

Jürgen Ehrensberger

Médias de transmission

1 But du chapitre

Ce chapitre présente les différents médias de transmission : câble électrique, fibre optique et la transmission radio.

Il est essentiellement basé sur des textes repris des livres de A. Tanenbaum et de G. Pujolle (voir bibliographie).

2 Introduction

Avant d'étudier les caractéristiques des différents médias de transmission, nous allons réviser brièvement les bases théoriques de la transmission de données.

2.1 Transmission de données numériques

Les informations sont transmises sur les supports de transmission en faisant varier certains paramètres physiques des signaux qui les représentent. Par exemple, une tension ou un courant dans le cas de signaux électriques.

L'analyse de Fourier nous donne un outil qui permet d'analyser le spectre du signal. Regardons un exemple. La Figure 1 montre la transmission du caractère b, codé en ASCII sur un octet et représenté par la séquence binaire 0110 0010. La partie gauche de la Figure 1(a) représente le signal de tension électrique en sortie du circuit transmetteur de l'ordinateur. La partie droite montre la valeur moyenne des amplitudes des premiers termes de la série de Fourier du signal électrique. On voit que dans le domaine fréquentiel, le signal a une **fréquence fondamentale** plus des composants à des multiples de cette fréquence. Ces multiples de la fréquence fondamentale sont appelés les **harmoniques**.

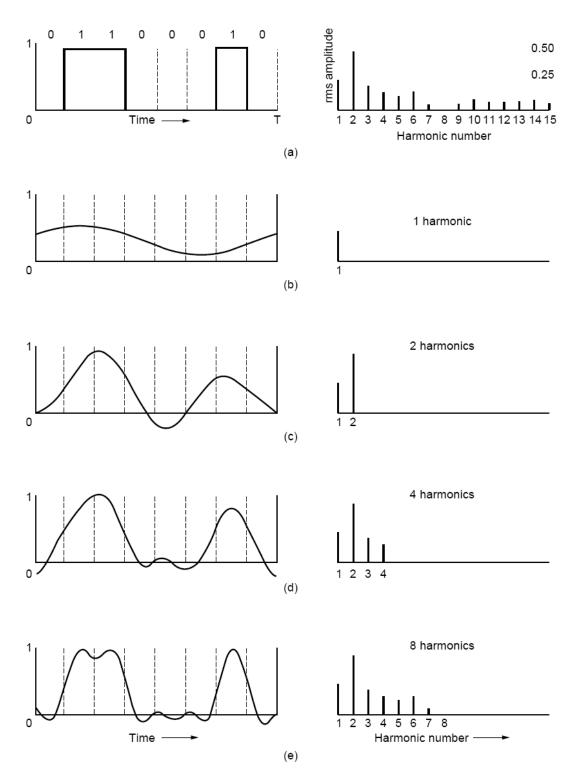


Figure 1: Signal numérique et ses composants harmoniques

Il faut savoir qu'aucun système de transmission n'est en mesure de transmettre des signaux sans leur faire subir d'affaiblissement. Si toutes les composants harmoniques d'un signal subissaient le même affaiblissement, le signal résultant serait réduit en puissance sans pour autant être déformé (c'est-à-dire qu'il conservait la même forme rectangulaire qu'au moment de sont émission comme sur la Figure 1(a). Malheureusement, dans la réalité, les moyens de transmission apportent aux différentes harmoniques des affaiblissements différents. C'est ce qui est à l'origine des

distorsions. En pratique, les signaux sont transmis avec des affaiblissements d'amplitude négligeables jusqu'à une fréquence f_c , dite fréquence de coupure, exprimée en Hertz (Hz). Toutes les fréquences supérieures à cette fréquence de coupure sont fortement atténuées. Dans la plupart des cas, le processus d'atténuation est dû au média de transmission. Dans certains cas un filtre est inséré volontairement dans le système de transmission pour restreindre la **bande passante** (*bandwidth*) - l'espace de fréquence des signaux transmis avec un affaiblissement à peu près constant - attribuée à la transmission d'un signal. Cela réduit fortement le nombre d'harmoniques du signal qui seront effectivement transmises.

Voyons à quoi ressemble le signal de la Figure 1(a) lorsqu'il est transmis sur un système de transmission présentant une bande passante tellement étroite que seule une partie de ses harmoniques sont effectivement transmises. La Figure 1(b) montre la forme du signal après sa transmission sur un canal de transmission où seule la première harmonique (la fréquence fondamentale f) est transmise. De la même manière, les Figure 1(c) à (e) montrent l'évolution de la forme du signal lorsque la bande passante du canal augmente - i.e., le nombre d'harmoniques effectivement transmises augmente.

2.2 Largeur de bande

L'affaiblissement est la principale limitation de la fréquence de transmission sur un canal réel. La plage de fréquences 'utilisables' pour la transmission est appelée la **largeur de bande** d'un canal. Elle donne le domaine de fréquences dans lequel les distorsions telle que l'affaiblissement ou la diaphonie sont encore tolérables.

La Figure 2 montre ce concept.

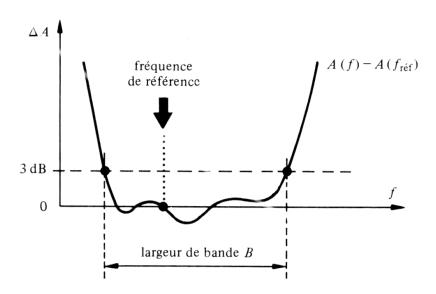


Figure 2: Exemple de la largeur de bande (source : Fontolliet 1996)

Dans cet exemple, on a fixé l'affaiblissement tolérable à 3dB par rapport à une fréquence de référence, ce qui permet de détermine la bande de fréquence utilisable et la largeur de bande.

La vitesse de transmission de données sur le canal dépend à la fois de la méthode de codage utilisée et de la rapidité de transmission des signaux - le nombre de fois par

seconde où le signal change de valeur (par exemple de tension électrique). Chaque valeur distincte du signal représente un symbole élémentaire, ou **moment**. Le nombre de moments transmis par seconde est exprimé en **bauds**.

Une vitesse de transmission de *b* bauds ne correspond pas nécessairement à un **débit binaire** de *b* bits par seconde (bit/s) sur le canal car chaque moment peut regrouper plusieurs bits. Si l'on dispose de tensions électriques 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 volts, chaque moment (exprimé par une tension) transporte trois bits ; ainsi le débit binaire serait trois fois plus élevé que le débit de moments. Dans l'exemple de la Figure 1, nous n'avons utilisé que deux niveaux significatifs (0 et 1) pour représenter le signal, ainsi le débit binaire est égal débit de moments.

Pour un débit binaire donné de b bit/s, le temps nécessaire pour transmettre, par exemple, les 8 bits d'un caractère (transmission avec 256 moments) est égal à 8/b secondes. Le débit de moments est alors égal à b/8 baud et la fréquence de la première harmonique est b/8 Hz (en vertu de la relation: T = 1/f).

Il est clair que la largeur de bande d'un canal détermine le nombre d'harmoniques qui peuvent être transmises (avec une distorsion tolérable). Prenons l'exemple d'une liaison téléphonique normale avec 8 bits par moment et une largeur de bande volontairement fixée de 3000 Hz (en pratique entre 300 et 3400 Hz). La limitation de la largeur de bande fait que le nombre d'harmoniques effectivement transmises est égale à 3000/(b/8) ou 24000/b.

La Table 1 fournit les valeurs des divers paramètres pour les débits binaires courants. Si nous considérons par exemple un débit binaire de 600 b/s. Avec une transmission de 8 bits par moment, le débit de moments et de 75 baud et la fréquence de la fréquence fondamentale est de 75 Hz. Sur une largeur de bande de 3000 Hz, les 40 premières harmoniques du signal (3000 Hz/75Hz = 40) peuvent être transmises, ce qui donnerait une très bonne approximation du signal rectangulaire original.

De l'ensemble des valeurs de ce tableau, il apparaît clairement qu'essayer de transmettre à 9600 bit/s sur une ligne téléphonique normale le signal de la Figure 1(a) conduirait à quelque chose de similaire au signal de la Figure 1(c), ce qui rendrait difficile la compréhension des signaux binaires originaux. Il apparaît que, sur cette même ligne, avec un débit supérieur à 38 400 bit/s il n'y aurait aucune chance de reconstituer le signal transmis même si la transmission était à l'abri de tout bruit perturbateur. En d'autres termes, le fait de limiter la largeur de la bande passante limite le débit binaire maximum sur un canal de transmission. Toutefois, des méthodes de codage complexes basées sur plusieurs niveaux de tensions électriques existent et permettent d'obtenir des débits binaires plus élevés que ceux apparaissant à la Table 1.

Table 1: Exemple de la relation entre le débit binaire et les harmoniques transmises sur un liaison téléphonique normale

Débit (bit/s)	Période (T, ms)	Première harmonique (f, Hz)	Nombre d'harmoniques transmises
300	26,67	37,5	80
600	13,33	75	40
1200	6,67	150	20
2400	3,33	300	10

4800	1,67	600	5
9600	0,83	1200	2
19200	0,42	2400	1
38400	0,21	4800	0

2.3 Débit maximal d'un canal

Dès 1924, H. Nyqvist a pris conscience de l'existence d'une limite fondamentale du débit binaire maximum praticable sur un canal de transmission. Cela, dans une bande passante finie et sur un canal exempt de signaux parasites ou de bruits perturbateurs. En 1948, Claude Shannon a repris les travaux de Nyqvist et a appliqué les résultats obtenus à un canal de transmission sujet à des bruits aléatoires perturbateurs, appelés également bruits thermiques ou bruits blancs. Nous résumons ci-après les principaux résultats obtenus.

Nyqvist a démontré que, si un signal quelconque était appliqué à l'entrée d'un filtre passe-bas ayant une largeur de bande H, le signal ainsi filtré pouvait être entièrement reconstitué à partir d'un échantillonnage de ce signal effectué selon une cadence précise et égale à $2\,H$ par seconde. Une vitesse d'échantillonnage supérieure à $2\,H$ par seconde ne présente aucun intérêt car les harmoniques qu'elle permettrait d'isoler pour reconstituer le signal ont été éliminées lors du passage du signal dans le filtre. Par ailleurs, si ce signal comporte un nombre V de moments, le **théorème de Nyquist** conduit à la formule suivante, exprimant le débit binaire D maximum en bit/s :

$$D_{\text{max}} = 2 \cdot H \cdot \log_2 V$$

Par exemple, un canal exempt de bruit dont la largeur de bande égale 3 000 Hz ne peut transmettre un signal binaire (i.e., deux niveaux significatifs) à un débit excédant $D_{max} = 6'000$ bit/s.

Pour le moment, nous n'avons considéré que des canaux exempts de signaux parasites. Lorsque des bruits aléatoires apparaissent, la situation se détériore rapidement.

La quantité de bruit présente sur un canal de transmission est exprimée par le rapport de la puissance du signal transmis à la puissance du bruit et prend le nom de **rapport signal sur bruit**. Si nous appelons S l'énergie significative du signal et N l'énergie des bruits et parasites, le rapport s'écrit S/N. On a coutume de l'exprimer sous la forme $10 \cdot \log_{10} S/N$ en décibel (dB). Ainsi un rapport S/N de 10 est égal à 10 dB, un rapport de 100 est égal à 20 dB, un rapport de 1000 est égal à 30 dB, etc.

Un résultat significatif, obtenu par Claude Shannon, montre, pour un canal de transmission de bande passante H soumis à du bruit dont le rapport signal sur bruit est S/N, que la **capacité de transmission maximale** C, en bit/s, est donnée par l'équation :

$$C = H \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right).$$

La capacité du canal est donc une limite théorique au débit binaire d'un canal.

Par exemple, pour un canal de largeur de bande de 3 000 Hz et un rapport S/N de 1000 (30 dB), valeur typique pour le réseau téléphonique analogique, on obtient C = 30000 bit/s. Cela signifie que l'on ne peut pas transmettre à plus de 30000 bit/s sur ce canal

quels que soient le nombre de valeurs représentatives du signal et la fréquence d'échantillonnage utilisée. Les résultats obtenus par Shannon sont dérivés d'éléments de la théorie de l'information appliqués à un canal de transmission soumis à un bruit gaussien. Les contre-exemples devraient être traités dans la même catégorie que les machines à mouvement perpétuel. Il faut toutefois noter que la limite de Shannon est purement théorique. Dans la pratique, il est très difficile de s'approcher de cette limite.

3 Transmission en bande de base

Examinons maintenant les techniques de transmission utilisées, c'est-à-dire comment un émetteur peut envoyer un signal que le récepteur reconnaîtra comme étant un 1 ou un 0. La méthode la plus simple consiste à émettre, sur la ligne, des courants qui reflètent les bits du caractère à transmettre sous forme de créneaux, comme ceux illustrés à la Figure 3. Ce sont les **transmissions en bande de base**, donc sans transposition de fréquence et sans modulation.

La codage le plus simple est le code **tout ou rien**, qui utilise un courant nul pour indiquer un 0 et à un courant positif pour indiquer un 1. Ce code est simple mais présente des problèmes de réalisation du fait qu'il est souvent difficile de faire passer du courant continu entre deux stations, comme lors de longues séquences de 1.

Le même défaut se retrouve dans le code **NRZ** (*Non Retum to Zero*). Pour éviter la difficulté à obtenir un courant nul, on code le 1 par un courant positif et le 0 par un courant négatif.

Le **code bipolaire** est un code tout-ou-rien, dans lequel le bit 1 est indiqué par un courant positif ou négatif à tour de rôle, de façon à éviter les courants continus. Ce code laisse le bit 0 défini par un courant nul.

Le **code bipolaire à haute densité** permet de ne pas laisser le courant nul pendant les suites de 0. Des suites spéciales de remplissage (courant négatif, nul ou positif) sont alors insérées à la place de ces zéros. Un nouveau 1 est indiqué par un courant positif ou négatif, en violation avec la suite de remplissage.

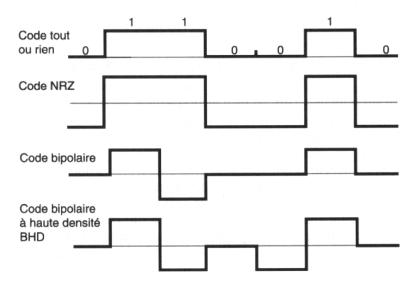


Figure 3: Codes en bande de base

De nombreux autres codages en bande de base ont été développés au gré de la demande pour améliorer telle ou telle caractéristique du signal. Nous en donnons quelques exemples à la Figure 4. Absence d'un courant continu n'est qu'un parmi plusieurs critère qui détermine le choix d'un code :

- Absence d'une composante continue lors de la transmission d'un séquence binaire quelconque.
- Concentration de la majeure partie de la puissance dans une bande de fréquence limitée, compte tenu du fait que l'affaiblissement des lignes augmente avec la fréquence.
- Bonne teneur en horloge pour faciliter la synchronisation du récepteur. Il est difficile pour le récepteur de garder la synchronisation si le signal est constant pendant de longs intervalles de temps, par exemple lors de la transmission d'une suite de bits ayant tous la même valeur. Un bon code introduit des changements du signal même dans ce cas-là.

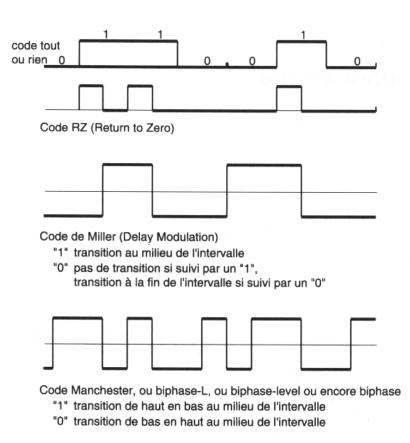


Figure 4: D'autres codes en bande de base

Le **code RZ** (*Return to Zero*) code le 0 par un courant nul et le 1 par un courant positif qui est annulé au milieu de l'intervalle de temps prévue pour la transmission d'un bit. Ce code facilite la synchronisation du récepteur.

Dans le **code Manchester** (ou biphase-L), le signal change aussi au milieu de l'intervalle de temps associé à chaque bit. Pour coder un 0 le courant sera négatif sur la première moitié de l'intervalle et positif sur la deuxième moitié. Pour coder un 1 c'est l'inverse. Autrement dit, au milieu de l'intervalle il y a une transition de base en

haut pour un 0 et de haut en base pour un 1. Un récepteur a donc un signal de synchronisation pour chaque bit aucune composante continue n'est présente dans le spectre. L'inconvénient est la largeur de bande élevée de ce code. Ce code Manchester et ses variantes sont très répandus dans les réseaux locaux, notamment dans les réseaux Ethernet.

Le **code Miller** diminue le nombre de transitions en n'effectuant pas de transition lors d'une séquence de bits 0 1. L'avantage de ce code est que la puissance du signal est très concentrée dans une bande de fréquence étroite.

4 Modulation

La dégradation très rapide des signaux au fur et à mesure de la distance parcourue constitue le principal problème de la transmission en bande de base. Si le signal n'est pas régénéré très souvent, il prend une forme quelconque, que le récepteur est incapable de comprendre. Cette méthode de transmission ne peut être utilisée que sur de très courtes distances, de moins de 5 km. Sur des distances plus longues, on utilise un signal de forme sinusoïdale. Ce type de signal, même affaibli, peut très bien être décodé par le récepteur. Ce signal sinusoïdal est obtenu grâce à un **modem** (modulateur-démodulateur) qui est un équipement électronique capable de prendre en entrée un signal en bande de base pour en faire un signal sinusoïdal (modulation) et l'inverse, à savoir restituer un signal carré à partir d'un signal sinusoïdal (démodulation). Autrement dit il permet de passer d'une entrée numérique discrète (0 ou 1) à des signaux analogiques continus, comme illustré à la Figure 5.



Figure 5: Modulation et démodulation par un modem

Le spectre des signaux modulés est centré sur la fréquence porteuse, d'où le nom de transmission par transposition de fréquence. On voit ainsi que le rôle de la porteuse est de transposer les signaux dans la bande passante du support utilisé. La porteuse n'est donc qu'un moyen de transport, et elle ne véhicule par elle-même aucune information. Seule sa modulation a une signification.

La modulation utilise une onde de référence sinusoïdale appelée porteuse dont la fréquence est très supérieure au signal modulant. La porteuse p(t) est représentée par :

$$p(t) = A_p \cos(\omega_p t + \theta_p),$$

où A_p est l'amplitude, ω_p est sa fréquence et θ_p est la phase de la porteuse. En faisant varier un ou plusieurs de ces paramètres dans le temps, de l'information peut être véhiculé. Il existe donc trois types de modulation, comme illustrés à la Figure 6.

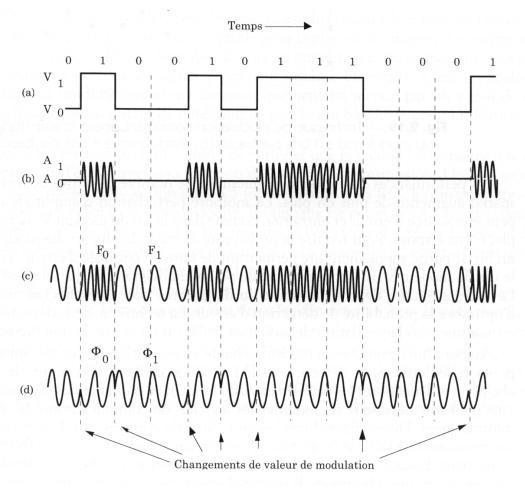


Figure 6: Types de modulations. Signal numérique binaire (a). Modulation d'amplitude (b). Modulation de fréquence (c). Modulation de phase (d)

La modulation d'amplitude (ou ASK, *Amplitude Shift Keying*) envoie un signal d'amplitude différente suivant qu'il faut transmettre un 0 ou un 1. Cette modulation a les avantages d'être très simple et de nécessiter une largeur de bande modeste. Sa faiblesse est la sensibilité aux bruits sur le canal. Elle est typiquement utilisée dans la radiodiffusion en onde longue.

La modulation de fréquence (ou FSK, *Frequency Shift Keying*) utilise deux fréquences différentes pour transmettre les 0 et 1. Elle offre une bonne résistance aux perturbations. Elle est utilisée pour des transmissions où l'affaiblissement entre émetteur et récepteur est soumis à des fluctuations, par exemple, dans les faisceaux hertziens ou pour les radiocommunications mobiles. Sa demande en largeur de bande est plus élevée que pour la modulation d'amplitude.

La modulation de phase (ou PSK, *Phase Shift Keying*) change la phase du signal suivant qu'il s'agit d'un 0 ou d'un 1.

Pour atteindre des débits binaires élevés il n'est pas possible d'agir uniquement sur l'augmentation de la rapidité de modulation étant donné les limites de bande passante et notamment la fréquence de coupure supérieure (fréquence haute) du système de transmission. D'après le théorème de Nyquist et sur un canal de transmission idéal le débit binaire maximum est limité par le double de la largeur de bande pour une transmission à un bit par moment. Les recherches entreprises sur les modems pour

leur permettre d'offrir des débits binaires plus élevés ont conduit à définir de nouvelles techniques faisant correspondre plus d'un bit par moment. C'est ce que font les modems évolués d'aujourd'hui en mixant simultanément plusieurs formes de modulation, comme c'est le cas sur la Figure 7, où l'on combine modulation de phase et modulation d'amplitude. Chaque diagramme de la Figure 7, qui montre les différentes combinaisons de modulation possibles d'amplitude et de phase, est appelé diagramme spatial. Tout modem à haute performance a son propre diagramme spatial et ne peut correspondre avec un autre modem que s'il a le même diagramme que le sien.

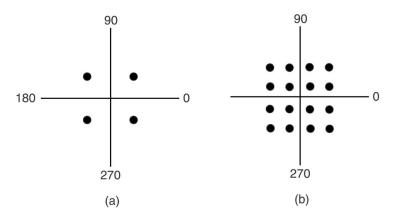


Figure 7: Technique de modulation combinant phase et amplitude

La Figure 7 (a) montre une modulation en quatre phases : 45, 135, 225 et 315 degrés et un seul niveau d'amplitude par phase ce qui conduit à 4 points différents. Ces 4 possibilités peuvent être utilisées pour transmettre 2 bits par moment.

Sur la Figure 7(b) la modulation est différente. On utilise une combinaison phase-amplitude. Les phases correspondent à l'angle de chaque point par rapport à l'axe marquée 0, l'amplitude est mesurée par la distance à l'origine. Ce diagramme fait apparaître 16 combinaisons phase-amplitude. Elles permettent de transmettre 4 bits par moment. La technique représentée par la Figure 7(b), transmet par exemple à 9'600 bit/s pour une rapidité de modulation de 2'400 bauds, porte le nom de **modulation d'amplitude en quadrature de phase** ou **QAM** (*Quadrature Amplitude Modulation*) ou plus exactement 16QAM, comme il y a 16 valeurs différentes par moment.

Les performances des modems augmentant, le nombre de points de leur diagramme spatial augmente de plus en plus (p.ex. 64QAM ou 256QAM). La moindre perturbation d'amplitude ou de phase peut être source d'erreur et entraîne, comme dans le cas de la modulation de la Figure 7(b), par exemple, 4 bits erronés. Pour réduire la probabilité d'erreur, la plupart des modems ajoutent un bit de parité supplémentaire permettant de faire un contrôle d'erreur.

5 Les médias de transmission

L'objectif de la couche physique est de transporter un flot de bits d'information d'un point à un autre. De nombreux médias sont utilisés en transmission de données. Chacun d'eux a sa propre spécificité en termes de bande passante, de délai, de coût, de facilité d'utilisation et de maintenance. Les médias sont arbitrairement classés en supports avec guide physique - les câbles électriques, les fibres optiques - et en

supports sans guide physique: les ondes radio, les ondes lumineuses. Nous examinons dans la suite de ce chapitre les médias plus répandus.

5.1 La ligne électrique

Le média de transmission le plus ancien est la ligne électrique. On distingue trois types de lignes électriques :

- Les lignes non équilibrées (asymétriques)
- Les lignes équilibrées (différentielles, symétriques), notamment la ligne à paire torsadée
- Le câble coaxial

5.2 Ligne non équilibrée

La **ligne non équilibre** (*unbalanced transmission*), aussi appelée asymétrique, est encore souvent utilisée pour des connexions à courte distance et à débit faible, comme par exemple dans les lignes série. Elles utilisent plusieurs fils pour les différents signaux et **un seul fil pour la voie retour commune**. La Figure 8 montre ce principe. Les fils sont arrangés en parallèle soit comme câble 'rond' soit comme nappe, comme illustré à la Figure 9(a) et (b).

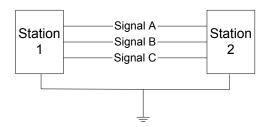


Figure 8: Principe de la transmission non équilibrée

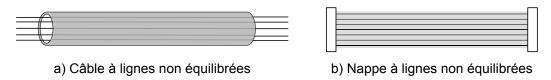


Figure 9: Câbles à lignes non équilibrées

Comme plusieurs signaux partagent la même voie retour, ce mode de transmission est très sensible aux perturbations électriques. L'arrangement asymétrique fait que les perturbations n'ont pas les mêmes effets sur les différents fils, ce qui modifie le signal transmis. Cela limite fortement le débit et la distance de transmission à travers des lignes non équilibrées. Typiquement peut atteindre un débit d'une centaine de kilobits par seconde sur une distance de quelques dizaines de mètres, comme sur les lignes séries

5.3 Ligne à paires torsadée

Une meilleure immunité aux perturbations que les lignes non équilibrées peut être atteinte en utilisant deux fils par signal – un fil pour le signal et l'autre fil pour la voie retour. Dans ce mode de **transmission équilibrée** (*balanced transmission*), aussi appelée différentielle ou symétrique, chaque signal a une voie retour séparée, ce qui

réduit les interférences entre les différents signaux. L'immunité de lignes équilibrées est encore améliorée en enroulant les deux fils, le signal et la voie retour, de manière hélicoïdale. Ce type de ligne porte le nom de **paire torsadée** (*twisted pair*). La proximité des deux fils fait que les perturbations influence de manière similaire deux fils et que l'influence sur le signal différentiel est réduite. Si plusieurs paires torsadées sont regroupées dans un seul câble le fait de torsader les fils réduit en plus diaphonie entre les paires. Deux fils parallèles constituent en effet une antenne rayonnante, ce qui n'est pas le cas de deux fils torsadés. La Figure 10 montre une paire torsadée.



Figure 10: Paire torsadée

L'application la plus courante de la paire torsadée est le système téléphonique. La quasi-totalité des téléphones dans le monde sont raccordés aux réseaux téléphoniques au moyen de paires torsadées. Les signaux transmis par l'intermédiaire de paires torsadées peuvent parcourir plusieurs kilomètres sans amplification. Au-delà de ces distances la régénération et l'amplification des signaux devient nécessaire. Elle est assurée par des répéteurs. Dans les chemins de câbles sous les rues circulent de nombreux gros câbles téléphoniques de plusieurs centimètres de diamètre regroupant plusieurs dizaines, voire plus d'une centaine de paires torsadées.

Il existe toute une variété de câbles à paires torsadées ; deux sont principalement utilisées dans les réseaux d'ordinateurs. Les **câbles de catégorie 3** sont constitués de paires de câbles isolés (quatre paires le plus souvent) faiblement torsadés et recouverts d'une gaine protectrice en plastique. Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, la plupart des immeubles d'entreprises disposaient de tels câbles de catégories 3 innervant chacun des bureaux. Ce schéma de câblage permettait de raccorder de un à quatre postes téléphoniques par bureau.

Au début des années quatre-vingt-dix, un nouveau câble à paires torsadées, de **catégorie 5**, commença à être introduit dans les bureaux. Vis-à-vis de celui de catégorie 3, il offre, sur des distances supérieures, des qualités de transmission et une immunité aux interférences bien meilleures. Ceci est associé au fait que la torsade des paires est plus serrée (plus de torsades par centimètre) et que l'isolant utilisé, le Téflon, présente de meilleures qualités d'isolation. C'est ainsi que ces câbles sont mieux adaptés à la transmission de données à haut débit entre ordinateurs. Les câbles de catégorie 3 et 5 sont appelés, dans le jargon technique : **câbles UTP** (*Unshielded Twisted Pair*), c'est-à-dire câbles à paires torsadées non blindés - par opposition aux **câbles STP** (*Shielded Twisted Pair*), câbles à paires torsadées blindés, introduits par IBM au début des années 1980, qui n'ont toutefois pas eu le succès escompté. Le câblage dans les immeubles d'entreprises utilise aujourd'hui principalement les câbles UTP de catégorie 5e, qui permettent la transmission jusqu'à 100 MHz. Ils sont utilisables avec Gigabit-Ethernet. La Figure 11 montre des schémas de câbles UTP et STP.

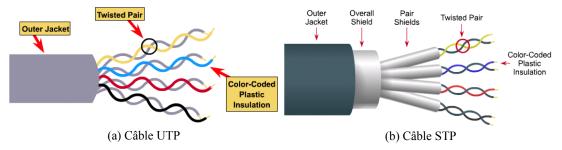


Figure 11: Câbles UTP et STP

L'autre utilisation principale des paires torsadées et dans le 'dernier kilomètre' des réseaux téléphoniques. La technologie **DSL** (*Digital Subscriber Line*) permet de les exploiter pour la transmission de données à haut débit. Les paires qui relient les abonnés au réseau téléphonique sont regroupées en câbles qui peuvent contenir jusqu'à plusieurs centaines de paires torsadées. Typiquement, ces câbles permettent la transmission à 1 MHz sur quelques kilomètres, ce qui se traduit p.ex dans les technologies xDSL en un débit de 8 Mb/s sur 3 km.

5.4 Câble coaxial

Un câble électrique, appelé câble coaxial, est également utilisé comme support de transmission. Vis-à-vis des câbles à paires torsadées, il offre surtout un meilleur blindage (une meilleure isolation électromagnétique), ce qui permet d'atteindre des débits plus élevés sur de plus longues distances.

Un câble coaxial est constitué d'un conducteur central rigide en cuivre, le coeur, entouré d'un matériau isolant de forme cylindrique enveloppé d'une tresse conductrice en cuivre. L'ensemble est enrobé d'une gaine isolante en matière plastique. La Figure 12 représente la vue éclatée d'un câble coaxial courant.

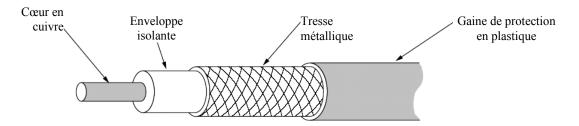


Figure 12: Un câble coaxial

Ce type de câble est utilisé dans les réseaux de télédiffusion (CATV). Ils sont capables de transmettre des signaux à des fréquences de 800 MHz sur des distances de quelques kilomètres. Pendant plus d'un démi-siècle, ces câbles ont été le milieu de transmission à grande distance par excellence. Aujourd'hui ils sont de plus en plus remplacés par les fibres optiques, au moins dans les réseaux étendus.

5.5 Les fibres optiques

Considérée comme le support permettant les plus hauts débits, la fibre optique est une technologie aujourd'hui bien maîtrisée. Dans les fils métalliques, on transmet les informations par l'intermédiaire d'un courant électrique. Avec la fibre optique, on utilise un faisceau lumineux.

Dans cette section nous étudions les fibres optiques et leur principe de fonctionnement.

Un système de transmission optique comprend trois composants :

- la source ou émetteur de lumière,
- le média de transmission et
- le détecteur ou récepteur de lumière.

Par convention une impulsion de lumière signifie un bit à 1 et l'absence de lumière un bit à 0. Le média de transmission est une fibre de verre de silice très fine, la fibre optique. Le détecteur génère une impulsion électrique dès qu'une impulsion de lumière le frappe.

En plaçant un émetteur de lumière à une extrémité de la fibre optique et un détecteur de lumière à l'autre extrémité, on dispose d'un système de transmission optique unidirectionnel. Ce système prend un signal électrique, le convertit et le transmet sous forme d'un signal lumineux qui est à son tour, à l'extrémité de la fibre, reconvertit en un signal électrique (Figure 13).

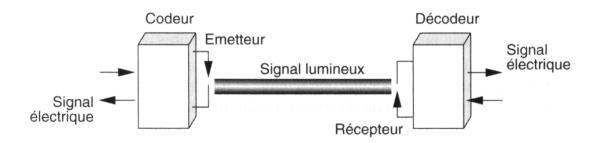


Figure 13: Une liaison par fibre optique

Sans précaution particulière, dans ce système de transmission optique, le rayon lumineux subirait de fortes pertes à tel point qu'il ne servirait à rien en pratique. En revanche, un intéressant principe d'optique rend ce système bigrement avantageux. Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre, par exemple du verre à l'air ambiant, son chemin est dévié à la frontière verre/air ; il est réfracté comme le montre la Figure 14(a).

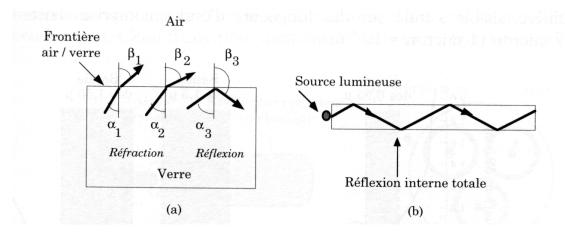


Figure 14: Principe de réflexion

Un rayon lumineux arrivant à la frontière verre/air selon un angle α_1 est réfracté avec un angle β_1 . La réfraction dépend des propriétés optiques des deux milieux (en particulier, naturellement, de leur indice de réfraction). Pour des angles d'incidence supérieurs à une valeur, dite valeur critique, le rayon n'est plus réfracté mais réfléchi sur la frontière verre/air ; pratiquement aucune quantité de lumière ne s'échappe dans l'air. Ainsi, comme le montre la Figure 14(b), un rayon lumineux arrivant dans la fibre avec un angle d'incidence supérieur ou égal à l'angle critique (par exemple α_3 sur la Figure 14(a) se propage à l'intérieur de la fibre par réflexions multiples totales - comme pris au piège, il peut ainsi se propager de la sorte pendant des kilomètres sans subir d'affaiblissements notables.

La Figure 14(b) représente le parcours d'un seul rayon incident. En fait, tous les rayons lumineux incidents qui ont un angle d'incidence supérieur à l'angle critique subissent le même sort. Ce sont donc de nombreux rayons réfléchis qui se propagent dans la fibre optique selon divers modes de propagation. Une fibre optique sujette à ce type de propagation est dite **multimode**. Si le diamètre du cœur de la fibre est réduit dans des proportions telles qu'un seul rayon lumineux puisse s'y propager, on obtient une fibre optique dite **monomode**. La fibre se comporte alors comme un guide d'ondes. Afin d'améliorer les caractéristiques de transmission dans les fibre multimodes et d'augmenter ainsi la bande passante d'un facteur 10, les fibres peuvent être fabriquées avec un indice de réfraction variant selon une parabole entre le centre du cœur et la périphérie. La fibre est alors appelée à **gradient d'indice**. Les trois types de fibres sont montrés à la Figure 15.

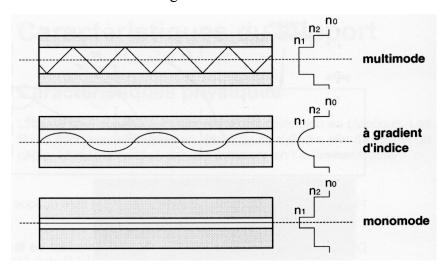


Figure 15: Les fibres multimodes, à gradient d'indice et monomodes

Les fibres optiques monomodes sont plus coûteuses que les fibres multimodes, mais elles permettent des débits binaires beaucoup plus importants et sur des distances plus longues.

Les fibres optiques sont généralement élaborées à partir d'un verre de silice extrêmement pur - matériau fabriqué en grande partie avec du sable, qui est une matière première très peu coûteuse et en quantité quasi illimitée.

Lorsqu'un signal lumineux traverse un milieu, par exemple le verre, il subit une perte de puissance : c'est l'atténuation, qui dépend très étroitement de la longueur d'onde du signal. L'atténuation de la lumière selon la longueur d'onde dans une fibre optique est exprimée en décibels par kilomètre de fibre (voir la Figure 16) :

$$Atténuation (dB) = log_{10} \frac{Puissance lumineuse émise}{Puissance lumineuse reçue}.$$

Par exemple, un facteur de perte de puissance de 2 par kilomètre donne une atténuation de 3 dB (soit $10 \log_{10} 2 = 3$). La Figure 16 montre la partie infrarouge et proche infrarouge du spectre de la lumière, qui correspond à celle couramment utilisée en pratique. La lumière visible s'étale sur des longueurs d'ondes comprises entre 0,4 micron et 0,7 micron (1 micron = 10^{-6} m).

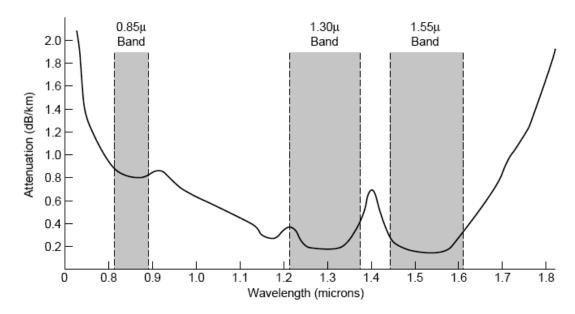


Figure 16: Atténuation de la lumière dans une fibre optique en région de l'infrarouge

Trois bandes de fréquences lumineuses sont utilisées en télécommunications. Elles sont centrées sur 0,85, 1,30 et 1,55 micron respectivement (voir la Figure 16). Les deux dernières ont de bonnes propriétés d'atténuation (inférieures à 5 % de perte par km de fibre). La bande des 0,85 micron présente une atténuation supérieure mais la propriété intéressante de cette bande est que les lasers et les diodes électroluminescentes LED (*Light Emitting Diode*) associés sont bon marché et fabriques avec un même matériau, l'arséniure de gallium (GaAs). La largeur de ces trois bandes de fréquences lumineuses varie entre 25'000 et 30'000 GHz.

Les impulsions lumineuses transmises dans une fibre optique ont tendance à se déformer et à s'élargir pendant qu'elles se propagent. Ce phénomène d'élargissement est appelé **dispersion**. Il est très dépendant de la longueur d'onde de l'impulsion lumineuse. Ainsi, deux impulsions de courte durée émises à l'entrée d'une fibre et bien séparées l'une de l'autre dans le temps peuvent arriver à l'extrémité en se chevauchant. L'une des façons d'éviter que l'élargissement des impulsions ne conduise à un chevauchement est d'augmenter la distance (le temps) qui les sépare ; cela n'est possible qu'en diminuant la vitesse de transmission des impulsions. Les fabricants de fibres optiques cherchent à développer des méthodes qui permettent de réduire la dispersion du signal optique. La fibre à gradient d'indice est une des méthodes souvent utilisées.

Des recherches ont montré qu'en utilisant des impulsions d'une forme bien spéciale qui s'apparente à celle du cosinus hyperbolique inverse, plusieurs effets de dispersions s'éliminent mutuellement et qu'il est alors possible de transmettre des impulsions lumineuses sur des milliers de kilomètres sans distorsion de forme appréciable. Ces impulsions sont appelées des **solitons**. Une action de recherches importante est menée aujourd'hui pour faire sortir ces solitons des laboratoires et leur offrir un vaste marché d'applications.

Les câbles à fibres optiques

Une fibre optique est semblable à un câble coaxial sans tresse métallique. La Figure 17(a) donne le schéma d'une fibre optique. Au centre de la fibre se trouve le cœur en verre, à l'intérieur duquel se propagent les signaux lumineux. Le cœur d'une fibre multimode a un diamètre d'environ 50 microns, il est équivalent à l'épaisseur d'un cheveu humain. Celui d'une fibre monomode varie entre 8 et 10 microns.

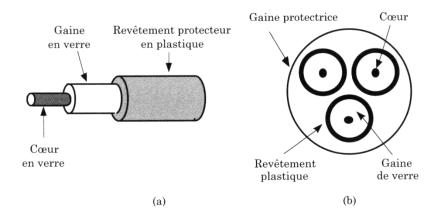


Figure 17: Une fibre optique (a) et un câble de trois fibres (b)

Le cœur de la fibre optique est entouré d'une gaine en verre présentant un indice de réfraction plus faible que celui du coeur de façon à conserver toute la lumière dans la coeur. Un revêtement protecteur en plastique enveloppe la gaine en verre. Généralement les fibres optiques sont regroupées en un faisceau de fibres à l'intérieur d'un tube ou d'une gaine protectrice externe : c'est le câble à fibres optiques. La Figure 17(b) montre un tel câble à trois fibres.

Sources lumineuses

Deux types de source lumineuse sont utilisés avec les fibres optiques, les **diodes LED** et les **diodes lasers**. Comme le montre le tableau de la Table 2, chacune des ces sources lumineuses présente des propriétés différentes. La longueur d'onde des signaux lumineux émis par ces diodes peut être ajustée dynamiquement entre deux valeurs extrêmes au moyen d'un système de filtrage spécialisé un interféromètre, inséré entre la fibre et la source lumineuse.

Caractéristique	Diode LED	Diode laser
Débit binaire	Faible	Élevé
Mode de propagation	Multimode	Multimode ou monomode
Distance	Courte	Longue
Durée de vie	Longue	Courte

Table 2: Comparaison entre diode LED et diode laser

Sensibilité à la température	Faible	Substantielle
Coût	Faible	Élevé

Le récepteur détecteur de lumière à l'extrémité de la fibre est une photodiode qui délivre une impulsion électrique dès qu'elle reçoit une impulsion lumineuse. Les photodiodes actuelles sont capables de travailler à un débit binaire de 2,5 Gb/s, 10 Gb/s, voire 20 Gb/s. Le bruit thermique peut être une source de perturbation, aussi l'impulsion lumineuse doit elle être suffisamment puissante pour ne pas être altérée. Ainsi, le taux d'erreur dans la fibre peut-il être extrêmement faible.

Multiplexage en longueurs d'ondes (WDM)

Sur les câbles métalliques et notamment sur le câble coaxial, on utilise fortement le multiplexage en fréquence, plusieurs signaux transitant en parallèle sur des fréquences différentes. On peut reprendre cette idée dans la fibre optique et réaliser le passage de plusieurs signaux lumineux simultanément. Cette méthode est appelée **multiplexage de longueurs d'onde** (*wavelength division multiplexing*, WDM). La Figure 18 montre le schéma d'un système WDM.

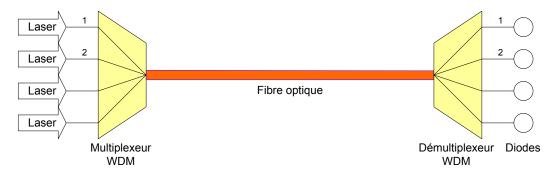


Figure 18: Schéma d'un système WDM

La mise en œuvre d'un système WDM nécessite les composants suivants :

- une série de lasers travaillant chacun à une longueur d'onde différente
- des multiplexeurs qui combinent plusieurs signaux à des longueurs d'ondes différentes
- des démultiplexeurs pour retrouver les signaux originaux, basés sur des filtres optiques fixes ou accordables.
- une série de photodiode de réception.

La variante la plus répandue de cette méthode est le **multiplexage dense de longueurs d'ond**e (Dense WDM, DWDM). Des systèmes DWDM actuels permettent le multiplexage de jusqu'à 100 canaux à 2,5 Gb/s, 10 Gb/s ou 20 Gb/s. Il est donc possible de transmettre un débit total de 2 Tb/s sur une seule fibre optique. Les distances de transmission dépendent du type de la fibre optique et peuvent atteindre plusieurs milliers de kilomètres, à l'aide d'amplificateurs passifs, comme par exemple sur des câbles sous-marins.

5.6 La transmission sans fil

Nombre de personnes pensent qu'il n'y aura plus que deux moyens de communication dans l'avenir : les fibres optiques et les liaisons sans fil. Toutes les liaisons fixes (i.e., sans mobilité) des ordinateurs, des téléphones, des fax, etc., seront en fibres optiques et tous les systèmes qui nécessitent une certaine mobilité seront associés à des liaisons sans fil.

Dans certaines circonstances, les communications sans fil présentent également nombre d'avantages même lorsqu'il s'agit de raccorder des systèmes fixes. Par exemple, imaginez que l'on doive faire passer un câble électrique ou une fibre optique dans des sites très difficiles d'accès comme des montagnes abruptes, une jungle épaisse ou des marécages. Dans ces cas-là, les systèmes de communications sans fil sont préférables.

Avant de étudier des systèmes de transmission sans fil, rappelons la théorie des ondes électromagnétiques.

5.6.1 Le spectre électromagnétique

Lorsque les électrons se déplacent ils créent des ondes électromagnétiques qui peuvent se propager dans l'espace (et dans le vide). En raccordant un circuit électrique à une antenne de dimension bien appropriée, les ondes électromagnétiques produites sont diffusées dans tout l'espace et peuvent être captées par un récepteur également muni d'une antenne qui se trouve à une certaine distance de l'émetteur. Tous les systèmes de communications sans fil sont basés sur ce principe.

Dans le vide, toutes les ondes électromagnétiques se propagent à la même vitesse quelle que soit leur fréquence. Cette vitesse de la lumière c est approximativement égale à $3\cdot10^8\,$ m/s ou 30 cm par nanoseconde. Dans le cuivre ou la fibre de verre la célérité diminue d'environ 2/3 de la valeur dans le vide et devient également quelque peu dépendante de la fréquence.

La relation fondamentale entre la fréquence f, la longueur d'onde λ et la vitesse de la lumière c (dans le vide) est

$$\lambda \cdot f = c$$
.

Comme c est une constante, si l'on connaît f on peut en déduire À, et vice versa. Par exemple, une onde de 1 MHz a une longueur d'onde d'environ 300 m et une longueur d'onde de 1 cm correspond à une fréquence de 30 GHz.

L'ensemble du domaine fréquentiel des ondes électromagnétiques fait l'objet d'une subdivision conventionnelle en gammes d'ondes qui correspondent en gros à des modes de propagation et à des types d'utilisation très différents (télécommunications, radars, applications industrielles ...). Le spectre électromagnétique et ses divisions en gammes d'ondes sont présentés à la Figure 19.

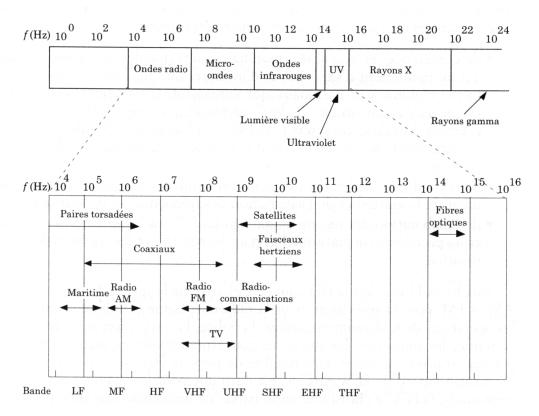


Figure 19: Spectre électromagnétique

Les divisions ondes radio, micro-ondes, ondes infrarouges et lumière visible de la Figure 19 correspondent à la partie du spectre couramment utilisée pour la transmission d'informations. Les divisions ultraviolet, rayons X et rayons gamma correspondent à des ondes apparemment plus efficaces que les précédentes pour la transmission d'informations en raison surtout de leurs fréquences élevées. Toutefois, ces dernières sont difficiles à générer et à moduler, ne se propagent pas bien au travers des immeubles et d'autres obstacles et présentent des dangers pour les êtres vivants.

La quantité d'informations qu'une onde électromagnétique peut transporter est en relation étroite avec la bande passante du système de transmission. Avec les technologies actuelles il est possible de coder quelques bits par hertz aux basses fréquences. On peut atteindre un quota de l'ordre de 40 en haute fréquence sous certaines conditions. Ainsi un câble de 500 MHz de bande passante pourrait transporter plusieurs Gb/s. En observant la Figure 19, on voit bien pourquoi les utilisateurs ont une très nette préférence pour les fibres optiques.

5.6.2 Transmission d'ondes radio

Les ondes radioélectriques (ou radio) sont faciles à générer, peuvent se propager sur de longues distances et pénétrer aisément à l'intérieur des immeubles. C'est pour cela qu'elles sont très utilisées en transmission d'informations par ondes électromagnétiques ; aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments. Les ondes radio sont omnidirectionnelles, c'est-à-dire qu'elles se propagent dans toutes les directions autour de la source d'émission. Ainsi, l'émetteur et le récepteur n'ont pas besoin d'être dans un alignement physique parfait pour entrer en communication.

Les propriétés des ondes radio sont très dépendantes de la fréquence. Aux **fréquences basses**, elles traversent aisément les obstacles mais leur puissance baisse très nettement en fonction de la distance, r, du point d'émission; approximativement $1/r^3$ dans l'air. En **hautes fréquences** les ondes radio ont tendance a se propager en ligne droite et à rebondir sur les obstacles, voire à être absorbées par ces obstacles. Elles sont aussi absorbées par la pluie. Quelque soit leur fréquence, les ondes radio sont soumises aux interférences émanant des moteurs ou autres appareils électriques.

Étant donné que les ondes radio sont capables de se propager sur de longues distances, les interférences entre utilisateurs constituent un réel problème. C'est pour cette raison que les gouvernements imposent des licences d'utilisation strictes et contraignantes aux émetteurs d'onde radio.

Dans les bandes de fréquences **VLF** (*Very Low Frequencies*), **LF** et **MF** les ondes radio se propagent en suivant la courbure terrestre comme le montre la Figure 20 (a). Ces ondes de surface peuvent être reçues dans un rayon d'environ 1000 km autour de l'émetteur pour les plus basses d'entre elles. Dans un rayon beaucoup plus faible aux fréquences plus élevées. La radiodiffusion AM et FM utilise la bande MF. Dans ces bandes de fréquences, les ondes radio passent facilement au travers les bâtiments ; vous pouvez le constater en écoutant un poste de radio portatif dans un immeuble, voire même dans un parking souterrain. L'utilisation de ces bandes de fréquences pour faire de la transmission de données pose un problème essentiel, c'est celui de la faible bande passante et du faible débit qu'elles autorisent.

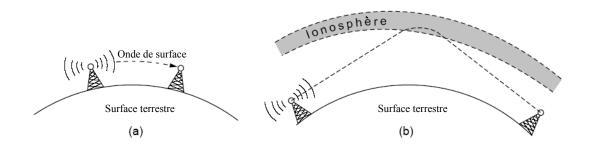


Figure 20: En VLF, LF et MF les ondes radio suivent la courbure de la terre (a). En HF et VHF, les ondes se réfractent dans l'ionosphère (b)

Dans les bandes de fréquences HF et VHF, les ondes ont tendance a être absorbées par le sol. Toutefois, les ondes qui atteignent l'ionosphère - une couche de particules ionisées qui entoure le globe terrestre à une altitude de 100 à 500 km et qui joue un rôle important dans la propagation des ondes radio - sont réfractées, absorbées ou réfléchies - renvoyées vers le sol comme le montre la figure Figure 20(b). Sous certaines conditions atmosphériques les ondes peuvent rebondir plusieurs fois. Les radioamateurs utilisent ces bandes de fréquences pour émettre sur de très longues distances. Les militaires utilisent aussi ces bandes de fréquences pour leurs communications.

5.6.3 Transmission de micro-ondes

Au-delà de 100 MHz, les ondes se propagent en ligne droite et peuvent être étroitement concentrées. En concentrant toute l'énergie électromagnétique des ondes

en un faisceau fin, avec des antennes réflectives paraboliques (semblables à celles des antennes satellites de TV), on obtient un bien meilleur rapport signal/bruit. Toutefois, pour offrir cette capacité, l'émetteur et le récepteur doivent être dans un alignement physique parfait. La concentration du faisceau et l'alignement de l'émetteur et du récepteur permettent, en outre, de constituer plusieurs liaisons simultanées, a proximité l'une de l'autre, entre plusieurs émetteurs et récepteurs sans interférences mutuelles. Pendant des décennies, les systèmes de transmission par micro-ondes ont été très utilisés, bien avant les fibres optiques, au coeur des grands réseaux de télécommunications. On a appelé ces systèmes **faisceaux hertziens**. Si les fibres optiques ont supplanté progressivement les faisceaux hertziens, de nos jours ils bénéficient d'un renouveau avec notamment la déréglementation, les nouveaux services et les progrès constants des technologies qui s'y rapportent.

Les micro-ondes correspondent à des ondes électromagnétiques de courtes longueurs d'onde - ondes décimétriques ou centimétriques, voire moindres.

Comme les micro-ondes se propagent en ligne droite, les émetteurs/récepteurs doivent être en vue directe. Ils sont placés en des points hauts du relief, ou au sommet de pylônes ou de tours appelés tours hertziennes. S'ils sont trop éloignés l'un de l'autre la surface courbe du globe terrestre devient un obstacle. En conséquence, sur des liaisons de communication à longue distance, il est nécessaire d'insérer des répéteurs régulièrement espacés pour entretenir la liaison. La distance maximale séparant deux tours (ou répéteurs) est en relation avec leur hauteur. Elle évolue comme la racine carré de la hauteur. Avec des tours de 100 m de haut on peut atteindre des distances d'environ 80 km entre deux tours hertziennes. Un autre phénomène intervient dans la limitation de l'éloignement, c'est l'affaiblissement des signaux qui est proportionnel au carré de la distance.

Contrairement aux ondes radio à basses fréquences, les micro-ondes ne passent que difficilement au travers les murs des immeubles. Des fréquences inférieures à 5 GHz sont encore utilisables pour la communication à l'intérieur d'un bâtiment. Au-delà des 5 GHz, une transmission à travers un mur devient difficile.

Bien que le faisceau d'ondes puisse être très bien concentré par l'émetteur, certaines différences d'homogénéités physiques de l'espace ambiant (température, pression, humidité ...) entraînent des réfractions et des perturbations sur la propagation des micro-ondes dans l'air. Des ondes perturbées arrivent en retard sur d'autres qui, elles, sont arrivées directement. Les ondes en retard se mélangent aux ondes directes, ce qui a pour conséquence de réduire le signal reçu jusqu'à l'annuler complètement. C'est l'effet d'évanouissement (*multipath fadding*), qui est bref et sélectif. C'est un réel problème dans ce type de transmission. De plus, ce phénomène est très dépendant de la fréquence des signaux et des conditions atmosphériques ; il apparaît pendant un faible pourcentage du temps. Certains opérateurs de télécommunications gardent en réserve 10 % de leurs faisceaux hertziens juste pour les utiliser en secours lorsque l'évanouissement se manifeste et annihile temporairement certaines bandes de fréquences.

La demande croissante de spectre et de bande passante entraîne l'amélioration de la technologie des systèmes, qui s'adaptent au mieux à ce qui est disponible. Ces systèmes veulent également utiliser des fréquences de plus en plus élevées. Des fréquences supérieures à 10 GHz sont aujourd'hui monnaie courante. Mais, aux fréquences supérieures à 8 GHz, un phénomène nouveau apparaît pour les signaux:

leur absorption par l'eau et notamment par la pluie ou la neige, qui devient sensible à partir de 12 GHz.

De nos jours la diffusion de micro-ondes et les faisceaux hertziens retrouvent une nouvelle jeunesse. De nouvelles méthodes de modulation (appelé spectre étalé) ont conduit à un essor vertigineux des transmissions sans fil.

La **boucle locale radio** rend possible le déploiement d'un réseau d'accès à haut débit sans pour autant entraîner des coûts de génie civil prohibitifs. Dans nombre de pays, la transmission par micro-ondes permet de contourner le monopole des ex-PTT sur le dernier kilomètre. La technologie **WLL** (*Wireless Local Loop*) et le standard **IEEE 802.16** (WirelessMAN ou WiMAX, en cours d'élaboration) sont les technologies les plus importantes dans ce domaine. Le standard IEEE 802.16a permettra par exemple de transmettre à un débit de 75 Mb/s sur une distance jusqu'à 10 km.

Les **réseaux locaux sans fils** sont également en plein développement du fait de la flexibilité de leur interface, qui permet à un utilisateur de changer de place dans l'entreprise tout en restant connecté. Ces réseaux, définis par la norme **IEEE 802.11** et souvent appelés réseaux WiFi (*Wireless Fidelity*), atteignent actuellement des débits de 54 Mb/s. La prochaine évolution conduira à des débits de 100 Mb/s.

Les **réseaux mobiles** de 2^{ème} (GSM) et 3^{ème} (UMTS) génération permettent également la transmission de données. Leur avantage est que la transmission reste possible même en déplacement rapide, comme par exemple dans une voiture. Le service GPRS de GSM n'offre que des débits relativement faibles de quelques dizaines de kb/s. Avec l'introduction d'UMTS, des débits allant jusqu'à 2 Mb/s seront possibles dans l'avenir. Les premières installations offriront un débit de 384 Kb/s.

5.6.4 Transmission par satellite

Trois catégories de systèmes satellitaires existent :

- LEO (Low Earth Orbit, orbite basse) à environ 1'000 km d'altitude.
- MEO (Medium Earth Orbit, orbite moyenne) à environ 10'000 km d'altitude.
- GEO (*Geostationary Earth Orbit*, orbite géostationnaire) à 35'786 km d'altitude

Les deux premières catégories concernent les satellites défilants, et la dernière les satellites qui semblent fixe par rapport à la Terre. Le choix de l'orbite influence la zone de couverture et donc le nombre de satellite nécessaire, le retard d'une transmission et la puissance du signal de transmission.

Satellites GEO

Les satellites GEO sont voués à des applications multiples : la télévision, la diffusion radio, les applications militaires et les télécommunications. En outre des systèmes de télécommunications rarement utilisées comme la téléphonie par satellites, les satellites GEO permettent aussi l'accès Internet à haut débit, par exemple dans des régions ou l'ADSL n'est pas utilisables.

Deux techniques principales existent : la voie retour par liaison téléphonique ou la voie retour par liaison satellite. Dans la solution avec voie retour par liaison

téléphonique, un abonné reçoit les données par la liaison satellite mais envoie par liaison téléphonique. Cette solution peut utiliser des antennes satellite simples (uniquement réception) et donc bon marché. L'inconvénient de cette solution sont les coûts pour la liaison téléphonique pendant la connexion à Internet.

Des antennes satellite bidirectionnelles (système VSAT, *Very Small Aperture Terminal*) permettent d'utiliser la liaison satellite pour la voie descendante et la voie montante. Des débits similaires à ADSL (p.ex. 2 Mb/s voie descendante) peuvent être atteints. Les inconvénients de cette technique sont le prix pour l'installation (autour de CHF 3000) et les délais de transmission d'au minimum 250 ms pour la voie descendante et souvent beaucoup plus pour la voie montante.

Les satellites GEO utilisent des fréquences dans la bande des micro-ondes, par exemple de 10 à 17 GHz pour la transmission de données.

Satellites MEO

A une altitude inférieure que les satellites GEO se trouvent les satellites MEO. Pour un observateur sur la Terre, ces satellites défilent lentement et effectuent une révolution complète en 6 heures environ. Comme ils se trouvent plus près de la Terre, leur zone de couverture est plus petite que celle des satellites GEO. Actuellement, ce type de satellite n'est pas utilisé pour les réseaux de télécommunications. Les 24 satellites GPS (*Global Positioning System*) sont les satellites MEO les plus importants.

Satellites LEO

Les systèmes LEO ont l'avantage de présenter un délai de propagation plus petit (autour de 10 ms) que les systèmes GEO. En revanche, la nécessité d'avoir un grand nombre de satellites pour recouvrir la Terre constitue l'inconvénient principal des satellites LEO. Vers la fin des années 90, plusieurs sociétés ont développés des réseaux de télécommunications basés sur les satellites LEO. Les plus importants d'eux sont :

- Le réseau Iridium de Motorola avec 77 satellites prévus mais ensuite réduit à 66 satellites. Iridium a été le premier de ces projets ambitieux. Le lancement des satellites à nécessité un investissement très important de 5 milliards de dollar, sans avoir un succès commercial important. En effet, cette investissement à conduit à des problèmes financiers de Motorola qui a vendu le réseau entier en 1999 à un nouvel investisseur pour un prix de 25 millions de dollar! Depuis 2001 le réseau est en service, offrant la transmission de la voix et de données à travers le monde entier. Iridium est utilisé par exemple par dans des pays sans infrastructure de télécommunications.
- Le réseau Globalstar, développé par un consortium américain autour de Qualcomm et basé sur 48 satellites LEO.
- Le réseau Teledesic, initié entre autre par Bill Gates, le fondateur de Microsoft. L'objectif de Teledesic était de fournir un accès à Internet à très haut débit, allant jusqu'à 100 Mb/s voie montante et 720 Mb/s voie descendente pour les utilisateurs individuels. Initialement, 288 satellites LEO ont été prévus, mais plus tard les contraintes du marché ont conduit les concepteurs à une réduction

à 30 satellites. L'entrée en service est prévue pour 2005 mais récemment tous les développements ont été suspendus.

6 Bibliographie

- A. Tanenbaum, « Réseaux ; Cours et exercices » ; 3^e édition ; Dunod / Prentice Hall ; 1996. Chapitres 2.2 et 2.3
- G. Pujolle, « Les réseaux » ; édition 2003 ; Eyrolles ; 2003
- P.-G. Fontolliet ; « Systèmes de Télécommunications » ; Traité d'Electricité, Vol. XVIII ; Presses polytechniques et universitaires romandes ; 1996