très forte |
| Durée de vie | Longue (100 000 h) | Courte (10 000 h) |
| Coût | Faible | Elevé |

Tab: Comparaison entre LED et LASER:

La fibre étant un système de transmission unidirectionnel, une liaison optique nécessite l'utilisation de 2 fibres. La figure 4 montre la réalisation de coupleurs optiques pour interconnecter deux réseaux locaux.

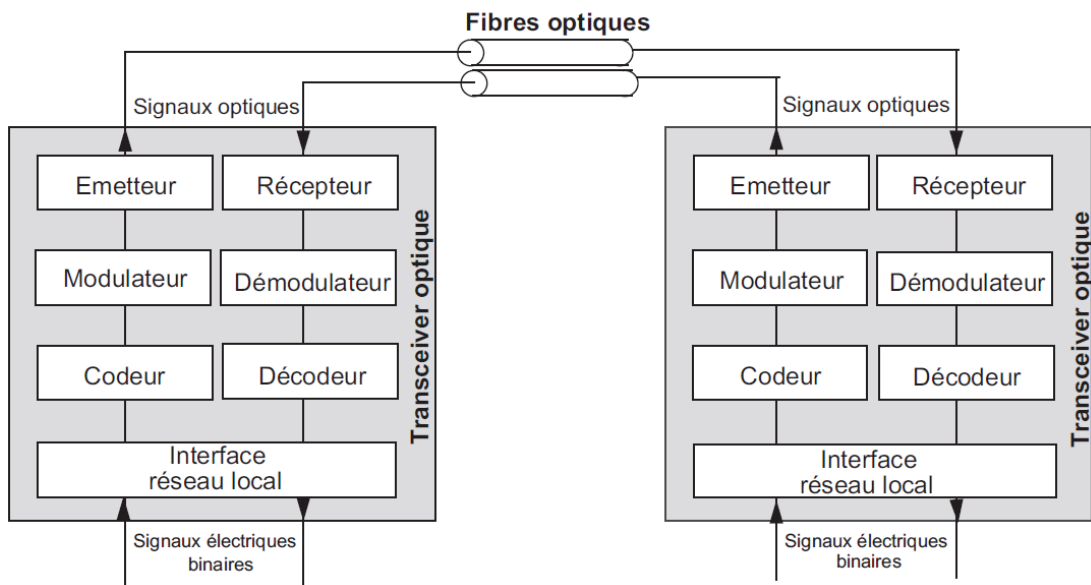


Figure 4 : Interconnexion de 2 réseaux locaux par fibre optique

3. Les différents types de fibres

Les rayons lumineux qui remplissent la condition de réflexion sont acheminés dans le cœur de la fibre. L'ensemble des rayons admis forme un cône, le cône d'acceptance dont l'ouverture ou angle

d'incidence maximal est θ_{Max} (Figure 5). L'ouverture numérique (ON) de la fibre est la grandeur qui qualifie le cône d'acceptance ($ON = \sin\theta_{Max}$).

3.2.1. Les fibres à saut d'indice :

Dans les fibres à saut d'indice, le cœur d'indice (n_1) est entouré d'une gaine d'indice (n_2). La variation d'indice entre le cœur et la gaine est brutale (saut d'indice). La propagation s'y fait par réflexion totale à l'interface cœur/gaine.

Quand le diamètre du cœur de la fibre est grand devant la longueur d'onde de la lumière, l'ouverture numérique est importante et permet un bon couplage optique. Ce type de fibre autorise l'utilisation de sources de faible puissance (LED). Cependant, la fibre admet plusieurs rayons qui se propagent sur des chemins différents ou modes de propagation. Ces différents trajets provoquent un étalement du signal (dispersion modale), la fibre est alors dite **multimode** (Figure 5). La dispersion modale provoque un étalement du signal, ce qui limite la bande passante de la fibre et la distance franchissable.

En réduisant le diamètre du cœur, on réduit l'ouverture numérique. Cette réduction, peut être telle que, pour une longueur d'onde donnée, la fibre n'admette plus qu'un seul rayon.

La fibre est alors dite **monomode**, le diamètre du cœur est compris entre 8 et 9 μm et le diamètre du manteau 125 μm . La fibre n'est monomode qu'au delà d'une certaine longueur d'onde appelée longueur d'onde de coupure ($\approx 1200 \text{ nm}$). La distance franchissable est de l'ordre de 100 km et la bande passante est supérieure à 20 GHz pour une fibre de 1 km. Si la fibre monomode permet de franchir de grandes distances, le couplage optique est faible et demande une source de puissance lumineuse supérieure. La fibre monomode exige l'emploi de diodes LASER, d'un coût plus élevé et d'une longévité réduite.

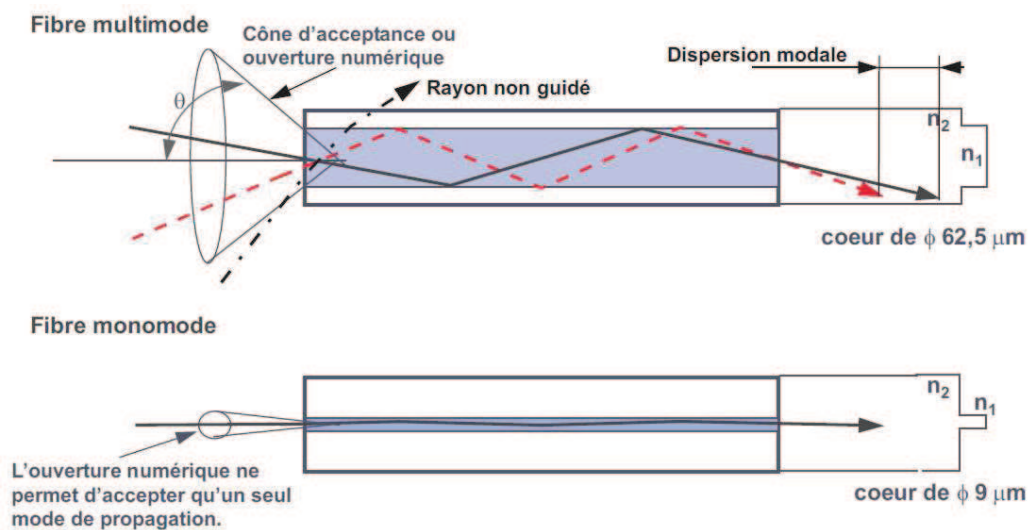


Figure 5 : Les fibres à saut d'indice.

3.2.2. Les fibres à gradient d'indice

Un compromis a été trouvé avec les fibres à gradient d'indice (figure 6), l'indice du cœur décroît de façon continue, depuis le centre du cœur jusqu'à l'interface cœur/gaine suivant une loi parabolique. Tous les rayons sont focalisés au centre de la fibre, ils ont une trajectoire proche de la sinusoïde. La vitesse de propagation est d'autant plus élevée que l'indice de réfraction est faible. Cette différence de vitesse tend à compenser les différences de trajet, elle réduit la dispersion modale et autorise une portée plus grande que dans les fibres multimodes à saut d'indice. La bande passante, pour une fibre d'un kilomètre est d'environ 500 MHz à 2 GHz et l'affaiblissement de 0,4 dB, ce qui autorise des portées d'environ 50 km.

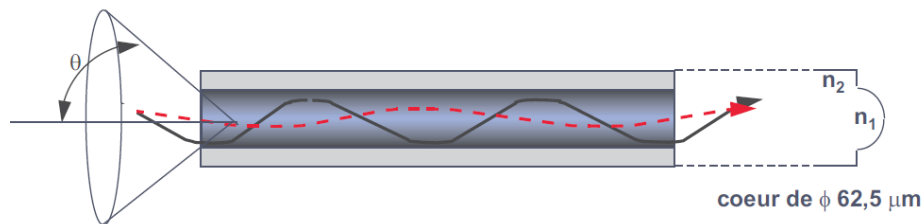


Figure 6 : Les fibres à gradient d'indice.

3.3. Performance des fibres optiques

Les performances des fibres optiques sont :

- Bande passante importante ;
- Immunité électromagnétique ;
- Faible taux d'erreur 10^{-12} ;
- Faible affaiblissement (0,2 à 0,5 dB/km) ;
- Faible encombrement et poids ;
- Vitesse de propagation élevée (monomode) ;
- Sécurité (absence de rayonnement à l'extérieur et difficulté de se mettre à l'écoute) ;
- Légèreté.

Ces caractéristiques font des fibres optiques le support privilégié dans le domaine des télécommunications à haut débit et grande distance, dans les applications aéronautiques et navales (sous-marin) et dans les transmissions de données en milieu perturbé.

Chapitre 5. Faisceaux infrarouges :

Références bibliographiques:

1. C. Servin ; Réseaux et Télécoms ; Dunod, 2006.
2. G. Pujolle, Cours réseaux et télécoms : Avec exercices corrigés, 3^e édition ; Eyrolles, 2008.
3. G. Barué ; Télécommunications et Infrastructure ; Ellipses, 2003.
4. Sites Internet.