

**521**

# **Cours : Bases des réseaux de Télécommunications**

## Généralités et Définitions

### Les signaux :

Les signaux sont une représentation temporelle de phénomène évoluant dans le temps (courant, tension, ondes électromagnétique, ondes acoustiques, ...) et capables de se propager dans un système ou un milieu donné.

### **Ondes électromagnétiques :**

L'onde est constituée d'un champ magnétique et d'un champ électrique se propageant dans un milieu matériel ou immatériel. Elle est caractérisée par sa fréquence et sa longueur d'onde donnée par l'expression :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

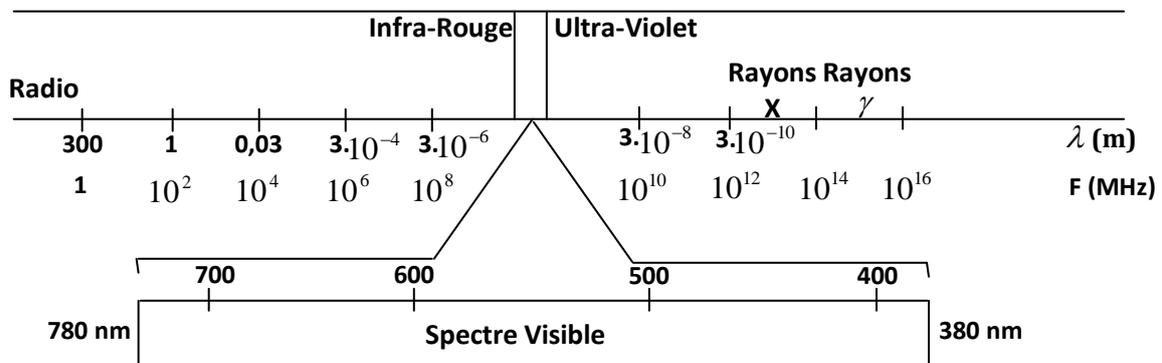
Où :

V : est la vitesse de l'onde dans le milieu considéré. Dans le vide :  $v = c$  (la célérité de l'onde).

Ainsi, plus la longueur d'onde du rayonnement est élevée, plus sa fréquence est basse et inversement.

## Spectre électromagnétique :

Le spectre électromagnétique décrit la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur fréquence :



Les ondes de faible fréquence, de quelques kilohertz (KHz) à plusieurs gigahertz (GHz), sont appelées *Ondes Radio* ou *Ondes Hertziennes*, à des fréquences plus élevées se trouvent par ordre de fréquence croissant, *l'Infrarouge*, *la lumière visible* (longueur d'onde entre  $400$  et  $700$  nm) et *l'Ultraviolet*. Enfin, aux fréquences les plus élevées, se trouvent le domaine des *Rayon X* (entre  $1$  et  $100$  nm), puis celui des *Rayons GAMMA* (longueur d'onde inférieur à  $1$  nm).

### Schéma d'un système de communication :

Un système de transmission est un système qui permet de transmettre un signal (une information) en provenance d'une source au destinataire, entre un Emetteur et un Récepteur, en utilisant un support ou un canal de transmission (matériel ou immatériel).

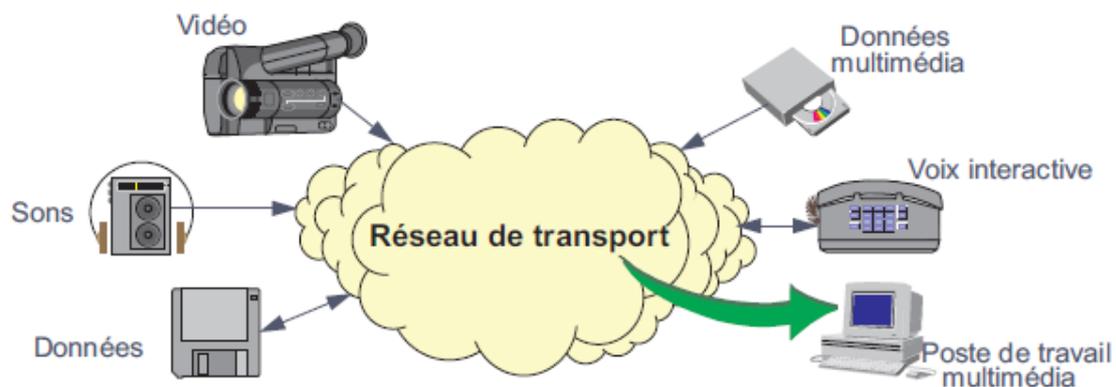


## Chapitre I: **L'information et sa représentation dans les systèmes de transmission.**

### **I - Généralités**

#### **I.1 - Les flux d'information**

L'acheminement, dans un même réseau, d'informations aussi différentes que les données informatiques, la voix ou la vidéo implique que chacune de ces catégories d'information ait une représentation identique vis-à-vis du système de transmission (son rôle est la transmission des données sans avoir de connaissance sur le type d'information transmis) et que le réseau puisse prendre en compte les contraintes spécifiques à chaque type de flux d'information (*Figure I.1*).



*Figure I.1 - Le réseau et les différents flux d'information.*

Donc, pour transmettre ce flux d'informations à distance, il est nécessaire que ces informations soient mises sous une forme appropriées et portées par un support physique : onde électromagnétique, signal électrique, lumière, onde acoustique, par exemple. Cette mise en forme impose que l'émission d'une donnée nécessite une durée non nulle. De plus, le signal qui transporte l'information peut subir des déformations dont il faut autant que possible réduire les conséquences néfastes.

Nous définirons succinctement dans les sections suivantes, les caractéristiques essentielles d'un réseau de transmission afin de qualifier ces différents flux vis-à-vis du système de transmission.

#### **I.2 - Caractéristiques des réseaux de transmission**

##### ***I.2.1 - Notion de débit binaire***

Les systèmes de traitement de l'information emploient une logique à deux états ou binaire (représentés par le chiffre 0 et 1). L'information traitée par ceux-ci doit être traduite en symboles compréhensibles et manipulables par ces systèmes. L'opération qui consiste à transformer les données en éléments binaires (deux états pour coder les informations) s'appelle le codage ou numérisation selon le type d'information à transformer. C'est avec ce codage que fonctionnent les ordinateurs.

On appelle débit binaire  $D$ , le nombre d'éléments binaires, ou nombre de bits, émis sur le support de transmission pendant une unité de temps. C'est l'une des caractéristiques essentielles d'un système de transmission. Le débit binaire s'exprime par la relation :

$$D = \frac{V}{t}$$

Avec  $D$  : Débit) en bits par seconde (bit/s).

$V$  : Le volume à transmettre exprimé en bits.

$t$  : La durée de la transmission en seconde.

Le débit binaire mesure le nombre d'éléments binaires transitant sur le canal de transmission pendant l'unité de temps.

### ***1.2.2 - Le bit***

Le terme bit ( $b$  avec une minuscule dans les notations) signifie « *binary digit* », c'est-à-dire 0 ou 1 en numérotation binaire. Il s'agit de la plus petite unité d'information manipulable par une machine numérique.

### ***1.2.3 - L'octet***

L'*octet* (en anglais *byte* ou  $B$  avec une majuscule dans les notations) est une unité d'information composée de 8 bits. Il permet par exemple de stocker un caractère, tel qu'une lettre ou un chiffre.

Ce regroupement de nombres par série de 8 permet une lisibilité plus grande, au même titre que l'on apprécie, en base décimale, de regrouper les nombres par trois pour pouvoir distinguer les milliers. Le nombre « 1 256 245 » est par exemple plus lisible que « 1256245 ».

### ***1.2.4 – Notion de rapport Signal sur Bruit***

Les signaux transmis sur un canal peuvent être perturbés par des phénomènes électriques ou électromagnétiques désignés sous le terme générique de *bruit*. Le bruit est un phénomène qui dénature le signal et introduit (engendre) des erreurs. Le rapport entre la puissance du signal transmis et celle du signal de bruit qualifie le canal vis-à-vis du bruit. Ce rapport, appelé rapport signal sur bruit (S/N avec N pour *Noise*), s'exprime en dB (décibel) :

$$S / N_{dB} = 10 \log_{10} (S / N)_{(en-puissance)}$$

### ***1.2.5 – Notion de taux d'erreur***

Les perturbations propres au système de communication (bruit, distorsion), rayonnement E.M et les interférences peuvent entacher l'erreur des informations transmises (bit erroné). Une liaison qualifiée par son taux d'erreurs  $T_e$ , est défini par le rapport entre le nombre d'informations erronés et le nombre d'information transmise.

$$T_e = \frac{nb - bits - erronés}{nb - bits - transmis}$$

*Exemple* : soit la transmission de la suite :

E → 011001001100100101001010

R → 011001101100101101000010

Quel est le taux d'erreurs de ce canal ?

*Solution* :

$$T_e = \frac{3}{24} = 0,125$$

Le taux d'erreurs varie en pratique de  $10^{-4}$  (liaison RTC : Réseau Téléphonique Commuté) à  $10^{-9}$  (Réseaux locaux).

Si  $\tau_e$  est la probabilité pour qu'un bit reçu soit erroné, la probabilité de recevoir un bit correct est  $(1-\tau_e)$ .

Pour qu'un bloc (message) de  $n$  bits reçus soient corrects, la probabilité associée est de  $(1-\tau_e)^n$ .

**Exercice :** Supposons une transmission de 100 caractères : (code CCITT N°5, 7bits) émis sur une liaison en mode synchrone à 4800bits/s avec un taux d'erreurs par bits  $\tau_{eb} = 10^{-4}$ .

Les erreurs sont supposées être distribuées aléatoirement. Déterminer la probabilité pour que le message reçu soit correct ?

**Solution :**

Le message de 100 caractères correspond à un bloc de  $100 \times 7 = 700$  bits.

La probabilité de recevoir le bloc correctement est de :

$$P_b = (1-\tau_{eb})^{700} = (1-0,0001)^{700} = (0,9999)^{700} = 0,932$$

La probabilité de recevoir le message erroné est de :

$$P_e = 1 - P_b = 1 - 0,932 = 0,068 .$$

### ***1.2.6 – Notion de temps de transfert***

Le temps de transfert, appelé aussi temps de transit ou temps de latence. Il mesure le temps entre l'émission d'un bit, à l'entrée du réseau et sa réception en sortie du réseau. Ce temps prend en compte le temps de propagation sur le ou les supports et le temps de traitement par les éléments actifs du réseau (nœuds). Le temps de transfert est un paramètre important à prendre en compte lorsque la source et la destination ont des échanges interactifs. Pour un réseau donné, le temps de transfert n'est généralement pas une constante, il varie en fonction de la charge du réseau. Cette variation est appelée *gigue* ou *jitter*.

### ***1.2.7 – Notion de spectre du signal***

Le mathématicien français Joseph Fourier (1768 – 1830) a montré que tout signal périodique de forme quelconque pouvait être décomposé en une somme de signaux élémentaires sinusoïdaux (fondamental et harmoniques) autour d'une valeur moyenne (composante continue) qui pouvait être nulle. L'ensemble de ces composantes forme le spectre du signal ou bande de fréquence occupée par le signal (largeur de bande).

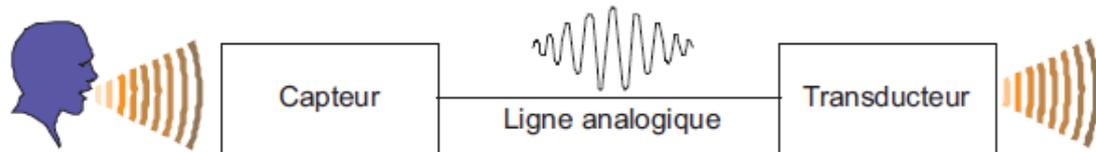
## **I.3 – Représentation de l'information**

### ***I.3.1 – Les différents types d'information***

Les informations transmises peuvent être réparties en deux grandes catégories selon ce qu'elles représentent et les transformations qu'elles subissent pour être traitées dans les systèmes informatiques.

On distingue :

- Les données discrètes : l'information correspond à l'assemblage d'une suite d'éléments indépendants les uns des autres (suite discontinue de valeur) et dénombrables (ensemble fini). Par exemple, un texte est une association de mots eux-mêmes composés de lettres (symboles élémentaires).
- Les données continues ou analogiques résultent de la variation continue d'un phénomène physique (*Figure I.2*) : température, voix, image... Un capteur fournit une tension électrique proportionnelle à l'amplitude du phénomène physique analysé : signal analogique (signal qui varie de manière analogue au phénomène physique). Un signal analogique peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle déterminé (borne).



*Figure I.2 – Le signal analogique.*

Pour traiter ces informations par des équipements informatiques, il est nécessaire de substituer à chaque élément d'information une valeur binaire représentative de l'amplitude de celui-ci. Cette fonction (opération) porte le nom de codage de l'information (codage à la source) pour les informations discrètes et numérisation de l'information pour les informations analogiques.

### ***1.3.2 – Codage des informations***

## Définition

Comme définition, le codage consiste à transformer, à transcrire et à faire correspondre (bijection) à chaque symbole d'un alphabet (élément à coder) une représentation binaire (*mot-code*). L'ensemble des mots codes constitue le code (*Figure 1.3*). Ces informations peuvent aussi bien être un ensemble de commandes d'une machine outil que des caractères alphanumériques...

Un code peut contenir :

- Les chiffres : [0, ...,9];
- Les lettres de l'alphabet : [a, ...,z, A, ...,Z];
- Les symboles : [é, è, à, ...];
- // de ponctuation : [, ; : . ? !];
- // semi-graphiques : [¶ ▄ ▌ ...];
- Les commandes nécessaires au système : [Saut de ligne, Saut de page, Fin de fichier, ...].

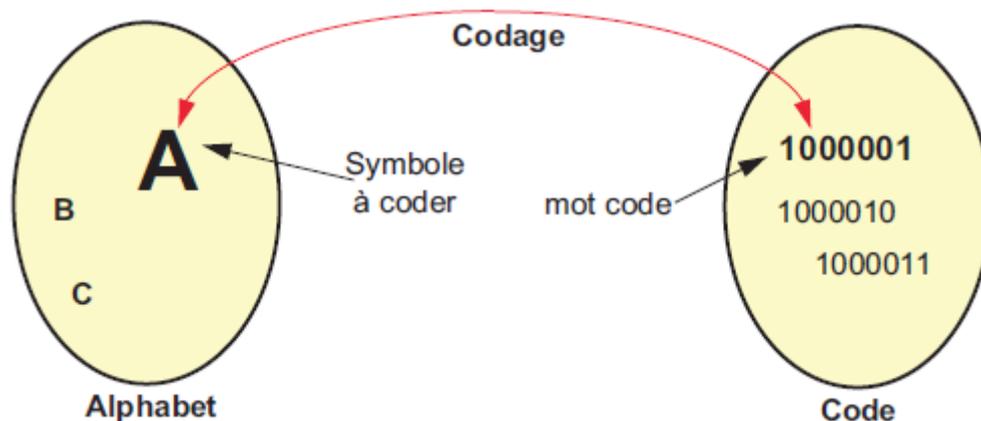


Figure 1.3 – Principe du codage des données.

Son intérêt est triple :

A-Le codage est un intermédiaire qui permet d'élaborer le signal grâce auquel les liaisons de communications deviennent possibles. L'information peut être ainsi traitée.

Exemple :

L'objet du codage Morse est de fabriquer des signaux électriques propres à être véhiculé par une ligne ou une onde porteuse.

B-Le codage possède un rôle économique, la compacité des textes codés permet d'accélérer un débit d'information, d'adapter une source à un canal et d'augmenter la capacité d'un mémoire.

C-Le codage permet aussi de lutter contre le bruit, avec un certain allongement des textes codés. Il est possible de détecter et même de corriger les erreurs de transmission.

*Puissance lexicographique d'un code*

On appelle puissance lexicographique d'un code, le nombre de symboles qu'il est possible de représenter à l'aide de ce code. Avec le code binaire on peut coder  $2^n$  symboles, pour  $n$  éléments binaires (bits).

Donc avec  $n$  bits, on peut coder  $N$  symboles car :  $2^{n-1} < N \leq 2^n$ . Le nombre de bits nécessaire pour coder  $N$  symboles est donc :

$$n = \log_2 N$$

Exemple : Combien de bits sont nécessaires pour coder toutes les lettres de l'alphabet française et qu'elle est la quantité d'information transmise par une lettre, en supposant équiprobable l'apparition de chaque lettre ?

Solution :

1- Le nombre de bits nécessaires pour coder les 26 lettres de l'alphabet est donné par :

$$2^{n-1} < N \leq 2^n \text{ Avec } N = 26.$$

$$n = \log_2 26 = 5 \longrightarrow 2^4 < 26 \leq 2^5$$

Ainsi il faut 5 bits pour coder les 26 lettres de l'alphabet.

*Quantité d'information*

La quantité d'information transmise par une lettre est :

$$H = \log_2 \left( \frac{1}{p} \right)$$

Où :

P: est la probabilité d'apparition de chaque lettre.

Soit  $p = 1/26$

$$\longrightarrow H = \log_2 26 = 3,32 \log_{10} \left( \frac{1}{26} \right) = 3,32 \cdot 1,4149$$

H = 4,66 bits.

*Les différents types de codes*

Généralement, on utilise les codes de *longueur fixe*, c-à-d que le nombre de symboles binaires (nombre de bits) utilisés pour représenter un élément du code est identique pour tous les éléments du code. Certain technique comme la compression de données utilise des codes de *longueur variable*.

- **Les codes de longueur fixe**

Chaque état du système est codé par un certain nombre de bits, appelé longueur du code, longueur du mot code ou encore code à n moments.

- **Le code BAUDOT** : à 5 moments (éléments) binaires, il est utilisé dans les réseaux télex (Télégraphique). Ce code autorise :  $N = 2^5 = 32$  symboles (ou caractères).

Ce qui est insuffisant pour représenter les 26 lettres de l'alphabet plus les 10 chiffres plus les commandes annexes (Saut de ligne, Fin de fichier, ...).

- **Le code ASCII** : (American Standard Code for Information Interchange), est un code à 7 moments (éléments binaires). Il autorise  $2^7 = 128$  caractères. Ce code étendu à 8 moments, constitue l'alphabet de base des micro-ordinateurs du type PC.
- **Le code EBCDIC** : (Extended Binary Decimal Interchange Code) code à 8 moments d'origine IBM est utilisé dans les ordinateurs du constructeur IBM.

Ce code a été adopté par d'autres firmes telles que (BULL, ...).

- **Les codes de longueur variable**

Les codes des longueurs variables sont utilisés dans la compression des données par exemple : le code HUFFMAN.

La longueur binaire (nombre de bits) d'un *mot-code* (symbole) est autant plus faible que l'apparition de symbole codé est importante.

1- *Construction du code HUFFMAN :*

Soit par exemple à coder un message dont la probabilité d'apparition des caractères (symboles) est donné par le tableau suivant :

E	A	S	T	U	Y
0,34	0,28	0,13	0,12	0,08	0,05

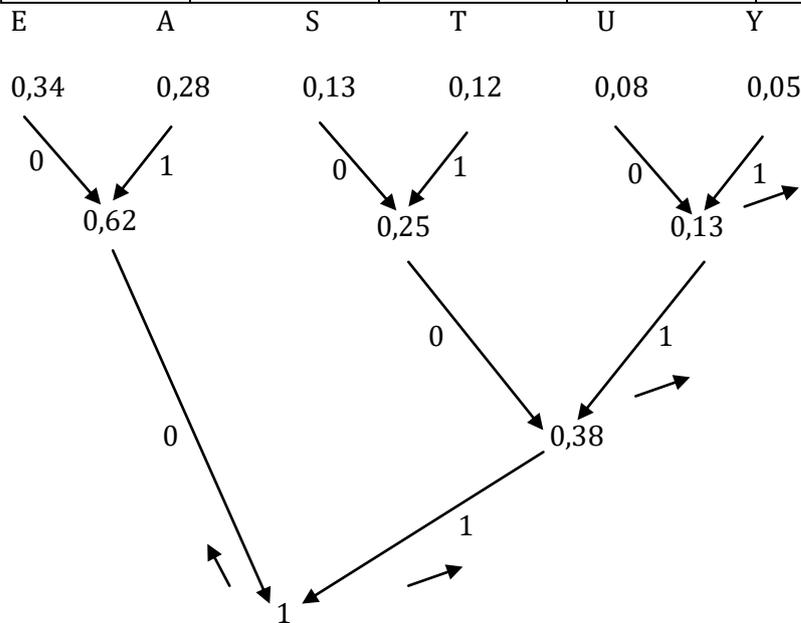


Figure I.3 – L'arbre de HUFFMAN.

2- *Méthode :*

Ecrire dans l'ordre décroissante les symboles des codes HUFFMAN (ici : E, A, S, T, U, Y).  
 Indiquer la fréquence d'apparition de symbole (0,34 ; 0,28 ; ...).  
 Regrouper deux à deux les termes pour obtenir la combinaison la plus petite (0,08+0,05 = 0,13).  
 Construire l'arbre et le remonté en attribuant les valeurs zéro au branche gauche et 1 au branche droite.  
 Lire de la racine de l'extrémité, par exemple la lettre A se lit 01.  
 On peut calculer le nombre de bits moyen par symbole est donnée par :

$$\frac{\sum bits}{nbdesymbole}$$

Taux moyen de compression pour 100 caractères :  
 Le nombre de bits pour 100 caractères est de :

- Pour le code HUFFMAN :  $100 \cdot (2.0,34 + 2.0,28 + 3.0,13 + 3.0,12 + 3.0,08 + 3.0,05) = 238\text{bits}$ .
- Pour l'EBCDIC :  $8 \cdot 100 = 800\text{bits}$ .
- Pour le code ASCII :  $7 \cdot 100 = 700\text{bits}$

Donc la compression / à l'EBCDIC :  $800/238 = 3,36$ .

Et la compression / à l'ASCII :  $700/238 = 2,94$ .

A l'aide des résultats précédentes, on transmet le message « 1001010110111000 », quel est ce message ?

100 : S, 101 : T, 01 : A, 101 : T, 110 : U, 00 : E.

Donc le message obtenu est : « **STATUE** ».

### I.3.3 - Numérisation des informations

#### Principe

Numériser une grandeur analogique consiste à transformer la suite continue de valeurs en une suite discrète et finie. A cet effet, on prélève, à des instants significatifs, un échantillon de signal (Figure I.4), c-à-d c'est de remplacer un signal  $U_1(t)$  par un autre  $U_2(t)$  qui est :

- Egal en valeur instantané à  $U_1(t)$  ( $U_1(t) = U_2(t)$ ) pendant un brève instant de durée  $\tau$  répéter périodiquement avec  $F_e$  qui est dite fréquence d'échantillonnage ( $1/T_e$ ).
- Nul entre ces instants

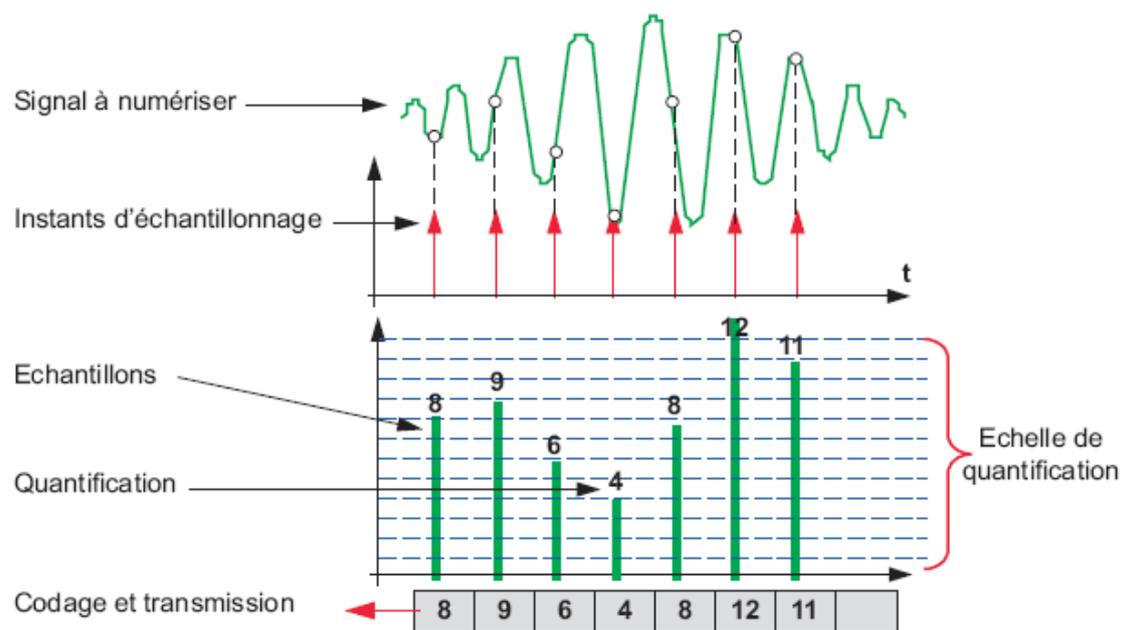


Figure I.4 – Numérisation d'un signal analogique.

Ensuite, on exprime son amplitude par rapport à une échelle finie (quantification). Le récepteur, à partir des valeurs transmises, reconstitue le signal d'origine. Une restitution fidèle du signal nécessite que soient définis :

- L'intervalle d'échantillonnage qui doit être une constante du système (fréquence d'échantillonnage).
- L'amplitude de l'échelle de quantification, celle-ci doit être suffisante pour reproduire la dynamique du signal (différence d'amplitude entre la valeur la plus faible et la valeur la plus forte).
- Que chaque valeur obtenue soit codée.

La figure I.4 représente les différentes étapes de la numérisation du signal. A intervalle régulier (période d'échantillonnage), on prélève une fraction du signal (échantillon).

Puis, on fait correspondre à l'amplitude de chaque échantillon une valeur (quantification), cette valeur est ensuite transformée en valeur binaire (codification). La quantification définit des valeurs en escalier (par bond) alors que le phénomène à quantifier varie de façon continue. Aussi, quel que soit le nombre de niveaux utilisés, une approximation est nécessaire, celle-ci introduit une erreur dite de quantification ou bruit de quantification qui est :

$$\varepsilon(t) = U1(t) - U1^*(t) \approx \frac{1}{2} \Delta i \quad (\text{Distorsion de Quantification}).$$

Soit un signal dont le spectre est limité et dont la borne supérieure vaut  $F_{\max}$ , Shannon a montré que si  $F_e$  est la fréquence d'échantillonnage, le spectre du signal échantillonné est le double de  $F_{\max}$  et est centré autour de  $F_e, 2F_e, \dots, nF_e$ . Par conséquent, pour éviter tout recouvrement de spectre, le signal à échantillonner doit être borné à une fréquence supérieure telle que  $F_{\max}$  soit inférieure à la moitié de l'intervalle d'écartement des spectres ( $F_e$ ). La figure I.5 illustre cette relation appelée **relation de Shannon**.

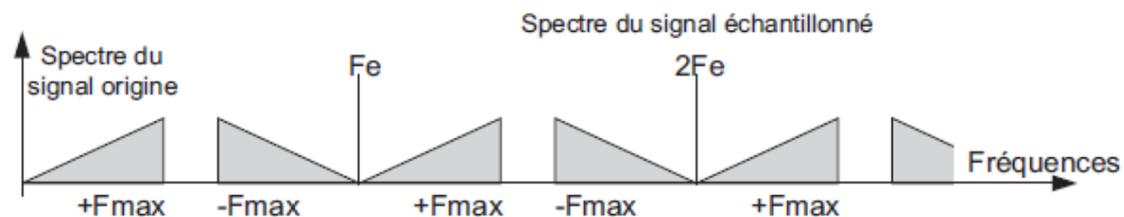


Figure I.5 - Spectre d'échantillonnage.

On en déduit que la fréquence minimale d'échantillonnage (fréquence de Nyquist) d'un signal doit être le double de la fréquence maximale du signal à échantillonner :

$$F_{\text{échantillon}} = 2 \cdot F_{\text{max\_du\_signal}}$$

#### Application à la voix

Un canal téléphonique utilise une plage de fréquence ou Bande passante (BP) allant de 300 Hz à 3400 Hz. Si on prend 4000 Hz comme fréquence maximale à reproduire, la fréquence d'échantillonnage minimale est de :  $F_e \geq 2 \cdot F_{\max} = 2 \cdot 4000 = 8000 \text{ Hz}$ .

En codant chaque échantillon sur 8 bits, il est nécessaire d'écouler :

$$8000 \cdot 8 = 64000 \text{ bits par seconde sur le lien.}$$

Ce qui correspond à un débit de 64 000 bit/s. Ce choix correspond à celui du **RNIS** (Réseau Numérique à Intégration de Service ou **ISDN**, *Integrated Service Digital Network*) qui utilise des voies à 64 kbit/s.

#### Codage de l'image vidéo

La voix est un phénomène vibratoire, l'oreille perçoit des variations de pression successives qu'elle interprète. L'image est interprétée globalement par l'œil alors qu'elle ne peut être transmise et reproduite que séquentiellement. La discrétisation de l'image nécessite deux étapes : d'abord une transformation espace/temps qui se concrétise par une analyse de celle-ci, ligne par ligne, puis une décomposition de chaque ligne en points, enfin la quantification de la valeur lumineuse du point, valeur qui est ensuite transmise.

Chaque point de l'image est représenté par deux grandeurs, la luminance et la chrominance. La chrominance, ou information de couleur, est le résultat de la superposition de trois couleurs dites primaires. Ces deux grandeurs sont reliées entre elles par la relation :

$$Y = 0,3 R + 0,59 V + 0,11 B$$

Où :  $Y$  est la luminance (échelle des gris).

$R$  : L'intensité de la composante de lumière rouge.

$V$  : Celle de lumière verte.

$B$  : Celle de lumière bleue.

Seuls sont transmis : la luminance  $Y$ , pour la compatibilité avec les récepteurs monochromes, et les signaux de chrominance  $B$  (Bleu) et  $R$  (Rouge). La connaissance de ces trois grandeurs est nécessaire et suffisante pour reconstituer la quatrième :  $V$  (Vert). L'œil ne percevant pas la couleur dans les détails, on se satisfait d'une définition moindre pour l'information couleur que pour l'information monochrome (noir et blanc).

Ainsi, on transmet :

- 720 points par ligne pour le signal  $Y$  ;

- 360 points pour chacune des couleurs  $B$  et  $R$  ;

Au total 1440 points élémentaires par ligne sont analysés. En se contentant d'une quantification sur 255 niveaux (8 bits, soit 16 millions de couleurs), le nombre de bits nécessaires à la reconstitution de l'image (576 lignes) est donc de :

$$N(\text{bits}) = 1440 \times 8 \times 576 = 6635520 \text{ bits.}$$

À raison de 25 images par seconde (50 demi-images), il faut, pour transmettre une image animée, un débit minimal de :

$$D_{\min} = 6635520 \times 25 = 166 \text{ Mbit / s}$$

*N.B :* On ne transmet pas directement les informations de chrominance, mais les signaux dits de différence de couleur  $D_r = R - Y$ ,  $D_b = B - Y$ ,  $D_v = V - Y$ . Dans ces conditions, l'amplitude du signal  $V$  étant la plus importante, la valeur  $D_v$  est la plus faible, donc la plus sensible aux bruits de transmission. C'est cette analyse qui a conduit au choix de  $D_r$  et  $D_b$  comme signaux à transmettre.

#### **I.4 – Notion de qualité de service**

Les communications traitent des flux numériques et non des informations. Cependant, selon le type de données les contraintes en termes de débit (volume), de temporalité (temps de transfert et variation de celui-ci) et fiabilité (taux d'erreur) diffèrent. Ainsi, un transfert de fichier est défini par un flux binaire constant, il requiert un débit relativement important et est très peu sensible au temps de transmission. Plus exigeant en terme de temps de transfert (interactivité), les applications informatiques de type conversationnel sont caractérisées par la sporadicité des flux qu'elles soumettent au système de transmission.

Moins sensible aux erreurs, la voix et la vidéo ont des exigences strictes en matière de débit (débit minimal garanti), de temps de transfert et surtout de récurrence temporelle (gigue), elles sont qualifiées de données isochrones. La compression opérée sur ces types de données engendre des flux variables.

*Conclusion*

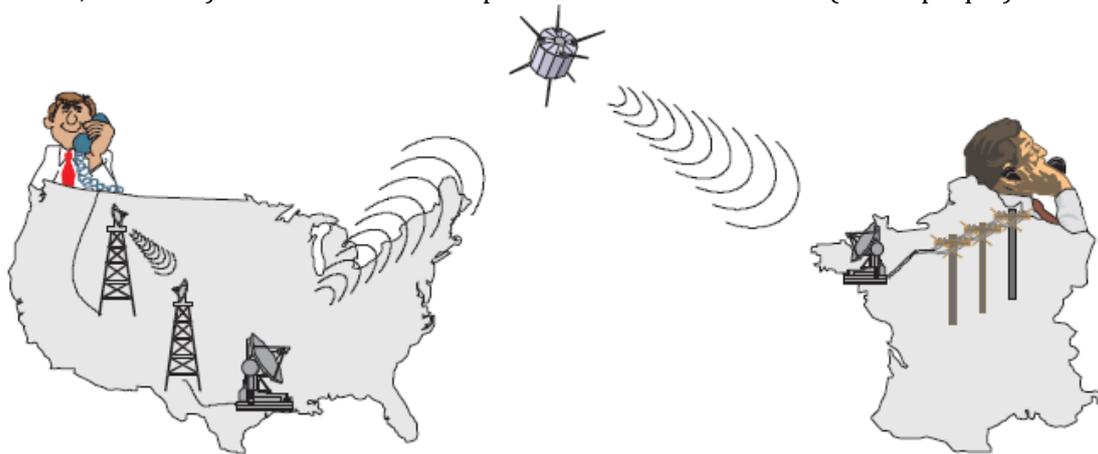
La notion de qualité de service est au cœur de la recherche de nouveaux protocoles et des développements des réseaux. Des solutions ont été apportées à ce problème dans les protocoles de dernières générations tels qu'**ATM** (*Asynchronous Transfer Mode*), tandis que les protocoles plus anciens comme **TCP/IP** (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) ont été adaptés et enrichis pour en tenir compte.

*NB* : Isochrone : se dit des flux de données dans lesquels l'écart de temps entre deux informations successives doit être constant. Au cas où le réseau de transmission introduirait un décalage, un mécanisme spécifique doit être mis en œuvre par le récepteur.

## Chapitre II: **Les supports de transmission.**

### **II.1 – Préambule**

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, coaxial), celles des ondes électromagnétiques (faisceaux hertziens, guides d'onde, satellites) ou encore celles du spectre visible de la lumière (fibre optique).



*Figure II.1 – Une liaison informatique peut mettre en œuvre plusieurs types de support.*

Généralement on classe les supports en deux catégories :

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

### **II.2 – Caractéristiques des supports de transmission**

#### **II.2.1 – Bande passante et système de transmission**

##### *Généralités*

L'impulsion électrique représentative d'un élément binaire est affaiblie et déformée par le système de transmission (*Figure II.2*)



*Figure II.2 – Déformation du signal par le support de transmission.*

À l'extrémité de la ligne, le récepteur doit identifier et décoder le signal. Cette opération ne peut valablement être réalisée que si le signal n'a pas été exagérément modifié pendant la transmission. Ces modifications dépendent d'une part de la nature du signal (spectre du signal) et d'autre part, de la réponse en fréquence du système (bande passante).

#### *Notions d'analyse spectrale*

Comme il a été cité auparavant, le physicien Fourier a montré que tout signal périodique non sinusoïdal peut être considéré comme la somme d'une composante continue ( $A_0$ ) et d'une infinité de signaux sinusoïdaux d'amplitude et de phase convenablement choisies. Le théorème de Fourier peut s'exprimer sous la forme de :

$$u(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{i=\infty} U_i \cos(i\omega t + \varphi_i)$$

La composante de même fréquence que le signal d'origine est appelée **fondamental**. Les autres composantes, multiple de la fréquence du signal fondamental, sont appelées **harmoniques**. La figure II.3 illustre la décomposition d'un signal carré.



*Figure II.3 – Décomposition d'un signal carré symétrique par rapport au 0 volt.*

Donc on peut considérer que chaque signal périodique quelconque comme étant une infinité de signaux sinusoïdaux. La représentation de l'énergie contenue dans les composantes est appelée **raie de fréquence** (transformation de l'espace temps en espace fréquence). L'ensemble des raies de fréquence constitue le spectre de fréquences (spectre de raies)

du signal. L'espace de fréquence occupé par le spectre se nomme largeur de bande (Figure II.4).

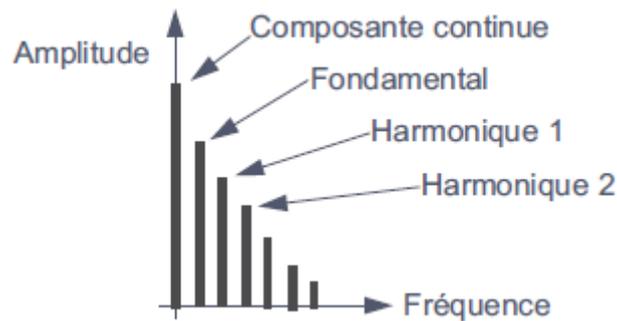


Figure II.4 – Notion de spectre du signal.

En théorie, la largeur de bande d'un signal non sinusoïdal est infinie.

La figure suivante illustre la reconstitution du signal de la figure II.3 à partir de ces seules trois premières composantes. En 1, le fondamental et la première harmonique donne un signal différent du signal d'origine. En 2, on additionne, au signal obtenu en 1, la troisième harmonique : le signal est plus proche du signal d'origine.

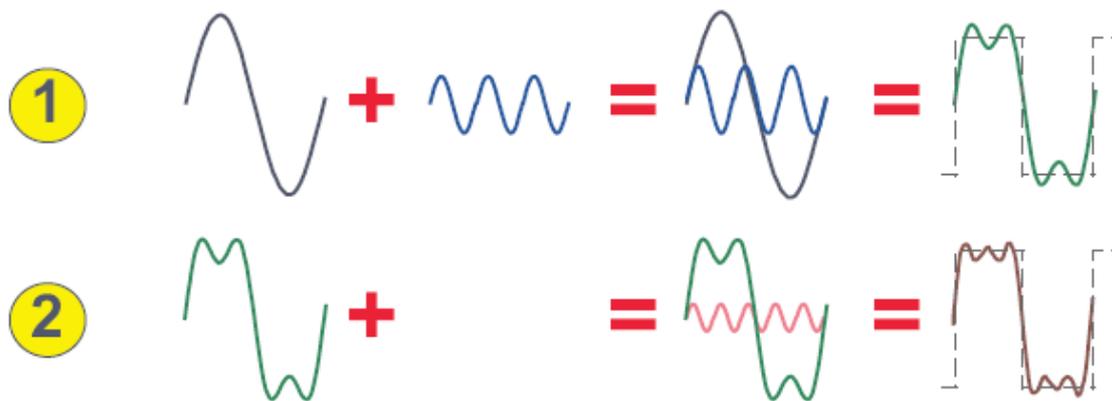


Figure II.5 – Reconstitution du signal d'origine.

En pratique, les cinq premières harmoniques sont suffisantes pour reconstituer un signal satisfaisant.

## Notions de bande passante

La réponse en fréquence d'un système est obtenue en utilisant un générateur dont on fait varier la fréquence à tension constante (générateur de fréquence). La mesure de la puissance en sortie de ce système permet de tracer une courbe, dite ***courbe de réponse en fréquence*** (Figure II.6).

La courbe de la figure II.5 montre que le système de transmission ne transmet 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 II.2). La distorsion est dite en amplitude quand les éléments constitutifs du signal, fondamental et harmoniques, ne sont pas affaiblis identiquement. La distorsion est dite de phase quand les différents éléments du signal ne sont pas tous transmis dans un même délai.

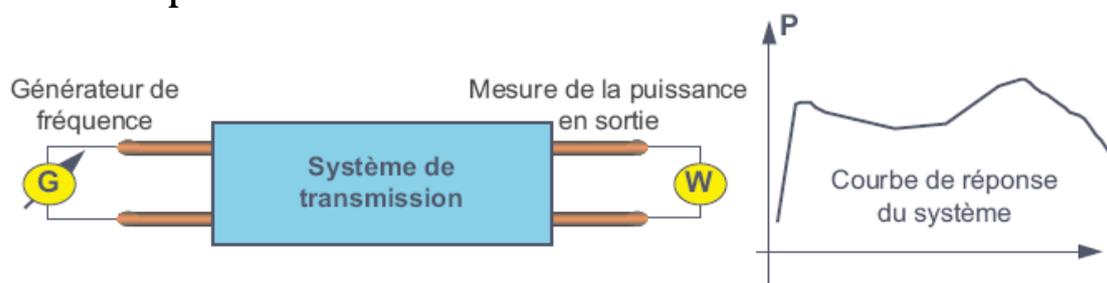


Figure II.6 – Reconstitution du signal d'origine.

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

$$A = 10 \log_{10} P_1/P_0$$

$P_1$  : puissance du signal en sortie.

$P_0$  : puissance du signal de référence

La bande passante est généralement définie pour une atténuation en puissance de moitié, ce qui correspond à -3 dB (figure II.7).

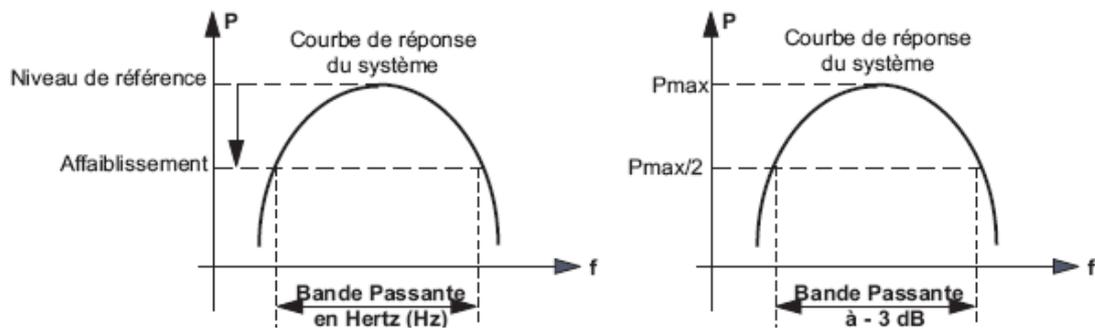


Figure II.7 – Bande passante à -3 dB.

La **largeur de bande** d'un signal correspond à la bande passante minimale que le système doit posséder pour restituer correctement l'information. Ainsi, la bande passante qualifie le système, et la largeur de bande qualifie le signal.

### Notion de filtre

Un système ne restitue pas les différentes composantes du signal de manière identique, il agit comme un filtre. En fonction de l'espace de fréquence que le système retransmet, on distingue 3 types de filtres (figure II.8).

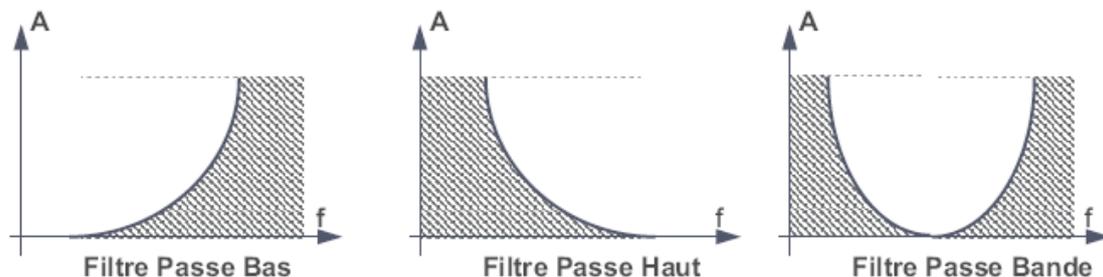


Figure II.8 – Différents types de filtres.

Deux données caractérisent un filtre :

- La fréquence de coupure ( $f_c$ ), ou fréquence à partir de laquelle on considère que toutes les fréquences supérieures et (ou) inférieures sont atténuées d'une valeur donnée (généralement -3 dB).

- La pente de la courbe d'affaiblissement qui s'exprime en dB par octave.

### II.2.2 - Impédance caractéristique

Un support de transmission est constitué de deux conducteurs de cuivre séparés par un isolant. Les pertes engendrés par un tronçon de ligne peuvent dû par les éléments suivants : (Figure II.9)

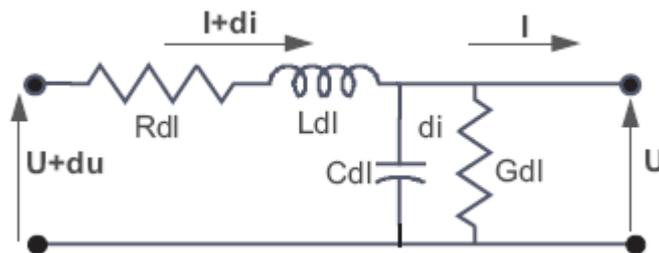


Figure II.9 - Schéma équivalent d'un tronçon d'une ligne de transmission.

$Z_c$  est donnée:

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

Avec  $\omega = 2\pi \cdot f$ ,

$\omega$  est la pulsation du courant exprimée en radian/s.  
 $f$ , en Hz, la fréquence du signal.

$Z_c$ , ou impédance caractéristique, est l'impédance d'une ligne de longueur infinie.

On montre (Figure II.10) 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*).



Figure II.10 – Notion d'adaptation d'impédance.

### II.2.3 – Coefficient de vélocité

Un coefficient de vélocité est une grandeur qui calcule (mesure) la vitesse de propagation du signal dans un support. Il définit le rapport entre la vitesse de propagation réelle et la vitesse de la lumière ( $c = 3.10^8$  m/s). Pour les câbles cuivre, il vaut environ 0,7.

$$V = v.c$$

V : Vitesse de propagation réelle du courant en m/s.

v : Coefficient de vélocité.

c : Célérité ou vitesse de la lumière.

## II.3 – Les supports guidés

### II.3.1 – La paire torsadée

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.



*Figure II.11 – Paire torsadée ou paire symétrique.*

Les câbles contiennent 1 paire (desserte téléphonique), 4 paires (réseaux locaux), ou plusieurs dizaines de paires (câble téléphonique).

#### *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 II.12). La diaphonie, 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.

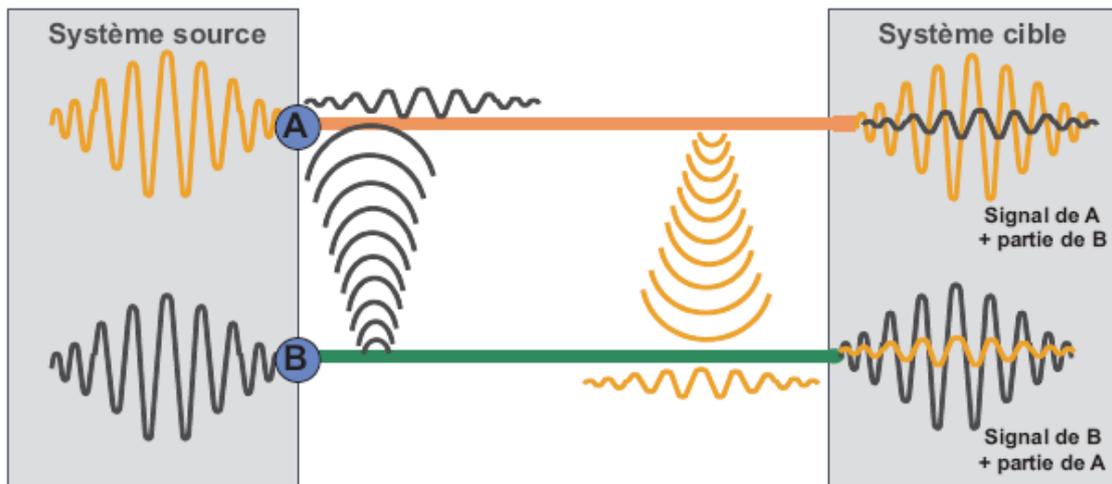


Figure II.12 – Couplage inductif entre paires : la diaphonie.

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*). Ces rapports sont exprimés en dB, plus grande est la valeur meilleur est le câble utilisé (Figure II.13).

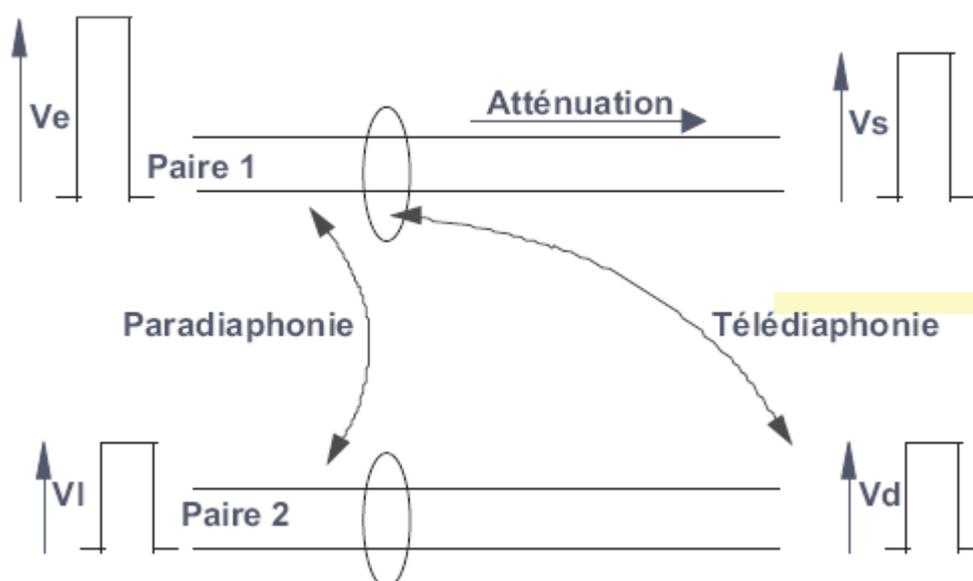


Figure II.13 – Les phénomènes du paradiaphonie et télédiaphonie.

**Atténuation**  $A = 20 \log_{10} V_s / V_e$  où  $V_s$  est la tension en sortie,  $V_e$  est la tension du signal d'entrée.

**Paradiaphonie**  $N_{ext} = 20 \log_{10} V_l / V_e$  où  $V_l$  est la tension locale induite,  $V_e$  est la tension du signal d'entrée.

**Télédiaphonie**  $F_{ext} = 20 \log_{10} V_d / V_e$  où  $V_d$  est la tension distante induite,  $V_e$  est la tension du signal d'entrée.

La paire torsadée (paire symétrique, **UTP Unshielded Twisted Pairs**) est sensible à l'environnement électromagnétique (parasites industriels, proximité de câbles à courant fort...).

L'immunité aux parasites peut être améliorée en protégeant le faisceau par un écran (câble écranté). L'écran est constitué d'un ruban d'aluminium qui entoure les paires et les protège des perturbations électromagnétiques. Un conducteur de cuivre nu étamé (drain) permet la mise à la terre de l'écran (paires écrantées, **FTP Foiled Twisted Pairs**). Une meilleure protection peut être obtenue en réalisant, autour des paires, un véritable blindage (paires blindées, **STP Shielded Twisted Pairs**).

La paire symétrique est actuellement le conducteur le plus utilisé : desserte locale des raccordements téléphoniques, liaisons d'accès aux réseaux de données et surtout les réseaux locaux où les faibles distances autorisent l'utilisation de débits élevés : 100 Mbit/s sur 100 m, voire 1 Gbit/s.

### II.3.2 – Le câble coaxial

Une paire coaxiale ou câble coaxial (Figure II.14) 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  $10^{-9}$ .

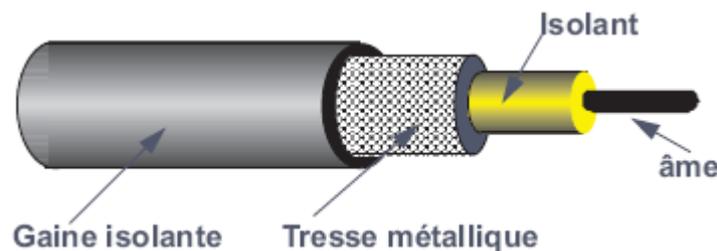


Figure II.14 – Le câble coaxial.

En transmission numérique, notamment dans les réseaux locaux, on utilise des câbles d'impédance 50 **ohm** 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 75 **ohm**. Ce câble, similaire au câble coaxial utilisé en télévision, est souvent dénommé câble CATV. La bande passante est d'environ 300 à 400 MHz.

Le CATV présente une bonne immunité aux parasites, mais cher et exigeant en contraintes d'installation (rayon de courbure...), il n'est plus utilisé que dans des environnements perturbés ou dans les systèmes

sécurisés (rayonnement). Dans les réseaux locaux, il est remplacé par la paire torsadée et dans les liaisons longues distances par la fibre optique.

### II.3.3 - Le fibre optique

#### Principe

Un faisceau de lumière (figure II.15), 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 ( $3.10^8$  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.

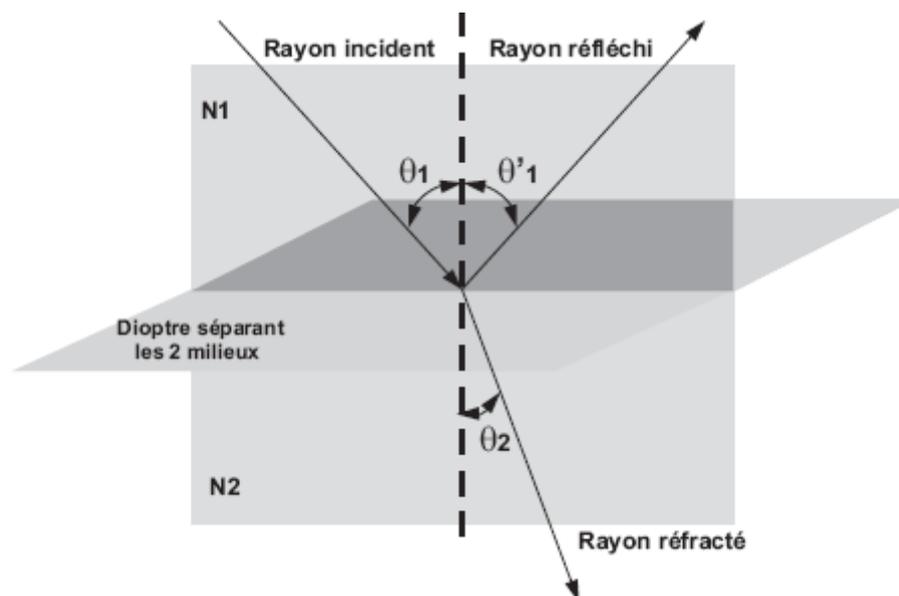


Figure II.15 - La loi de Descartes ( $N_1 \cdot \sin \theta_1 = N_2 \cdot \sin \theta_2$ ).

Lorsque l'angle d'incidence augmente ( $\theta_1$ ), 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 II.16) est composée d'un « fil » de silice appelé *coeur*, entouré d'une gaine appelée *manteau* et d'une enveloppe de protection. La réflexion totale est assurée par des valeurs d'indices proches tel que  $n_1 > n_2$  où  $n_1$  est l'indice du coeur et  $n_2$  celui de la gaine.

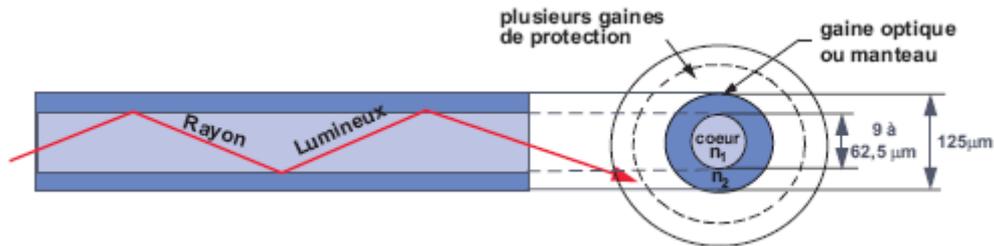


Figure II.16 – La fibre optique : guide de lumière.

Un système de transmission par fibre optique met en oeuvre (Figure II.17) :

- 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.

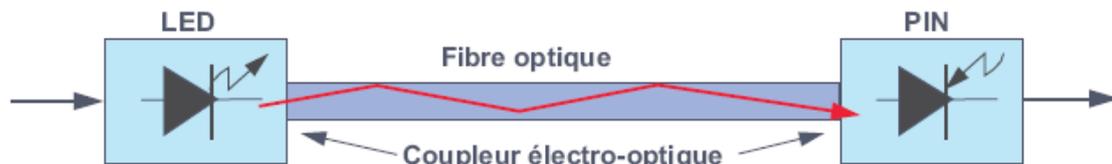


Figure II.17 – Principe d'une liaison optique.

La fibre étant un système de transmission unidirectionnel, une liaison optique nécessite l'utilisation de 2 fibres.

#### Les différents types de fibres

Les rayons lumineux qui remplissent la condition de réflexion sont acheminés dans le coeur de la fibre. L'ensemble des rayons admis forme un cône, le cône d'acceptance dont l'ouverture ou angle d'incidence maximal est  $\theta_{\max}$  (Figure II.18). L'ouverture numérique ( $ON$ ) de la fibre est la grandeur qui qualifie le cône d'acceptance ( $ON = \sin \theta_{\max}$ ).

#### ▪ Les fibres à saut d'indice

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

Quand le diamètre du coeur 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 ou **DMD**, *Differential Mode Delay*), la fibre est alors dite multimode (**MMF**, *MultiMode optical Fiber*, Figure II.18).

En réduisant le diamètre du coeur, 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 (**SMF**, *Single Mode optical Fiber*).

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.

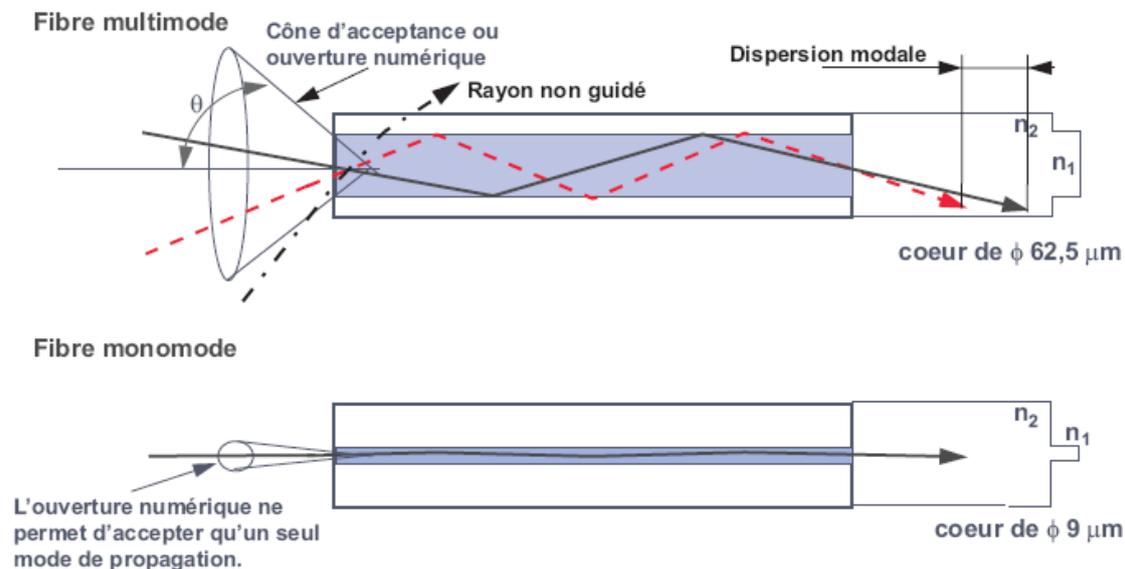


Figure II.18 – Les fibres à saut d'indice.

- Les fibres à gradient d'indice

Un compromis a été trouvé avec les fibres à gradient d'indice (figure II.19), l'indice du cœur décroît de façon continue, depuis le centre du cœur jusqu'à l'interface cœur/gaine suivant une loi parabolique.

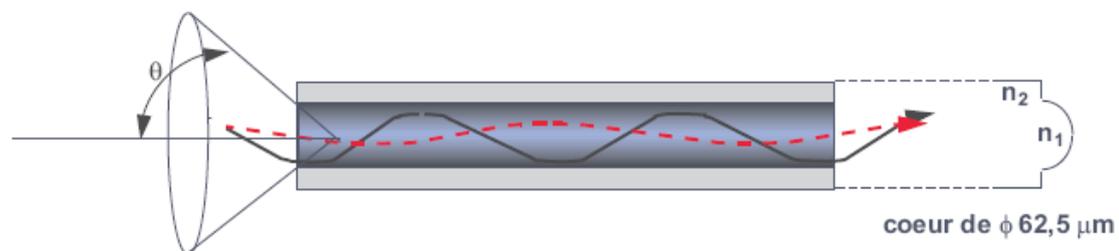


Figure II.19 – Les fibres à gradient d'indice.

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.

*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.

### II.3.4 - 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. La figure II.20 illustre le principe d'une liaison radioélectrique.

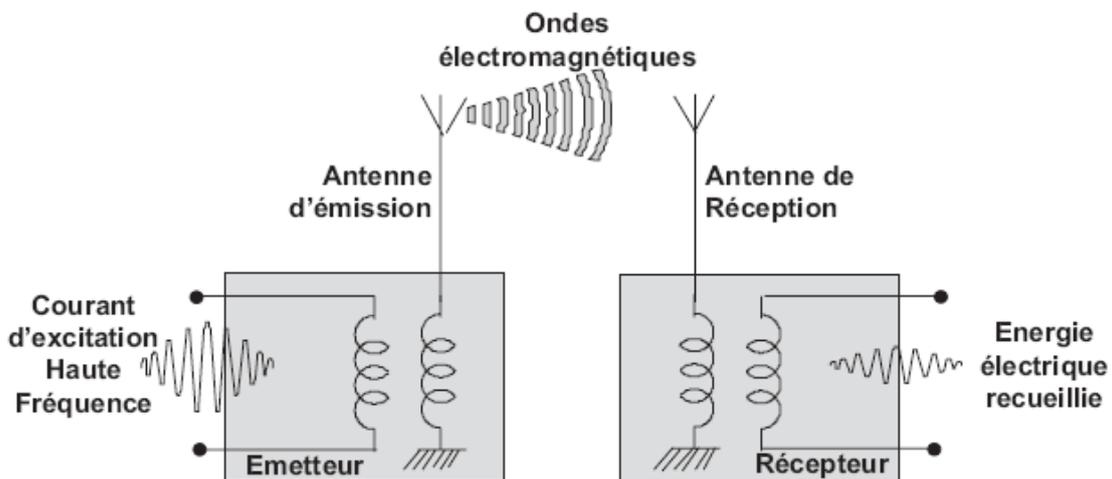


Figure II.20 - Principe d'une liaison radioélectrique.

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 ( $\lambda$ ), la distance parcourue pendant une période du phénomène vibratoire.

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.

La transmission de données utilise des systèmes passifs à émission directive (téléphonie mobile...), très directive (faisceaux hertziens) ou à diffusion (liaisons satellitaires, mobiles en téléphonie mobile...).

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).

Chaque type de liaison ou d'application utilise des bandes de fréquences différentes. L'espace de fréquences utilisables est limité.

### *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.

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 15 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.

### *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.

### *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 II.21 illustre le principe d'une liaison satellitaire.

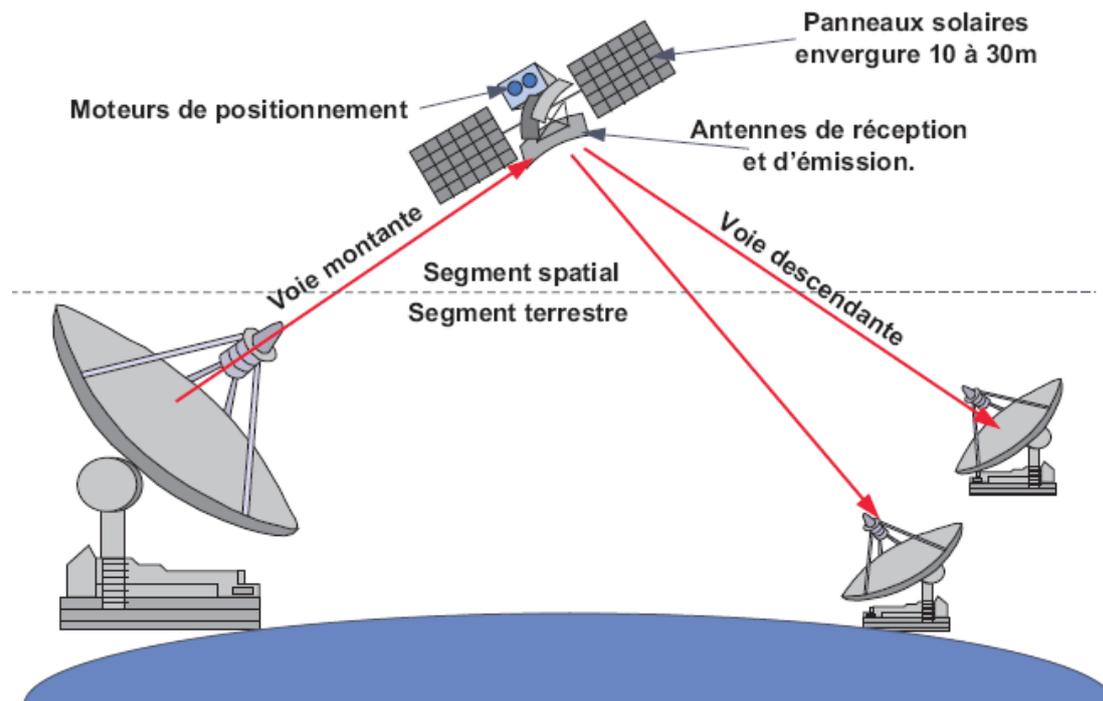


Figure II.21 – Principe d'une liaison satellitaire.

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 :

- L'**AMRF** (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.
- L'**AMRT** (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.
- L'**AMRC** (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.

#### *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), moyennes (MEO) et basses (LEO).

La figure II.22 représente les deux modes orbitales des systèmes de satellites. La partie de droite illustre un système GEO. En orbite équatoriale, avec un cône de rayonnement de  $120^\circ$ , 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.

La partie de gauche de la figure illustre les systèmes MEO et LEO qui, pour assurer une couverture spatiale et temporelle totale, impliquent l'utilisation d'une constellation de satellites, c'est-à-dire plusieurs orbites et sur chaque orbite plusieurs satellites.

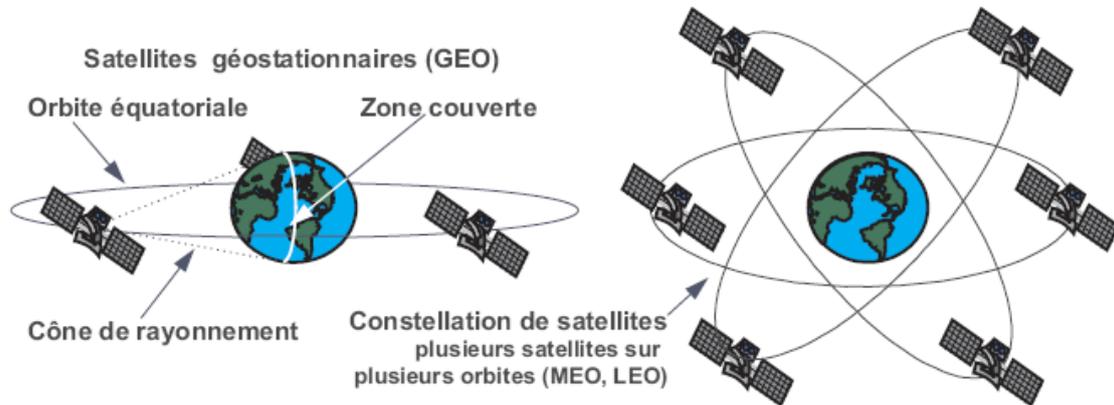


Figure II.22 – Satellites géostationnaires (GEO) et constellation de satellites (MEO et LEO).

#### II. 4 – Conclusion

Les caractéristiques intrinsèques des supports conditionnent leur limite d'utilisation. Cependant, les progrès importants réalisés par l'électronique numérique reculent de plus en plus ces limites. Les modes de transformation des informations numériques en signal électrique destiné à être acheminé par le support constituent une voie de recherche importante.

## Chapitre III: Le concept de réseau.

### III.1 - GÉNÉRALITÉS

#### III.1.1 - Définition

Un réseau est un ensemble de moyens matériels et logiciels géographiquement dispersés destinés à offrir un service, comme le réseau téléphonique, ou à assurer le transport de données.

Les techniques à mettre en œuvre diffèrent en fonction des finalités du réseau et de la qualité de service désirée.

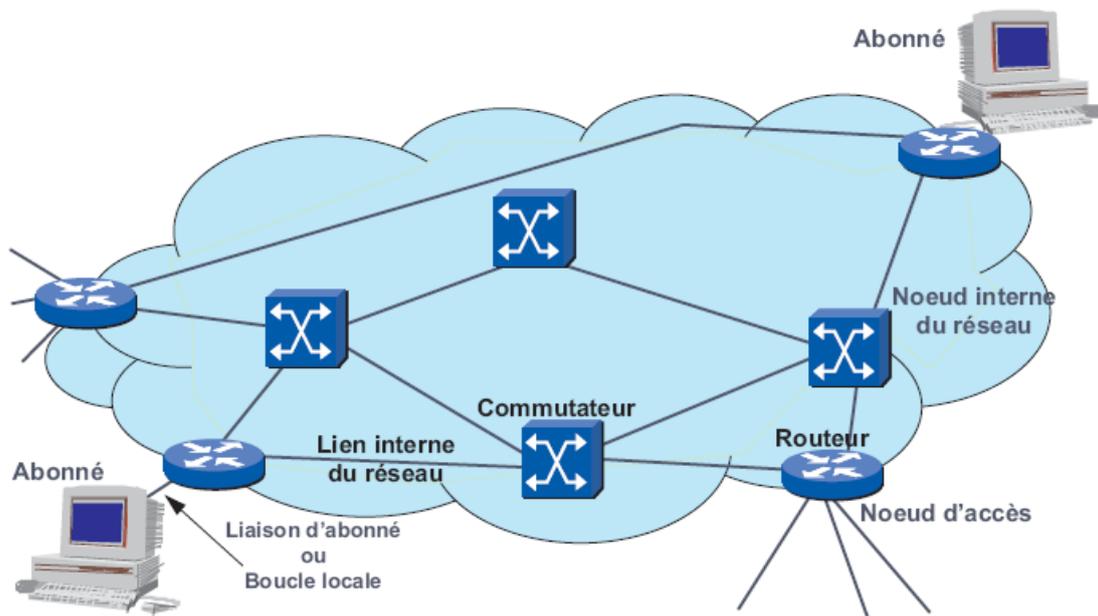


Figure III.1 – Le réseau : ensemble de ressources mises en commun.

Le réseau illustré par la figure III.1 est composé de nœuds. Les nœuds d'accès, situés à la périphérie du réseau, permettent le raccordement des usagers par une liaison dénommée **liaison d'abonné**. L'ensemble des moyens mis en œuvre pour raccorder un usager est souvent désigné par le terme de **boucle locale**. Les nœuds sont généralement des routeurs au point d'accès et des commutateurs au cœur du réseau.

#### III.1.2 - Classification des réseaux

Le langage courant distingue les réseaux selon différents critères. La classification traditionnelle, fondée sur la notion d'étendue géographique, correspond à un ensemble de contraintes que le concepteur devra prendre en compte lors de la réalisation de son réseau. Généralement, on adopte la terminologie suivante :

- **LAN** (*Local Area Network*), réseau local d'étendue limitée à une circonscription géographique réduite (bâtiment...), ces réseaux destinés au partage local de ressources informatiques (matérielles ou logicielles) offrent des débits élevés de 10 à 100 Mbit/s.
- **MAN** (*Metropolitan Area Network*), d'une étendue de l'ordre d'une centaine de kilomètres, les MAN sont généralement utilisés pour fédérer les réseaux locaux ou

assurer la desserte informatique de circonscriptions géographiques importantes (réseau de campus).

- **WAN** (*Wide Area Network*), ces réseaux assurent généralement le transport d'information sur de grande distance. Lorsque ces réseaux appartiennent à des opérateurs, les services sont offerts à des abonnés contre une redevance. Les débits offerts sont très variables de quelques kbit/s à quelques Mbit/s.

D'une manière plus générale, un abonné d'un réseau désire pouvoir atteindre tous les autres abonnés ou une partie de ceux-ci. Le réseau doit établir une relation de *1 à 1* parmi *N*. Ces réseaux, de mise en relation, sont dits **réseaux de commutation**, le réseau téléphonique (RTC) en est un exemple.

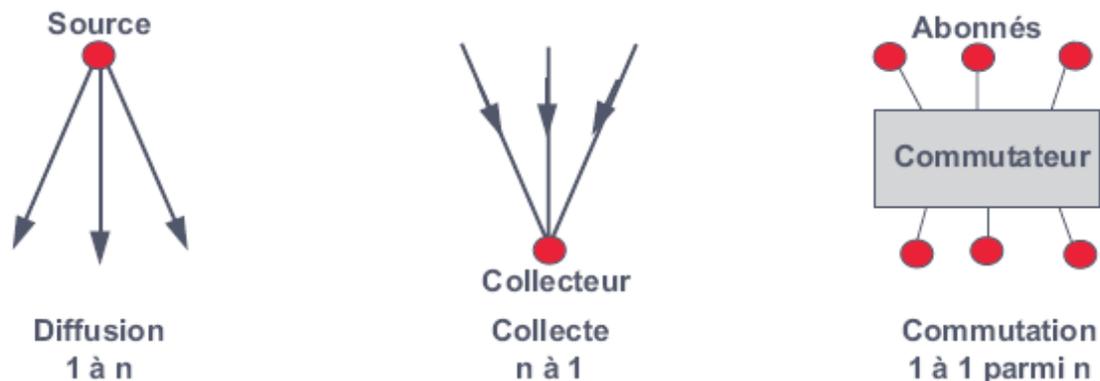


Figure III.2 – Classification selon les modes de diffusion de l'information.

### III.1.3 - Topologies physiques des réseaux

La topologie d'un réseau décrit la manière dont les nœuds sont connectés. Cependant, on distingue la **topologie physique**, qui décrit comment les machines sont raccordées au réseau, de la **topologie logique** qui renseigne sur le mode d'échange des messages dans le réseau (**topologie d'échange**).

#### Les topologies de base

Les topologies de bases sont toutes des variantes d'une liaison point à point ou multipoint (Figure III.3).



Figure III.3 – Les modes de liaisons élémentaires.

La plus simple des topologies de base, le **bus** est une variante de la liaison multipoint. Dans ce mode de liaison, l'information émise par une station est diffusée sur tout le réseau. Le réseau en bus est aussi dit **réseau à diffusion** (Figure III.4). Dans ce type de topologie, chaque station accède directement au réseau, d'où des problèmes de conflit d'accès (contentions ou collisions) qui nécessitent de définir une politique d'accès. Celle-ci peut être centralisée (relation dite maître/esclave) ou distribuée comme dans les réseaux locaux.

Les réseaux en bus sont d'un bon rapport performance/prix. Ils autorisent des débits importants (>100 Mbit/s sur 100 m). Il est possible d'y insérer une nouvelle station sans perturber les communications en cours. Cependant, la longueur du bus est limitée par l'affaiblissement du signal, il est nécessaire de régénérer celui-ci régulièrement. La distance entre deux régénérations se nomme « pas de régénération ».

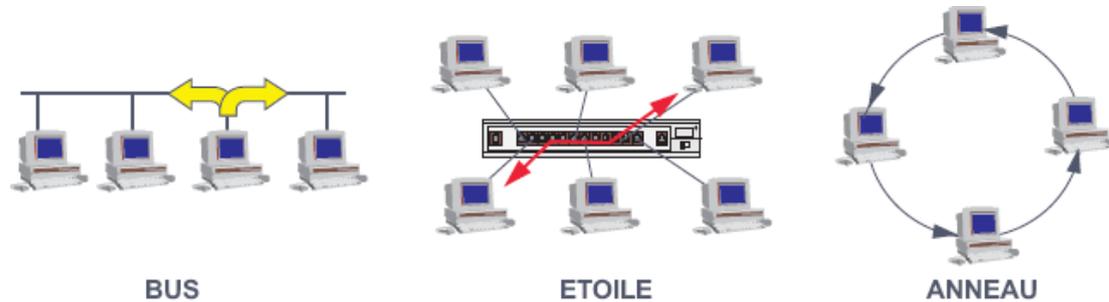


Figure III.4 - Les topologies de base.

La topologie étoile est une variante de la topologie en point à point (Figure III.4). Un nœud central émule  $n$  liaisons point à point (Figure III.4). Tous les nœuds du réseau sont reliés à un nœud central commun : le concentrateur. Tous les messages transitent par ce point central. Le concentrateur est actif, il examine chaque message reçu et ne le retransmet qu'à son destinataire. Cette topologie correspond, par exemple, au réseau téléphonique privé d'une entreprise où le commutateur téléphonique met en relation les différents postes téléphoniques de l'installation. La topologie étoile autorise des dialogues inter-nœud très performants. La défaillance d'un poste n'entraîne pas celle du réseau, cependant le réseau est très vulnérable à celle du nœud central.

Dans la topologie en anneau, chaque poste est connecté au suivant en point à point (Figure III.4). L'information circule dans un seul sens, chaque station reçoit le message et le régénère. Si le message lui est destiné, la station le recopie au passage (au vol). Ce type de connexion autorise des débits élevés et convient aux grandes distances (régénération du signal par chaque station). L'anneau est sensible à la rupture de la boucle. Les conséquences d'une rupture de l'anneau peuvent être prises en compte en réalisant un double anneau.

#### Les topologies construites

Dérivés des réseaux en étoile, les réseaux arborescents (Figure III.5 gauche) sont constitués d'un ensemble de réseaux étoiles reliés entre eux par des concentrateurs jusqu'à un nœud unique (nœud de tête). Cette topologie est essentiellement mise en œuvre dans les réseaux locaux (Starlan, 10 base T...). Ces réseaux, en raison de la concentration réalisée à chaque nœud, sont très vulnérables à la défaillance d'un lieu ou d'un nœud (Figure III.5 centre).

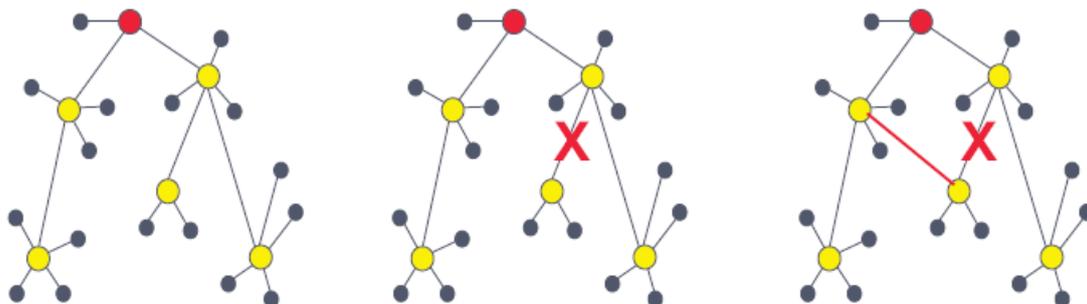


Figure III.5 - De la topologie hiérarchique à la topologie maillée.

Pour palier cet inconvénient on peut imaginer créer des chemins de secours qui peuvent être temporaires ou permanents. Le réseau est alors dit **maillé** (Figure III.5 droite). Un réseau maillé est un réseau dans lequel deux stations, clientes du réseau, peuvent être mises en relation par différents chemins (Figure III.6). Ce type de réseau, permettant de multiple choix de chemins vers une même destination, est très résistant à la défaillance d'un nœud et autorise une optimisation de l'emploi des ressources en répartissant la charge entre les différents nœuds (voies).

Chaque nœud est caractérisé par sa **connectivité**, c'est-à-dire par le nombre de liens qui le réunit aux autres nœuds du réseau.

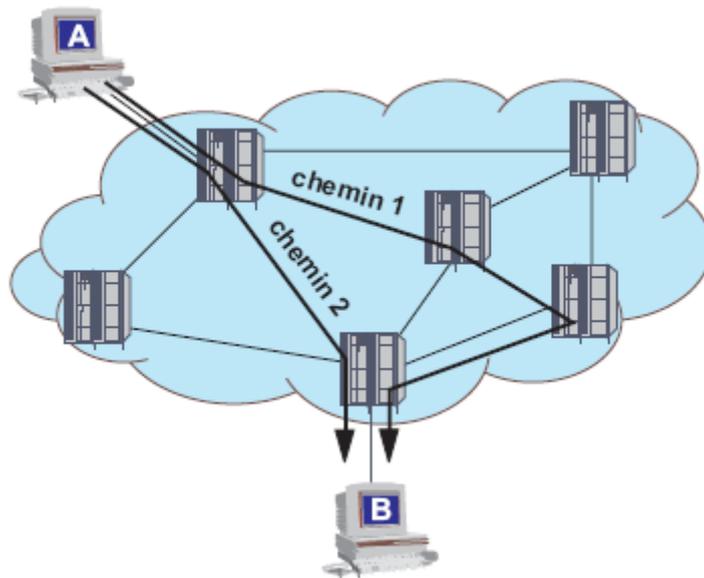


Figure III.6 – Réseau maillé.

## III.2 – LES RÉSEAUX À COMMUTATION

### III.2.1 – Introduction à la commutation

Le concept de réseau à commutation est né de la nécessité de mettre en relation un utilisateur avec n'importe quel autre utilisateur (relation de 1 à 1 parmi  $n$  ou interconnexion totale) et de l'impossibilité de créer autant de liaisons point à point qu'il y a de paires potentielles de communicants.

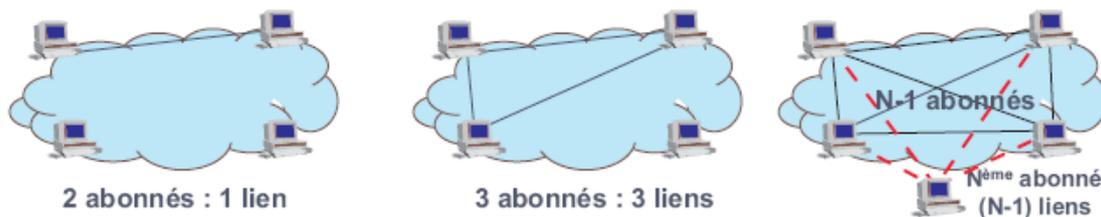


Figure III.7 – L'interconnexion totale.

Ainsi, pour réaliser l'interconnexion totale de 2 stations (Figure III.7), il suffit d'une liaison, pour 3 stations 3 liens... D'une manière générale, dans un réseau de  $N$  stations, pour relier la station  $N$  aux  $N - 1$  stations déjà connectées il faut  $(N - 1)$  liens. Soit, pour les  $N$  stations,  $N(N-1)$  liens. En comptant de cette manière, on commet l'erreur de compter deux fois chaque lien (le lien de A vers B est le même que le lien de B vers A). Le nombre total de liens nécessaires dans un système de  $N$  nœuds est donc de :

$$\text{Nombre de liens} = \frac{N(N - 1)}{2}$$

Si on applique cette formule au réseau téléphonique, compte tenu qu'il existe environ 300.106 abonnés dans le monde et que chaque abonné peut être mis en relation avec n'importe quel autre abonné, la terminaison de réseau chez chaque abonné devrait comporter 45.1015 lignes !

Ce chiffre montre, s'il en était besoin, la nécessité de trouver un système qui permette, à partir d'une simple ligne de raccordement (liaison d'abonné), d'atteindre simplement tout autre abonné du réseau par simple commutation d'un circuit vers cet abonné. Ce système porte le nom de **réseau à commutation**, dans le réseau illustré par la Figure III.8, le commutateur met en relation les utilisateurs A et B.

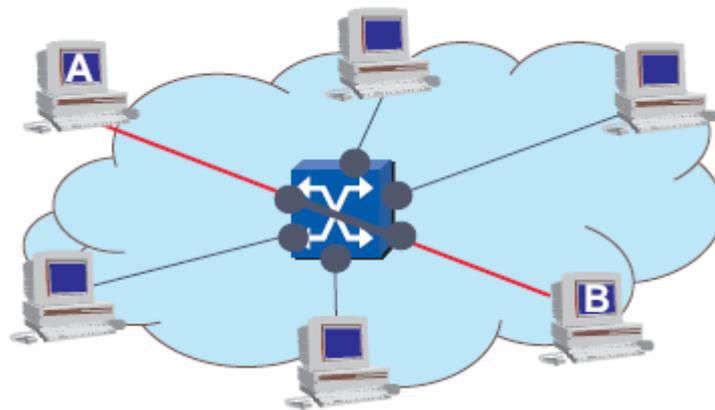


Figure III.8 – Principe d'un réseau à commutation.

Dans ce contexte où la ressource est rare vis-à-vis de la demande potentielle (si simultanément tous les abonnés du réseau désiraient joindre un autre abonné...), il est indispensable de rechercher des techniques particulières pour optimiser le partage des ressources, c'est l'objectif des techniques de commutation. Selon la technique employée pour « relier » deux utilisateurs, on distingue la commutation de circuits, de messages ou de paquets.

Un réseau à commutation assure une connectivité totale. Dans ses conditions, la topologie logique ou interconnexion totale, vue du côté des utilisateurs, est différente de la topologie physique réelle (Figure III.9).

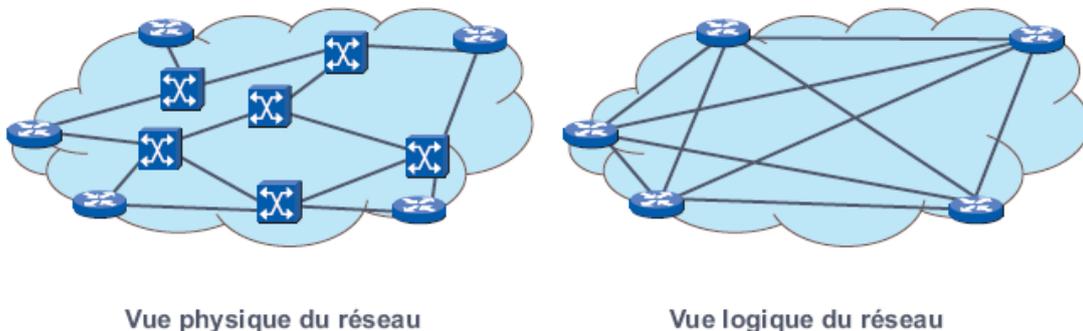
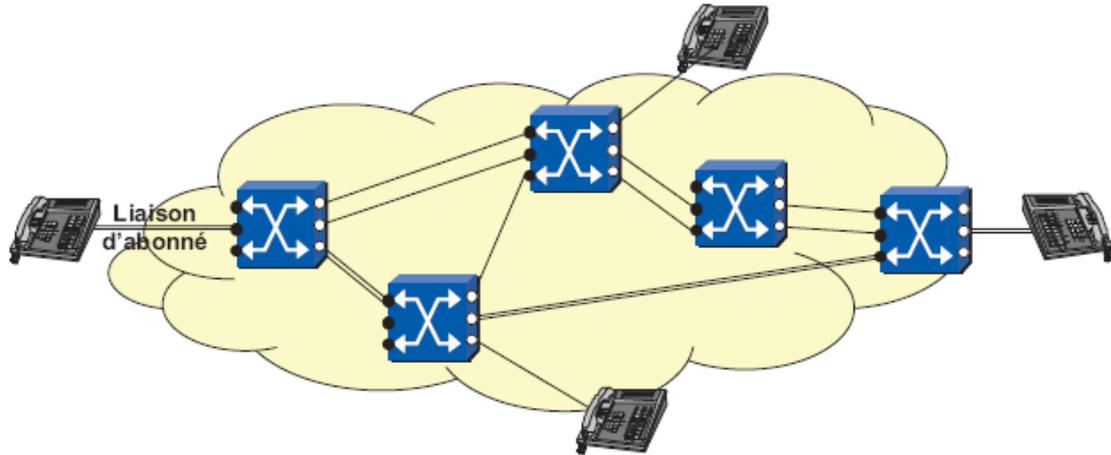


Figure III.9 – Conséquence de la commutation sur la vision du réseau.

### III.2.2 – La commutation de circuits

Dans la commutation de circuits, un lien physique est établi par juxtaposition de différents supports physiques afin de constituer une liaison de bout en bout entre une source et une destination (*Figure III.10*). La mise en relation physique est réalisée par les commutateurs avant tout échange de données et est maintenue tant que les entités communicantes ne la libèrent pas expressément. Le taux de connexion est important, alors que le taux d'activité peut être faible.



*Figure III.10 – Réseau à commutation de circuits ou spatiale.*

La constitution d'un chemin physique, emprunté par la suite par toutes les données transférées, garantit l'ordonnancement des informations. Elles sont reçues dans l'ordre où elles ont été émises. Cependant, les deux entités correspondantes doivent être présentes durant tout l'échange de données, il n'y a pas de stockage intermédiaire. Les débits de la source et du destinataire doivent être identiques. Les abonnés monopolisent toute la ressource durant la connexion. Dans ces conditions, la facturation est généralement dépendante du temps et de la distance (exemple : le Réseau Téléphonique Commuté ou **RTC**).

Archétype des réseaux, la commutation de circuits ou commutation spatiale est aujourd'hui remplacée par une commutation par intervalle de temps (IT) entre des multiplex entrants et des multiplex sortants (commutation temporelle, *Figure III.11*).



*Figure III.11 – La commutation temporelle.*

### III.2.3 – La commutation de messages

En commutation de circuits, la régulation de trafic est réalisée à la connexion, s'il n'y a plus de ressource disponible, de bout en bout, la connexion est refusée. Pour éviter d'avoir à surdimensionner les réseaux, la commutation de messages, n'établit aucun lien physique entre les deux systèmes d'extrémité. Le message est transféré de nœud en nœud et mis en attente si le lien internœud est occupé (figure 8.13). Chaque bloc d'information (message) constitue une unité de transfert (fichier, écran de terminal...) acheminée individuellement par le réseau.

Le message est mémorisé, intégralement, par chaque nœud, et retransmis au nœud suivant dès qu'un lien se libère. Le transfert réalisé, le lien est libéré. Assurant une meilleure utilisation des lignes, la commutation de messages autorise un dimensionnement des réseaux à commutation de messages inférieur à celui des réseaux à commutation de circuits. En cas de fort trafic, il n'y a pas blocage du réseau mais seulement un ralentissement (attente de la libération d'un lien). La mémorisation intermédiaire de l'intégralité des messages nécessite des mémoires de masse importantes et augmente le temps de transfert. Les réseaux à commutation de messages ne sont pas adaptés aux applications interactives.

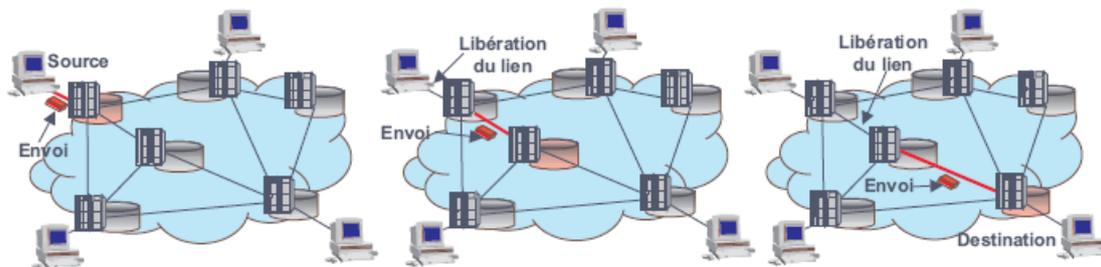


Figure III.12 – Principe de la commutation de messages.

Les réseaux à commutation de messages assurent, par rapport à la commutation de circuits :

- le transfert, même si le correspondant distant est occupé ou non connecté ;
- la diffusion d'un même message à plusieurs correspondants ;
- le changement de format des messages ;
- l'adaptation des débits et éventuellement des protocoles.

La commutation de messages ne permet qu'un échange **simplex et asynchrone**, elle est plus un service qu'un technique réseau. La commutation de messages est aujourd'hui le support logique des réseaux de télex et des systèmes de messagerie modernes.

### III.2.4 – La commutation de paquets

#### Principe

La commutation de paquets utilise une technique similaire à la commutation de messages.

Le message est découpé en fragments (paquets) de petite taille. Chaque paquet est acheminé dans le réseau indépendamment du précédent. Contrairement à la commutation de messages, il n'y a pas de stockage d'information dans les nœuds intermédiaires. Chaque nœud, recevant un paquet, le réémet immédiatement sur la voie optimale. De ce fait, le séquençement des informations n'est plus garanti. Pour reconstituer le message initial, le destinataire devra, éventuellement, réordonner les différents paquets avant d'effectuer le réassemblage.

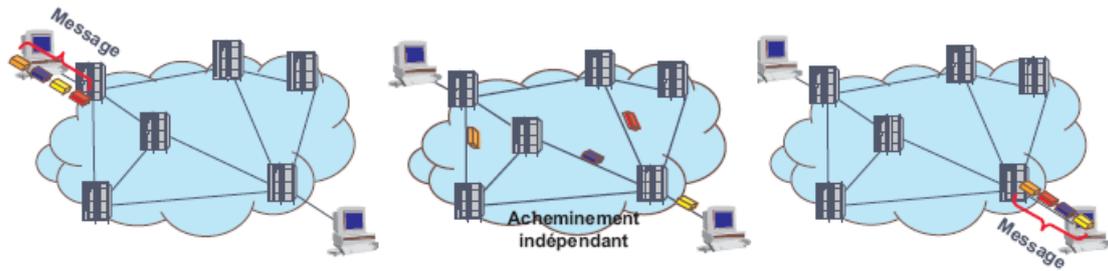


Figure III.13 – Principe de la commutation de paquets.

Ce mode de transfert optimise l'utilisation des ressources, les paquets de différentes sources sont multiplexés sur un même circuit. Cependant, chaque paquet doit contenir les informations nécessaires à son acheminement ou un label identifiant le flux (multiplexage par étiquette). La ressource offerte est banalisée et non attribuée à une communication particulière comme dans la commutation de circuits (Figure III.14).

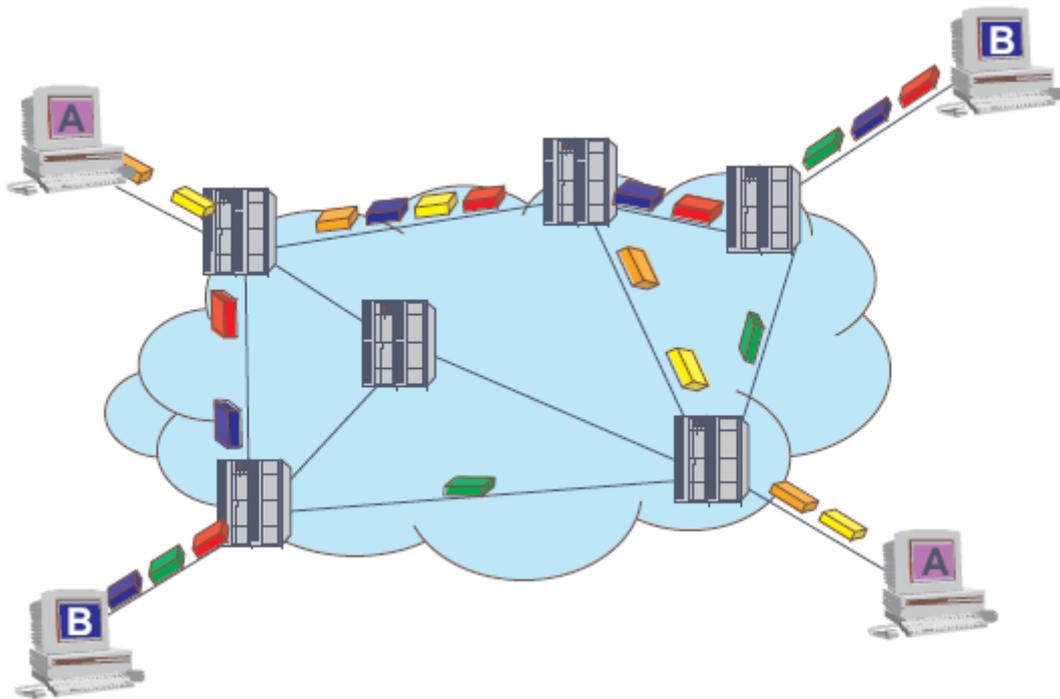


Figure III.14 – Le multiplexage des sources dans le réseau.

La commutation de paquets et le multiplexage par étiquette sont des techniques similaires. Elles se différencient essentiellement par le fait que l'une admet des unités de données de taille variable (commutation de paquets), l'autre des unités de données de taille fixe (multiplexage par étiquette). Le multiplexage par étiquette est aussi nommé **commutation de cellules**. Cette dernière technique est utilisée par le protocole **ATM**.

La commutation de paquets décline deux modes de mise en relation (Figure III.15). Le premier, le mode datagramme ou non connecté est le mode naturel de la commutation de paquets. Le second met en œuvre un mécanisme de stabilité de route qui consiste à « baliser » un chemin que suivront ensuite tous les paquets émulant ainsi un circuit sur un réseau en mode paquets. Ce second mode de fonctionnement est dit mode orienté connexion ou plus simplement mode connecté. Le circuit émulé porte le nom de circuit virtuel (CV).

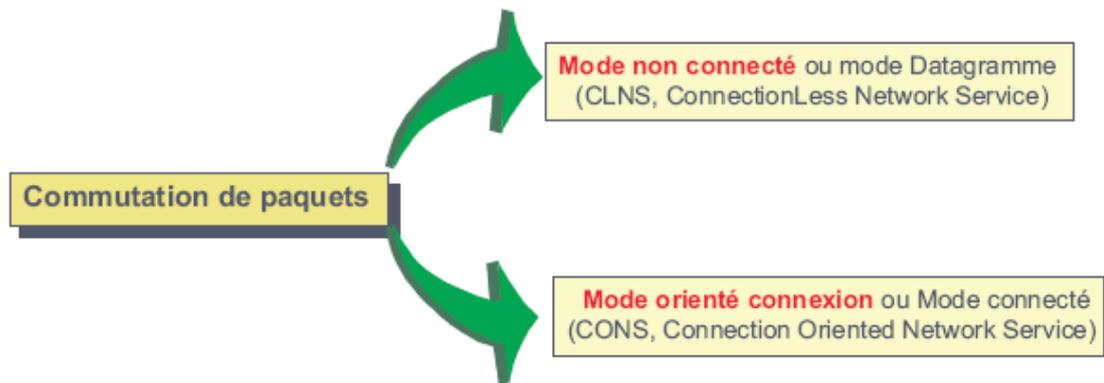


Figure III.15 – Les modes de mise en relation.

#### Le mode non connecté (CLNS)

En **mode non connecté (CLNS, ConnectionLess Network Service)**, les informations transitent dans le réseau indépendamment les unes des autres. Le destinataire n'est pas nécessairement à l'écoute, les informations sont, dans ce cas, perdues. Dans un tel mode de fonctionnement, les routes empruntées par les différents blocs d'information peuvent être différentes, le séquençement des informations ne peut être garanti (Figure III.16). Les mécanismes réseaux sont allégés au détriment d'une complexité dans les organes d'extrémités qui doivent être capables de réordonner les différents blocs d'information.

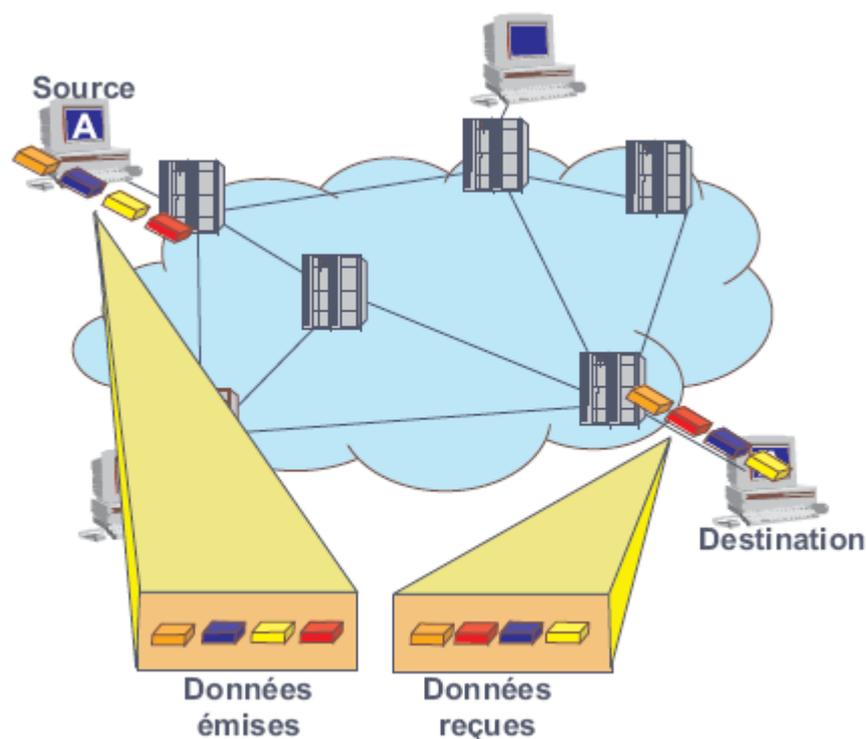


Figure III.16 – Réseau en mode datagrammes.

La possibilité d'un routage différent pour chaque bloc d'information (paquet) d'un même utilisateur permet de répartir la charge du réseau (routage adaptatif). Chaque bloc est acheminé indépendamment du précédent, il doit, par conséquent, contenir l'adresse du destinataire.

Aucune réservation de ressources n'est effectuée préalablement à tout envoi de données. De ce fait, en cas de surcharge du réseau, des blocs d'information peuvent être perdus.

*Le mode orienté connexion (CONS)*

En commutation de circuits une liaison physique est préalablement établie avant tout échange de données. En **mode orienté connexion (CONS, Connection Oriented Network Service)**, une liaison virtuelle est construite par un mécanisme particulier (Figure III.17). Lors de la phase d'établissement de la connexion, les différentes ressources nécessaires au transfert (buffers, voies...) sont réservées.

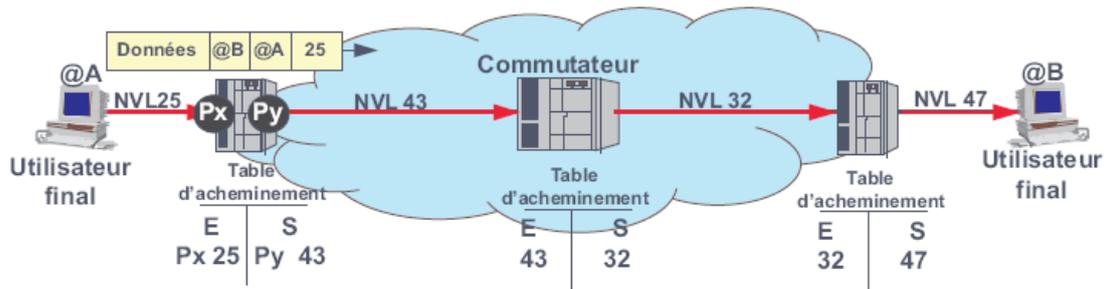


Figure III.17 – Établissement d'un circuit virtuel.

Lorsque l'échange est terminé, une phase de déconnexion libère les ressources. La liaison peut être permanente (**CVP, Circuit Virtuel Permanent** ou **PVC, Permanent Virtual Circuit**) ou établie appel par appel (**CVC, Circuit Virtuel Commuté** ou **SVC, Switched Virtual Circuit**).

## Chapitre IV: Les architectures protocolaires.

Le développement rapide des moyens de calcul et l'importance croissante des systèmes d'information ont engendré la multiplicité des techniques réseaux. La complexité croissante des besoins de communication et la diversité des solutions adoptées ont très vite fait apparaître la nécessité de définir un modèle complet de communication ou architecture protocolaire réseau.

Historiquement, chaque grand constructeur avait défini la sienne : SNA (*System Network Architecture*) d'IBM, DSA (*Distributed System Architecture*) de BULL... Ces architectures propriétaires incompatibles entre elles ne permettent pas l'interopérabilité des systèmes. Aussi, convenait-il de définir des techniques de mises en relation en spécifiant une architecture normalisée.

C'est ce qu'entreprit l'ISO (*International Standardization Organization*) en définissant une architecture de communication normalisée, couramment appelée modèle de référence ou modèle OSI (*Open System Interconnection*).

L'architecture réseau assure à l'utilisateur l'accès aux ressources informatiques et lui procure un service identique que les ressources soient locales ou distantes, pour cela elle doit être transparente à l'utilisateur.

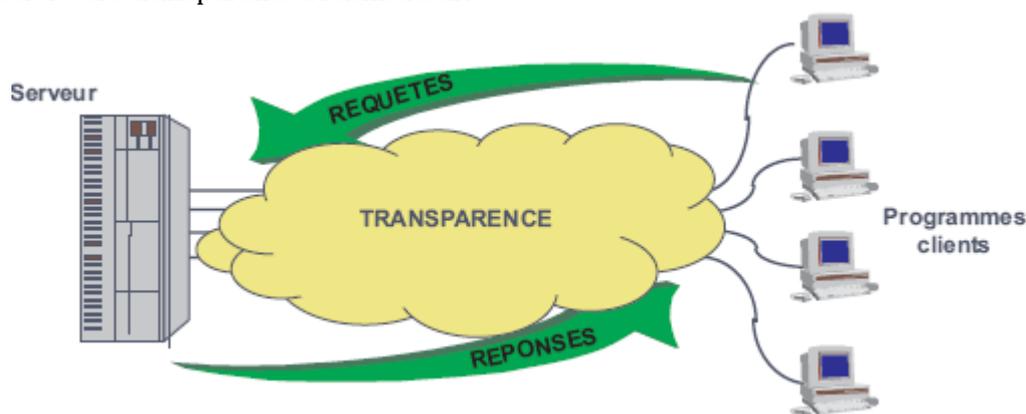


Figure VI.1 – L'architecture garantit la transparence.

Connecter en transparence divers équipements provenant de constructeurs différents pour qu'ils s'échangent des informations nécessite que ceux-ci utilisent, non seulement, des techniques de connexion compatibles (raccordement, niveau électrique...), mais aussi des protocoles d'échange identiques et une sémantique de l'information compréhensible par les partenaires de la communication. Ces problèmes, de nature différente, sont résolus chacun par une solution spécifique. Aussi, pour éviter une description trop complexe, le système a été découpé en entités fonctionnelles appelées couches. Une couche est donc un ensemble homogène destiné à accomplir une tâche ou à rendre un service. L'approche en couche garantit une évolutivité facile du système. La prise en compte d'une nouvelle technologie ne remet en cause que la couche concernée. Le modèle de référence est une architecture en couches.

### IV.1 – Concept de base

#### VI.1.1 – Principe de fonctionnement d'une architecture en couches

Considérons le modèle simplifié à 3 couches représenté *Figure VI.2*. Pour communiquer l'application cliente remet à la couche supérieure, ici la couche 3, des données à destination de l'application serveur ainsi que les instructions décrivant le service

attendu et celles nécessaires à l'acheminement des données vers l'application serveur. La couche 3 interprète les instructions reçues et confectionne une structure de données à destination de la couche 3 distante, dite couche homologue. Cette structure de données est constituée d'une part des informations nécessaires à la couche 3 distante pour traiter ses données appelées en-tête de niveau 3 (H3 pour *Header* de niveau 3) et des données elles-mêmes ; l'ensemble forme une unité de données de niveau N. Les règles d'échange entre données de même niveau constituent un protocole de niveau N.

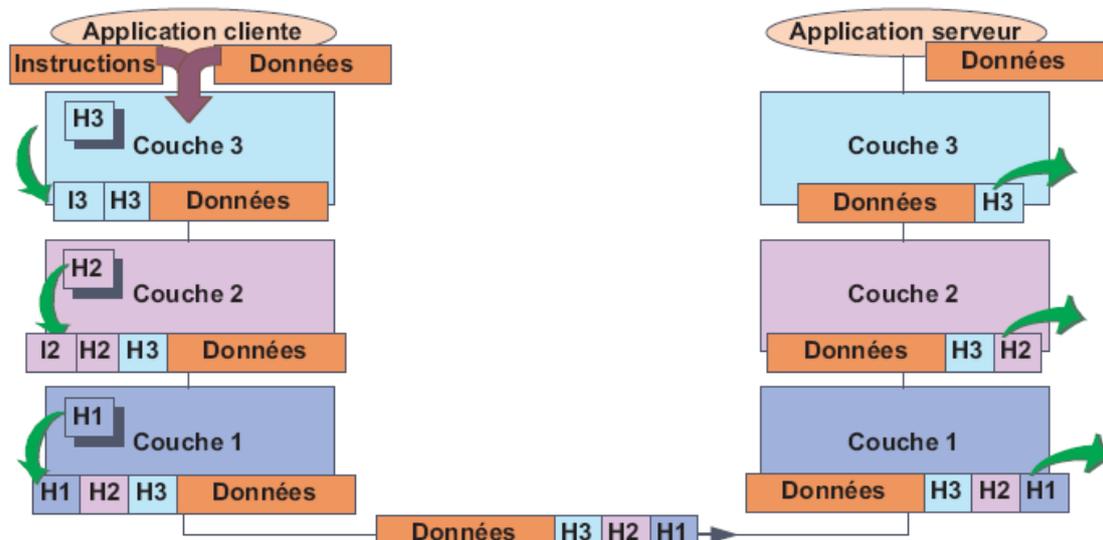


Figure VI.2 – Principe général de fonctionnement d'un modèle en couches.

Puis, la couche 3 remet cette unité de données et des instructions (I3) à la couche inférieure qui procède de même... Enfin les données sont émises vers le réseau. En réception la couche la plus basse extrait l'en-tête protocolaire (H1), l'interprète, et remet les données à la couche supérieure qui procède de même jusqu'à remise des données à l'application distante.

## VI.1.2 – Terminologie

### Protocole et service

L'échange précédent, illustré figure 9.2, montre deux types de dialogues (Figure VI.2) :

- un dialogue vertical qui correspond au transfert d'informations d'une couche à une autre (couches adjacentes), ce dialogue est réalisé à l'aide de primitives de service ;
- un dialogue horizontal qui par l'intermédiaire de messages échangés (protocole) à travers le réseau transfère, entre couches distantes de même niveau (couches homologues), les données d'un système à un autre. Ce dialogue constitue le protocole de niveau N.

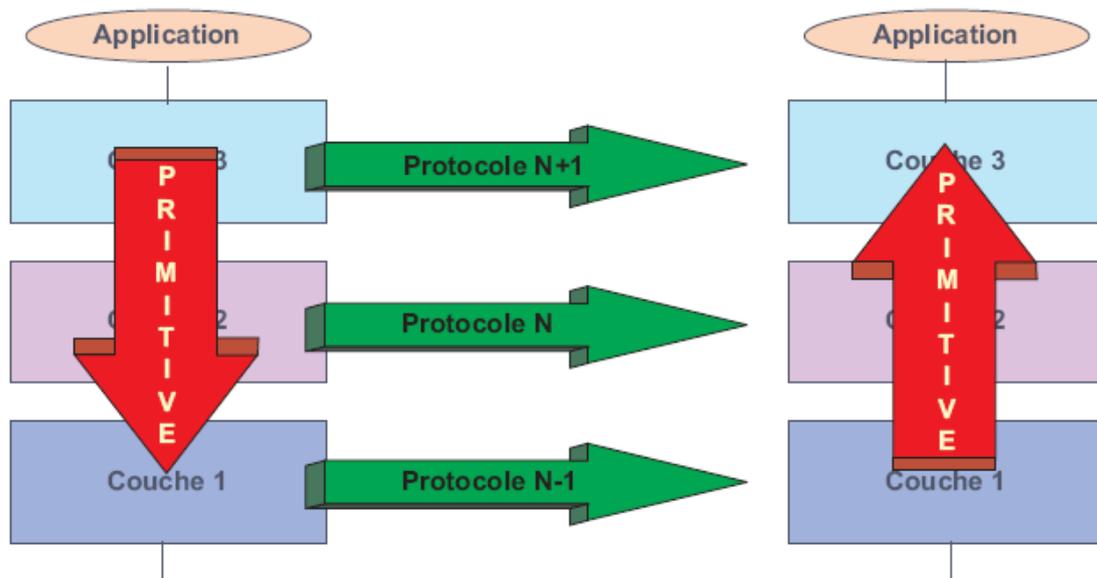


Figure VI.3 – Protocoles et primitives de service.

#### L'encapsulation de données

La couche (N + 1) a requis les services de la couche N, à l'aide d'une primitive de service de niveau N, pour que celle-ci lui rende le service de niveau N (Figure VI.4). Peu importe à (N + 1) de savoir comment ces services sont rendus. L'unité de données protocolaire de niveau (N + 1), données et en-tête, est transportée dans une unité de données de niveau N (protocole N). Les données de niveau (N + 1) sont dites **encapsulées** dans le protocole N, on parle aussi de **tunnel de niveau N**.

#### Point d'accès au service (SAP)

Une couche (N) procure le service (N) au moyen d'un protocole de niveau (N). Le service de la couche (N) est fourni par une entité de niveau (N) qui est une occurrence d'un élément actif de la couche (N). La Figure VI.5 illustre ce principe.

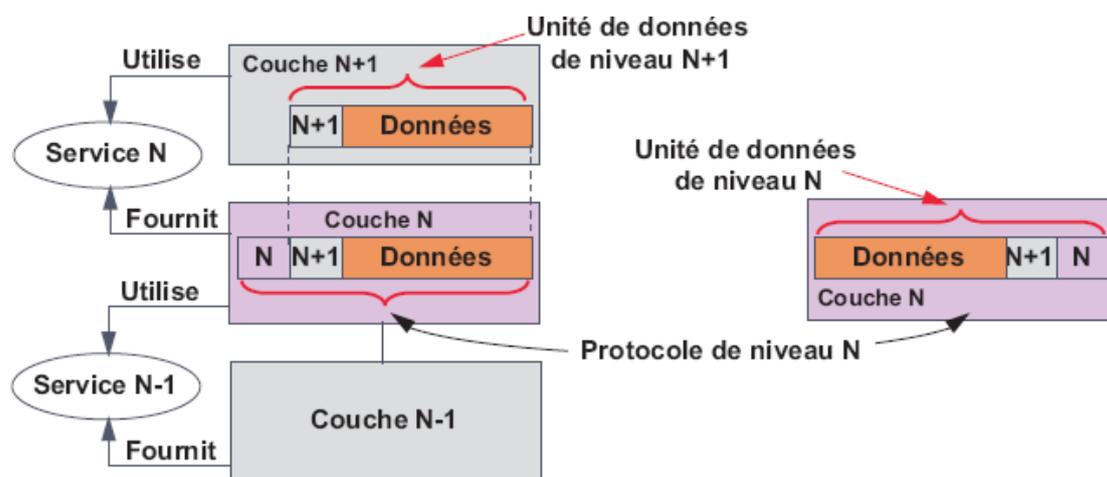


Figure VI.4 – Service et encapsulation de données.

Les services de la couche (N) sont offerts par une entité de niveau N et accessibles via une interface désignée par un identificateur ou point d'accès au service (**SAP, Service Access Point**). Un SAP ne peut être rattaché qu'à une seule entité, mais une même couche peut mettre en œuvre plusieurs occurrences de l'entité de niveau (N).

Le dialogue OSI est un dialogue entre entités homologues distantes via une mise en relation ou connexion de niveau (N - 1).

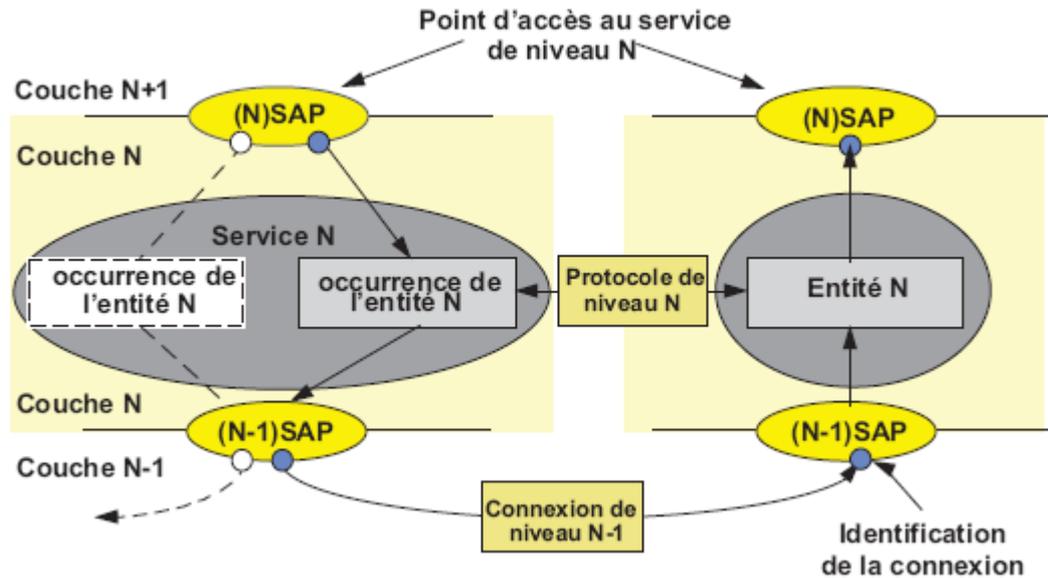


Figure VI.5 – L'identification des services.

#### Les unités de données manipulées

Les données manipulées par une couche et envoyées à l'entité homologue constituent une unité de données (*Data Unit*). La couche de niveau (N + 1), utilisatrice des services de niveau (N), adresse à la couche (N), des unités de données de service notées (N) SDU (*Service Data Unit*).

Pour la couche (N), les données entrantes sont considérées comme utilisatrices du service (N).

La couche N ajoute aux données reçues (SDU) des informations de service nécessaires à la couche N homologue pour que celle-ci traite et délivre correctement les données à sa couche (N + 1) distante. Ces informations de protocole constituent le (N) PCI (*Protocol Control Information*).

Les données sont acheminées vers l'entité homologue via une connexion de niveau (N - 1). La couche N distante recevant la (N) SDU extrait le (N)PCI, l'interprète et délivre les données (N)SDU à la couche (N + 1) ; ces données deviennent alors la (N + 1)PDU. La Figure VI.6 illustre ce mécanisme.

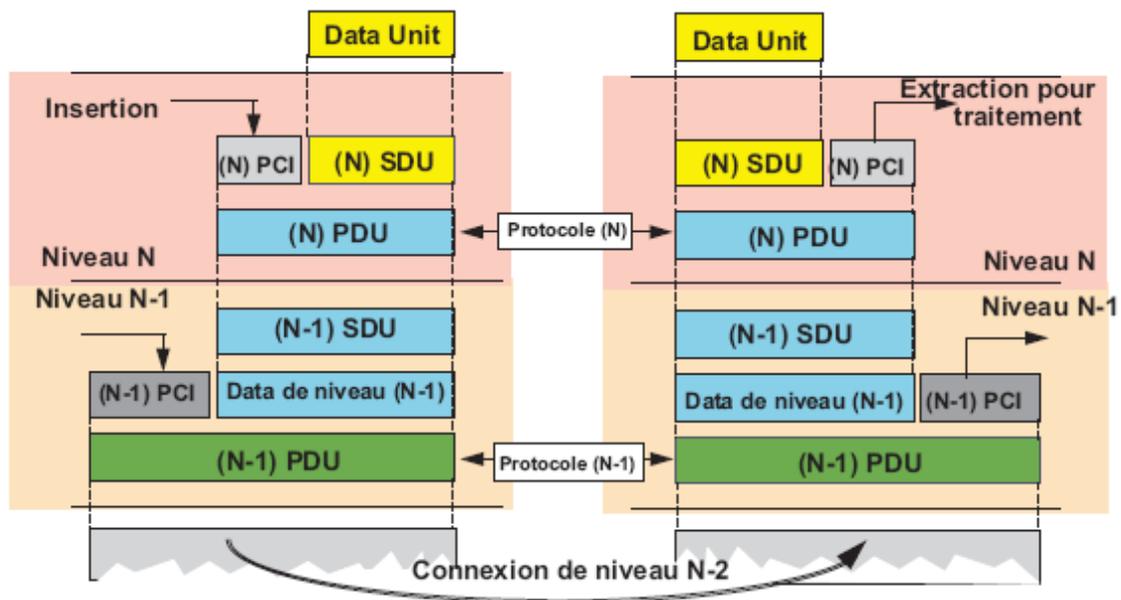


Figure VI.6 – Modèle général d'une couche.

Ainsi, chaque couche ajoute (ou extrait) un en-tête (*Header*), spécifique au protocole utilisé, permettant de traiter les données. Cet en-tête contient toutes les informations nécessaires au traitement distant de l'unité de données : l'identifiant de la connexion, l'adresse du destinataire, les compteurs de contrôle de l'échange...

#### Contrôle de l'interface

Lors de l'invocation d'un service de niveau (N), le niveau (N + 1) fournit un ensemble d'informations nécessaires au traitement correct de l'unité de données. Une partie de ces informations est utilisée pour construire le PCI, comme, par exemple les informations concernant l'adressage, le niveau de priorité demandé... L'autre est à l'usage exclusif de l'entité de niveau N, elle précise le traitement qui doit être opéré localement sur les données. Ces informations de contrôle de l'interface (**ICI**, *Interface Control Information*) sont annexées à la SDU pour former une unité de données de contrôle de l'interface (**IDU**, *Interface Data Unit*). L'ICI à usage exclusif de la couche N n'est pas transmis. La Figure VI.7 illustre ce propos.

#### Protocole en mode point à point et de bout en bout

La communication entre deux systèmes peut être directe ou se réaliser à travers un ou plusieurs relais (sous-réseau réel de transport ou autre moyen d'interconnexion). Cette approche conduit à définir deux types de dialogue (Figure VI.8) :

- Un dialogue entre les systèmes d'extrémité et le relais : dialogue en mode point à point.
- Un dialogue entre les systèmes d'extrémité : dialogue de bout en bout.

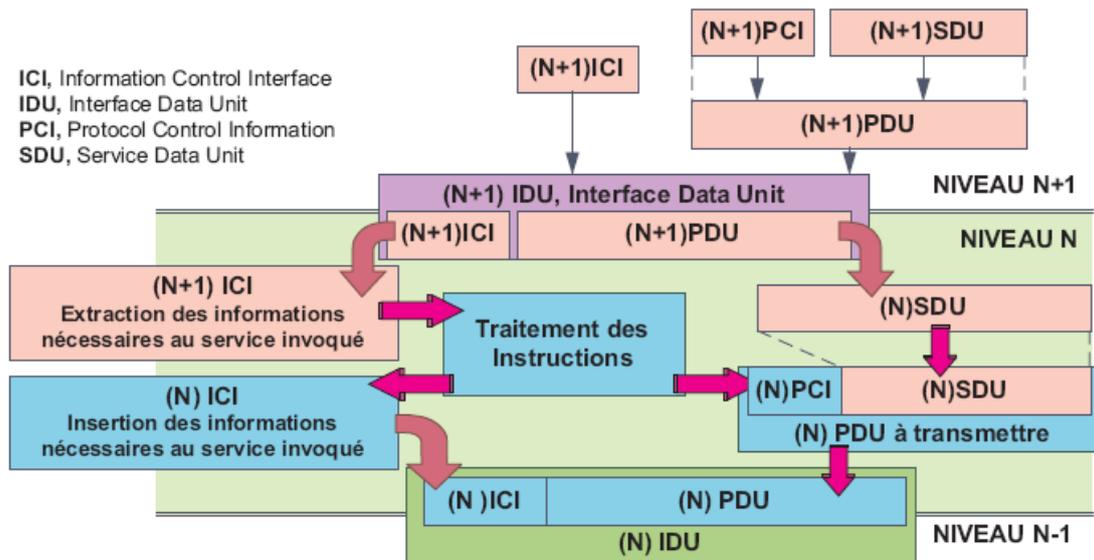


Figure VI.7 – Le contrôle de l'interface.

Les protocoles de point à point assurent le transport de l'information dans le sous-réseau réel de transport, ils assurent notamment le contrôle du lien, le contrôle et éventuellement la reprise sur erreur, l'adressage et l'acheminement. Les protocoles en mode point à point peuvent être en mode orienté connexion ou en mode non connecté. Les protocoles de bout en bout doivent essentiellement vérifier l'intégrité, au sens large, des informations remises aux applications et organiser le dialogue. Les protocoles de bout en bout sont généralement en mode orienté connexion.

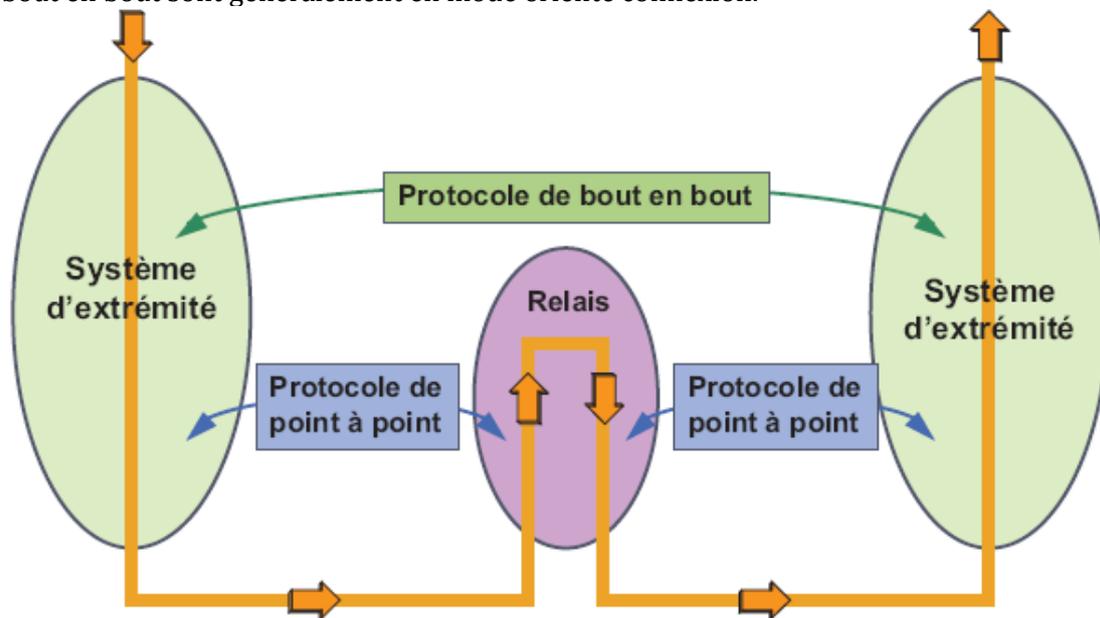


Figure VI.8 – Protocole en mode point à point ou de bout en bout.

## IV.2- Organisation du modèle de référence

### IV.2.1- Concepts ayant conduit à la modélisation

#### *Définition*

Au sens du modèle OSI, modèle pour l'interconnexion des systèmes ouverts, on appelle système réel l'ensemble constitué d'un ou plusieurs ordinateurs, logiciels, périphériques associés et opérateurs humains capables d'effectuer des traitements informatiques et de s'échanger des informations (normes ISO IS7498, NF 27498). Un système est dit ouvert si les communications entre les divers constituants s'effectuent conformément au modèle de référence (OSI).

#### *Principes ayant guidé à la détermination des couches*

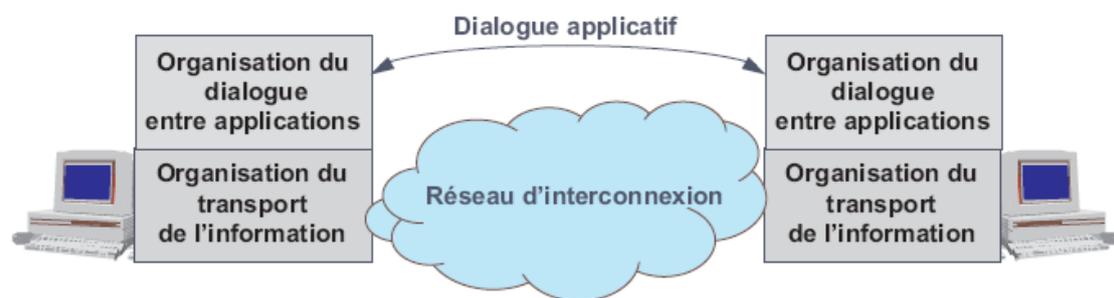
La nécessité d'identifier des fonctions élémentaires distinctes, mais participant au processus de communication, a conduit à étudier un modèle structuré en couches. La définition des différentes couches descriptives du modèle respecte les principes suivants :

- Ne pas créer plus de couches que nécessaire, pour que le travail de description et d'intégration reste simple, ce qui conduit à regrouper les fonctions similaires dans une même couche.
- Créer une couche chaque fois qu'une fonction peut être identifiée par un traitement ou une technologie particulière mise en jeu.
- Créer une couche là où un besoin d'abstraction de manipulation de données doit être distingué.

Une interface sera créée à la frontière de chaque couche. Les *Figure VI.9* et *VI.10* illustrent le principe de la structuration du système. Chaque couche (N) fournit les services (N) aux entités (N + 1) de la couche (N + 1). Chaque couche échange des unités de données (*Data Unit*) avec la couche correspondante sur l'entité distante (homologue) à l'aide d'un ensemble de règles (protocole) en utilisant pour cela les services de la couche inférieure.

#### *Couches hautes, couches basses*

Deux fonctions essentielles peuvent être distinguées pour assurer l'interfonctionnement d'applications informatiques à travers un réseau (*Figure VI.9*).



*Figure VI.9 – Interfonctionnement des applications.*

Il faut, d'une part garantir un transport fiable des informations à travers le réseau, et d'autre part organiser le dialogue entre les applications distantes (dialogue applicatif). Le modèle devant masquer à l'utilisateur la répartition physique des ressources et offrir les mêmes performances pour des ressources locales ou distantes.

Cet aspect conduit à spécifier deux ensembles de couches aux fonctionnalités spécifiques (*Figure VI.10*) :

- Les **couches hautes** essentiellement chargées d'assurer l'interfonctionnement des processus applicatifs distants, ces couches sont dites orientées application ;
- Les **couches basses** destinées à fournir aux couches hautes un service de transport fiable de données, déchargeant les couches hautes de la gestion de tous les mécanismes de localisation et de transfert d'information à travers un ou plusieurs systèmes relais, ces couches sont dites orientées transport (ou transfert).

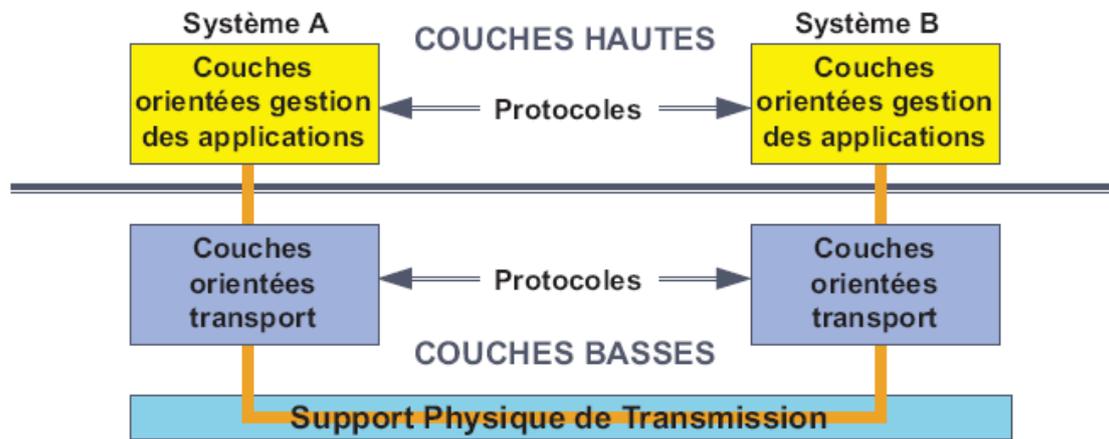


Figure VI.10 – Spécification en deux ensembles de couches.

Les couches basses garantissent aux couches hautes que le transfert d'information se réalise correctement. Il est donc nécessaire que la dernière couche basse destination s'assure, avant de délivrer les données aux couches applicatives, que celles-ci sont correctes (contrôle de bout en bout). Les autres couches inférieures n'effectuent qu'un transfert de proche en proche entre systèmes. Les couches hautes n'assurent, globalement, que l'organisation des échanges et fournissent les mécanismes nécessaires à assurer l'interfonctionnement de une ou plusieurs applications distantes.

#### IV.2.2- Description du modèle de référence

##### Définition des couches

Pour réaliser une communication à travers un ou plusieurs systèmes intermédiaires (relais) il faut (Figure VI.11) :

- relier les systèmes par un lien physique (couche PHYSIQUE) ;
- contrôler qu'une liaison peut être correctement établie sur ce lien (couche LIAISON) ;
- s'assurer qu'à travers le relais (réseau) les données sont correctement acheminées et délivrées au bon destinataire (couche RÉSEAU) ;
- contrôler, avant de délivrer les données à l'application que le transport s'est réalisé correctement de bout en bout (couche TRANSPORT) ;
- organiser le dialogue entre toutes les applications, en gérant des sessions d'échange (couche SESSION) ;
- traduire les données selon une syntaxe de présentation aux applications pour que celles-ci soient compréhensibles par les deux entités d'application (couche PRÉSENTATION) ;
- fournir à l'application utilisateur tous les mécanismes nécessaires à masquer à celle-ci les contraintes de transmission (couche APPLICATION).

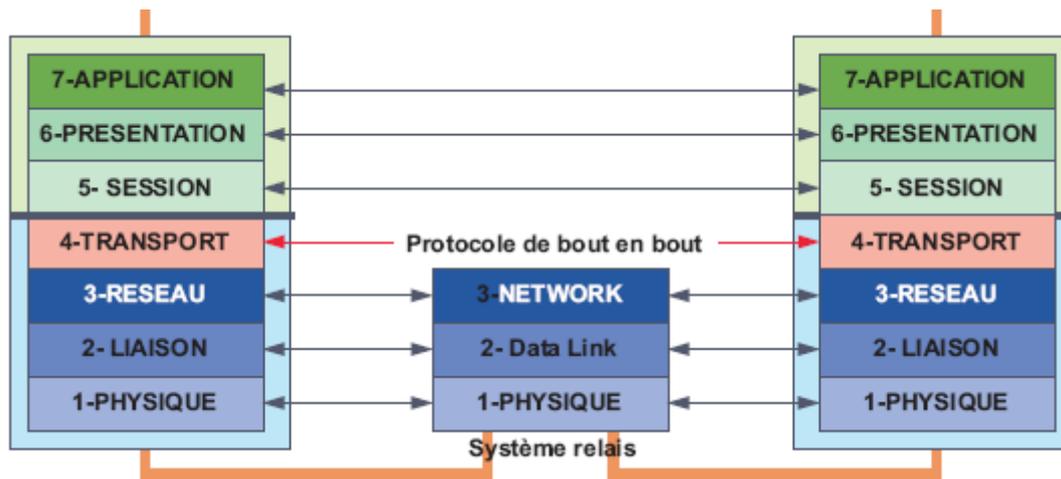


Figure VI.11 – Le modèle de référence.

C'est ainsi, qu'après de nombreux débats, le modèle de référence a été défini en 7 couches (compromis entre 6 et 8 !). Le modèle de référence (Figure VI.11) ne définit pas seulement des fonctionnalités de couche mais précise aussi la dénomination des unités de données (Figure VI.12).

#### Mécanismes élémentaires

##### ➤ L'encapsulation

Chaque couche du modèle insère un en-tête de protocole PCI. La Figure VI.12, où le symbole Hx représente l'en-tête (Header) de niveau, illustre ces mécanismes.

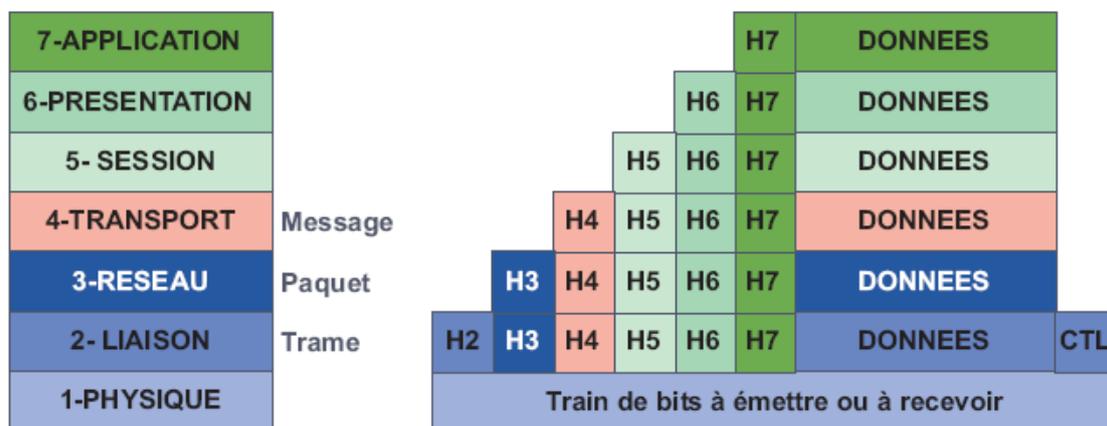


Figure VI.12 – L'encapsulation des données dans le modèle OSI.

La couche liaison de données ajoute un champ supplémentaire qui contient les informations nécessaires au contrôle (CTL) de la transmission (FCS, Frame Check Sequence). Le mécanisme d'encapsulation est illustré par la Figure VI.12.

##### ➤ Primitives de service

Les services offerts par la couche (N) sont invoqués par la couche (N + 1) à l'aide de primitives de service de niveau (N). Par exemple, en mode connecté (Figure VI.13), quatre primitives sont utilisées pour offrir un service : demande (request), indication (indication), réponse (response), confirmation (confirm). En mode non connecté, seules les primitives demande (request) et indication (indication) sont exploitées.

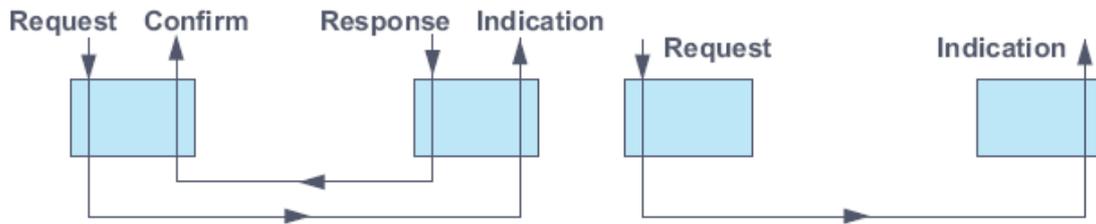


Figure VI.13 – Les primitives de service.

*Mécanismes pouvant être mis en oeuvre dans une couche*

➤ L'adaptation de la taille des unités de données

Les unités de données, manipulées par les différentes couches ou par les systèmes intermédiaires, ne sont pas forcément de taille compatible avec les capacités de ces systèmes. Différents mécanismes peuvent alors être utilisés (Figure VI.14).

La segmentation consiste à diviser une unité de données du service (N) en plusieurs unités de données de protocole (N). L'entité correspondante doit être capable d'assurer le réassemblage afin de reconstituer la SDU d'origine.

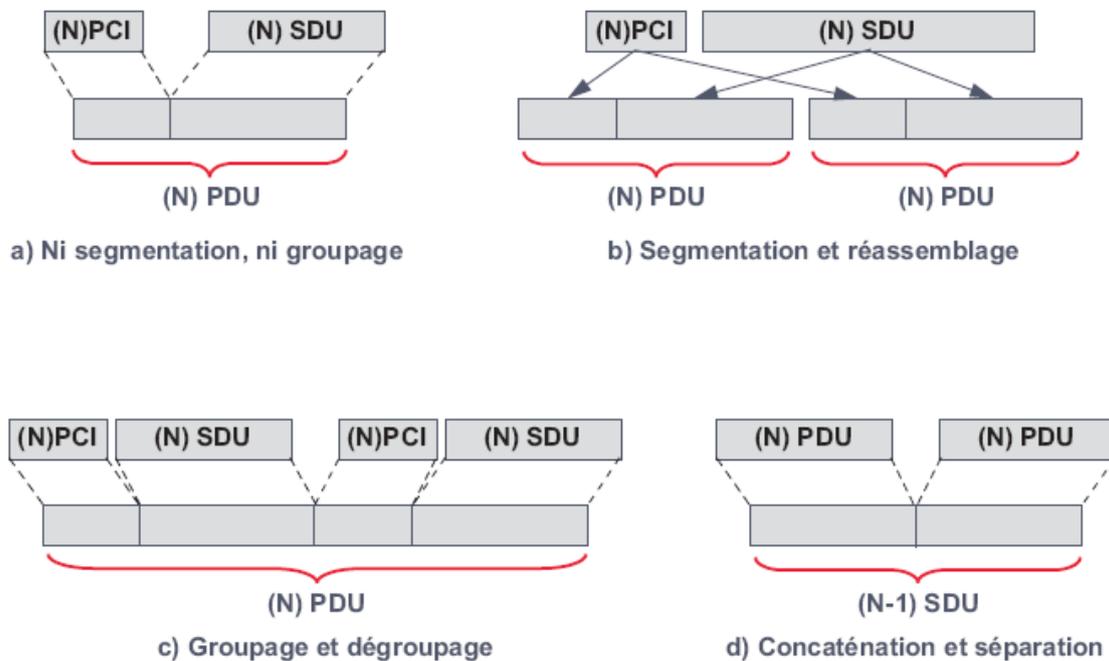


Figure VI.14 – L'adaptation de la taille des unités de données.

Le groupage réunit en une seule PDU de niveau (N) plusieurs unités de données de service. Chaque unité possède son propre en-tête.

La concaténation procède de la même manière, plusieurs PDU de niveau N sont associées pour former une seule SDU de niveau N - 1.

➤ Le multiplexage et l'éclatement des connexions

Le multiplexage (Figure VI.15) consiste pour une couche à prendre en charge plusieurs connexions de niveau (N) sur une seule connexion de niveau (N - 1). Alors que l'éclatement permet à la couche (N) d'utiliser plusieurs connexions (N - 1).

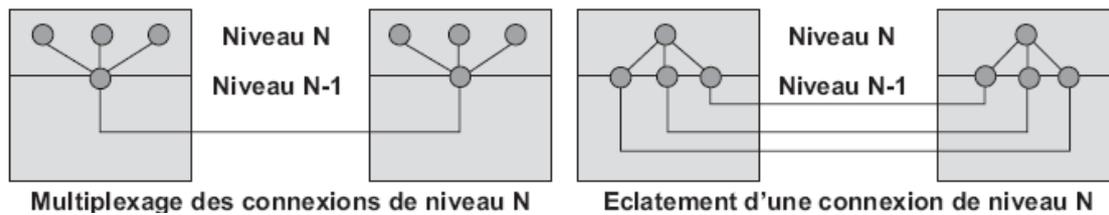


Figure VI.15 – Multiplexage et éclatement.

➤ Le contrôle de flux

Cette technique, déjà évoquée, assure une cadence de délivrance des données compatibles avec les capacités de traitement entre couches adjacentes (contrôle de flux à l'interface) ou entre couches homologues (contrôle de flux entre systèmes).

➤ Le maintien en séquence

Cette fonction garantit que les données remises à une couche (N) sont dans le même ordre que celles émises par la couche (N) distante. Le maintien en séquence n'est pas obligatoirement garanti par toutes les couches. La couche chargée de cette fonction doit être capable de mémoriser les données reçues hors séquence et les ordonner avant de les délivrer en séquence à la couche supérieure. La fenêtre de réception représente, en nombre d'unités de données, la capacité de mémorisation et de ré-ordonnancement de la couche. Le maintien en séquence est toujours garanti dans les modes orientés connexions.

➤ L'accusé de réception

L'entité destinataire (N) rend compte à l'entité émettrice (N) de la réception correcte ou incorrecte d'une unité de protocole de niveau (N). La technique de l'accusé de réception n'est pas obligatoirement liée au mode connecté. Dans les réseaux locaux, le service dit « LLC3 » implémente un service en mode datagramme avec accusé de réception (l'accusé de réception indique que le message est arrivé et non qu'il a été traité).

➤ La réinitialisation

Les entités communicantes peuvent revenir à un état de référence, la non-perte de données et la non-duplication ne sont pas garanties.

➤ Les données exprès

Les données exprès<sup>4</sup> correspondent à la possibilité d'émettre de petites unités de données.

Ces données ne sont pas acheminées plus rapidement par le réseau de transport, cependant elles échappent au contrôle de flux. Ces données sont délivrées, en priorité, par les entités destinataires.

➤ La détection, la correction et la notification d'erreur

Les protocoles (N) peuvent utiliser des fonctions de détection d'erreur et mettre en œuvre des mécanismes de correction (reprise sur erreur). En cas d'échec de la reprise sur erreur, la couche (N) signale à la couche supérieure (N + 1) une erreur non corrigée (notification d'erreur).

➤ La qualité de service

Certaines couches ont la faculté de négocier entre elles, une certaine qualité de service (**QoS**, *Quality of Service*). La qualité de service peut concerner les paramètres suivants :

- délai d'établissement de la connexion ;

- débit;
- temps de transit, gigue ;
- taux d'erreur résiduelle ;
- coût...

La qualité de service est représentée, dans la demande de connexion, par deux listes, la liste des paramètres relatifs à la qualité demandée et celle relative à la qualité minimale de service acceptable. Si les valeurs minimales ne peuvent être offertes par l'un des sous-réseaux réels traversés ou par l'entité distante, la connexion est refusée.

#### IV.3- Introduction au TCP/IP

*TCP/IP*, né de la réflexion de chercheurs Américains. *IP* (*Internet Protocol* ou *Interconnected Network Protocol*) comme nous le verrons, est un protocole qui permet d'envoyer des informations élémentaires de machine à machine. Cependant l'information ne part pas d'une machine mais d'une application fonctionnant sur une machine pour aboutir à une application fonctionnant sur une autre machine. Pour résoudre ce problème les chercheurs ont développé un autre protocole de nom *TCP* (*Transport Control Protocol*). Le nom de *TCP/IP* a donc été choisi en référence à ces deux principaux protocoles qui le caractérisent.

Aujourd'hui, *TCP/IP* intègre beaucoup d'autres protocoles (*ICMP, IGP, FTP, SMTP, HTTP, ...*). *TCP/IP* est un protocole qui nécessite une coopération des *OS* des machines dont pratiquement toutes les couches.

*TCP/IP* est très répandu, car sa robustesse a été prouvée (quelques millions de machines interconnectées dans le monde). Il est également très répandu, car dès son origine il a été implémenté sur des systèmes *UNIX*. Beaucoup de chercheurs ayant contribué à l'évolution de *TCP/IP* à son origine sont issus de l'université de Barclay qui a très largement diffusé son système *UNIX* avec l'interface des sockets pour manipuler des connexions *TCP/IP*.

Tous les applicatifs réseaux doivent pouvoir communiquer entre eux, quelque soit l'architecture ou la plate-forme utilisée. Pour cela, les opérations sur les réseaux ont été divisées en plusieurs phases de base, de manière à simplifier la portabilité des applicatifs sur toutes les plates-formes. C'est ce qu'on appelle en couche. Un standard a alors été créé, normalisé par l'Open System Interconnection Référence Model (modèle de référence d'interconnexion des systèmes ouverts) sous la référence *OSI-RM*, utilisant 7 couches distinctes.

L'architecture *TCP/IP* (*Figure VI.16*) est similaire à ce modèle en couche, mais ne dispose que de 4 couches dans la plupart des cas.

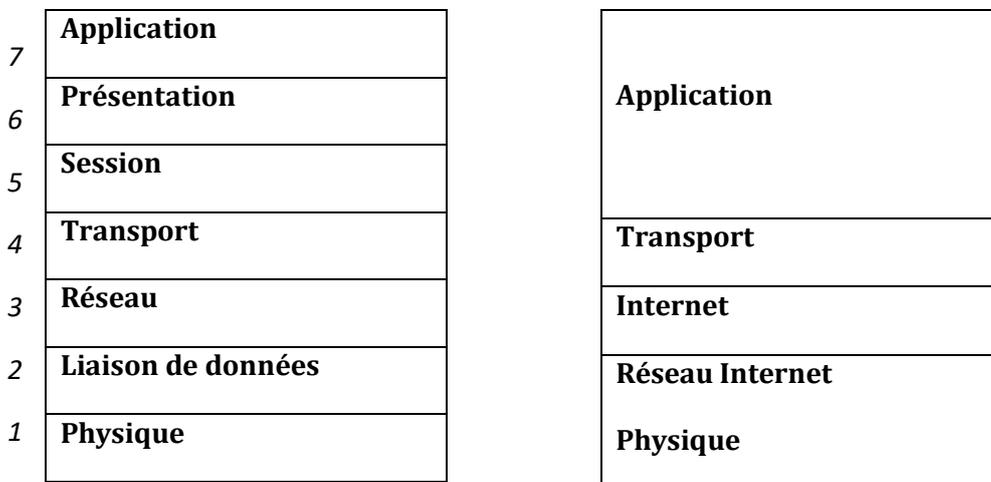


Figure VI.16 – Comparaison entre OSI et le modèle TCP/IP (Internet).

Les couches 5 à 7 du modèle OSI sont des couches dites d'application. Elles sont orientées application, et fournissent une interface entre une application et le réseau.

Les couches 1 à 4 sont des couches dites de liaison. Ce sont elles qui se chargeront du routage, afin de correctement acheminer les paquets d'un point à un autre.

Le modèle *TCP/IP* ne suit pas tout à fait l'architecture en couche du modèle *OSI*. Après expérimentation, on s'est aperçu qu'une carte réseau devait regrouper les couches 1 et 2 pour obtenir des performances correctes. Toutefois, il existe quelques cas où les couches 1 et 2 sont différenciées dans le modèle *TCP/IP*.

Remarque : Dans le modèle *TCP/IP*, la couche de transport utilise soit *TCP*, soit *UDP* (*User Datagram Protocol*). Par contre il n'existe qu'un seul protocole de niveau Réseau : *IP*.

**Le protocole IP** : Le protocole *IP* (*Internet Protocol, RFC 791*) est au cœur du fonctionnement d'un internet. Il assure sans connexion un service non fiable de délivrance de datagrammes *IP*. Le service est non fiable car il n'existe aucune garantie pour que les datagrammes *IP* arrivent à destination. Certains peuvent être perdus, dupliqués, retardés, altérés ou remis dans le désordre. Le mode de transmission est non connecté car *IP* traite chaque datagramme indépendamment de ceux qui le précèdent et le suivant.

Le rôle du protocole *IP* est centré autour des trois fonctionnalités suivantes :

- Définir le format du datagramme *IP* qui est l'unité de base des données circulant sur Internet.
- Définir le routage dans Internet.
- Définir la gestion de la remise non fiable des datagrammes.

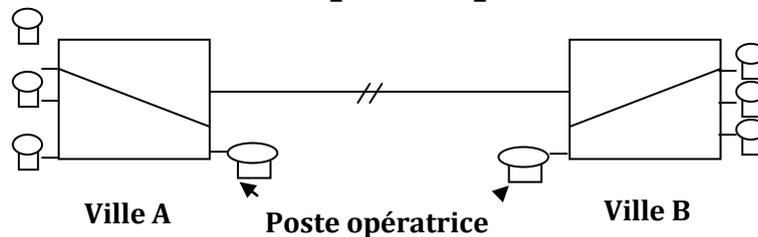
**Le protocole UDP** : Le protocole *UDP* utilise *IP* pour acheminer, d'un ordinateur à un autre, en mode non fiable des datagrammes qui lui est transmis par une application. *UDP* n'utilise pas d'accusé de réception et ne peut donc pas garantir que les données ont bien été reçues. Il ne réordonne pas les messages si ceux-ci n'arrivent pas dans l'ordre dans lequel ils ont été émis et il n'assure pas non plus de contrôle de flux.

Cependant, *UDP* fournit un service supplémentaire par rapport à *IP*, il permet de distinguer plusieurs applications destinataires sur la même machine par l'intermédiaire des *ports*. Un port est une destination abstraite sur une machine identifiée par un numéro qui sert d'interface à l'application pour recevoir et émettre des données. Chaque datagramme émis par *UDP* est encapsulé dans un datagramme *IP* en y fixant à 17 la valeur du protocole.

**Le protocole TCP** : Contrairement à *UDP*, *TCP* est un protocole qui procure un service de flux d'octets orienté connexion et fiable. Les données transmises par *TCP* sont encapsulées dans des datagrammes *IP* en y fixant la valeur du protocole à 6.

## Chapitre V: Introduction à la téléphonie.

### **V.1 – Le réseau téléphonique manuel**



*Figure V.1 – Poste d'opératrice.*

Pour pouvoir faire un appel téléphonique, on était obligé de passer par une ou plusieurs opératrices. C'était un système manuel. Ces systèmes devenaient de plus en plus compliqués avec l'augmentation des abonnées.

### **V.2 – Le réseau téléphonique Public Automatique**

Aux environs de 1920, les systèmes ont été automatisés. Ce qui a permis de supprimer les postes opératrices. Les centraux devenaient capables de faire l'établissement, l'acheminement, le control et la taxation.

### **V.3 – Le rôle et fonction du réseau téléphonique**

Le réseau téléphonique permet le transport de la parole, actuellement il s'est élargi au transport des données. Le développement grâce à la numérisation de la transmission et à la commutation électronique renforce le poids de ce réseau qui semble devoir constituer une des bases les plus surs de la télématique (téléinformatique). Cette orientation

permet aux réseaux téléphoniques de transporter toutes sortes d'informations même l'image animée grâce à la fibre optique et à la commutation optique.

Pour pouvoir faire le transport de l'information, il faut essentiellement 4 composantes :

- 1- L'organisation du réseau.
- 2- La fonction de commutation.
- 3- La fonction de distribution.
- 4- La fonction de transmission.

### V.3.1 – L'organisation du réseau

Du point de vue de l'utilisateur, un réseau téléphonique est un moyen technique de transmission et de commutation géré en générale par les PTT ou organismes (Public ou Privé). L'utilisateur du réseau dispose d'un terminal raccordé au central le plus proche par une ligne téléphonique d'abonné.

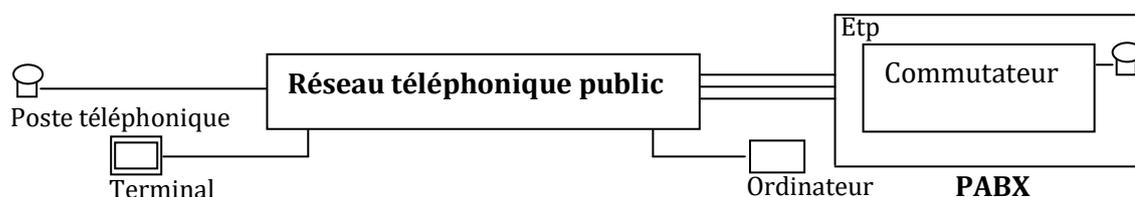


Figure V.2 – Liaison d'abonné.

Les liaisons peuvent être plus ou moins complexes selon qu'il s'agit d'un abonné simple (résidentiel) ou professionnel.

Exemple d'une Etp ou d'une administration qui dispose d'un réseau téléphonique local et qui est relié au réseau téléphonique public par plusieurs lignes d'abonnés à fort trafic.

Le réseau téléphonique public permet aux abonnés de faire une communication locale, une communication régionale, une communication nationale et une communication internationale.

Un réseau téléphonique public est constitué d'un ensemble de commutateurs (centraux), ils ont la fonction de commutation et de supervision. Ces centraux sont reliés entre-eux par des circuits de télécommunication.

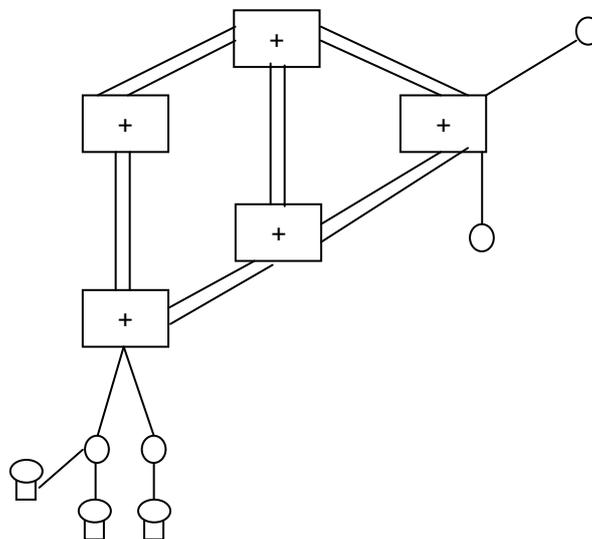


Figure V.3 – Organisation du réseau RTCP.

 : Commutateur.

 : Central local.

 : Poste d'abonné.

 : Circuit téléphonique.

 : Ligne d'abonné.

*Remarque :* Une ligne téléphonique comporte deux fils.

Un circuit téléphonique comporte 4 fils (deux pour l'émission et deux pour la réception).

Une communication entre deux abonnés selon qu'elle soit locale, régionale, nationale ou internationale aura à emprunter un chemin physique dont la complexité peut être très variable. Un chemin physique est constitué par l'ensemble de circuits téléphoniques et de commutateurs traversés.

Vue la complexité des chemins possibles, une hiérarchisation des commutateurs (centraux) s'impose. On a en générale 4 types de centraux ou commutateurs :

- Des centraux de transit Nationaux : CTN
- Des centraux de transit Interurbain : CTI
- Des centraux Régionaux : CR
- Des centraux Locaux : CL

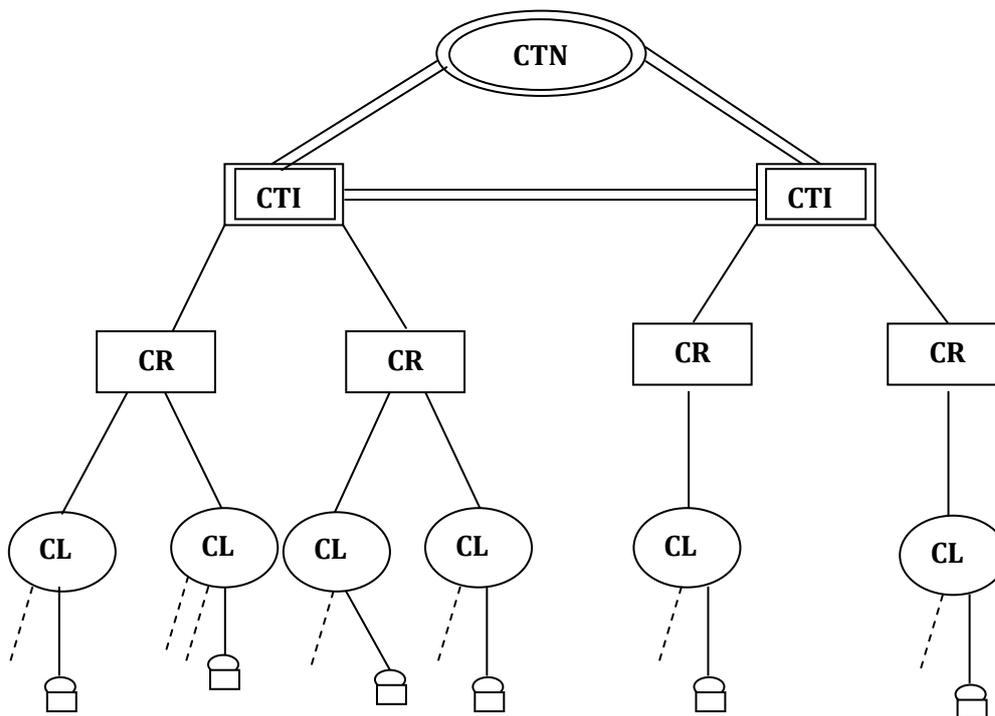


Figure V.4 – Hiérarchie des commutateurs..

- **Numérotation** : L'échange de trafic entre deux abonnés quelconque entre eux (quelque soit la

distance) s'effectue grâce à une numérotation spécifique aux pays.

$$NN = \underbrace{P3B4}_{\text{Préfixe int erurbain}} \underbrace{AB}_{\text{indicatif int erurbain}} \underbrace{PQ}_{n^{\circ} \text{deserie du commutateur}} \underbrace{M6DU}_{n^{\circ} \text{Abonné}}$$

NN : Le numéro national.

$$NI = \underbrace{P1B2}_{\text{préfixe int enational}} \underbrace{1123}_{\text{indicatif int ernational du pays de destination}} \underbrace{NN}_{n^{\circ} \text{national de l'abonné}}$$

- **Signalisation :** Avant que deux utilisateurs communiquent entre eux, il faut échanger un certain nombre d'informations nécessaire à l'établissement de cette communication. Les commutateurs émettent et reçoivent et interprètent ces informations. A chaque information, il est théoriquement possible d'affecter un signal qui lui est propre.
- **Taxation :** Elle établit les paramètres et les méthodes de tarification de service téléphonique de manière générale.
  - **Les paramètres de tarification :** se sont :
    - La zone où réside l'abonné, elle détermine le prix de l'abonnement.
    - Les distances entre les abonnés engagés dans une communication.
    - La durée de la conversation.
    - Le moment d'établissement de la liaison.
  - **Les catégories de taxe :** se sont :
    - Les taxes de raccordement ou d'accès au réseau (nouvelle ligne).
    - La taxe d'abonnement qui caractérise la location des équipements et entretien.
    - La taxe correspondante aux communications passées.
  - **La circonscription de taxe :** est une zone géographique qui couvre une ou plusieurs CL, à l'intérieur de laquelle les communications sont taxées indépendamment de la distance et la durée, plusieurs administrations utilisent une taxe de base (TB), généralement, elle est la plus faible taxe pour tarifier les communications à l'intérieur d'une circonscription. Outre la taxation est fonction de la distance et de la durée, la durée commence du décrochage des demandés et

cesse (s'arrête) au rattachement de l'un des deux. La distance est évaluée à vol d'oiseau, entre les centraux qui sont les chefs lieu de circonscription sur le plan technique, les distances sont traduites par des paliers de taxe avec des tarifs différents.

A- Palier de taxe de réseau téléphonique fixe :

- Une communication à l'intérieur de la circonscription, une taxe de base TB tous les 6mn.
- Une communication entre circonscription distante de 100Km ou plus, une TB toute les 60s.
- Une communication entre circonscription distante de 100 à 200Km, une Tb toute les 30s.
- Une communication de plus de 200Km, une TB toute 24s.

B- Palier de taxation de réseau mobile : Les communications à destination au centre d'appel GSM sont facturées selon leurs durées de communications.

C- Loi :

$$PT = \text{Durée de communication} / \text{nombre de TB.}$$

Le coût d'une communication = le nombre de TB x TB.

### V.3.2 - La fonction de commutation

C'est la partie de réseau qui permet de réunir temporelement la ligne de l'abonné demandeur à celle de l'abonné demandé.

La raison pour laquelle on utilise la commutation est la suivante :

Si nous avons par exemple 6 abonnés : 15 lignes.

$$N_{ab} = N(N-1)/2 \text{ ligne.}$$

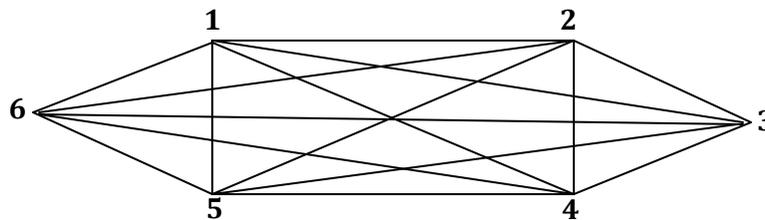
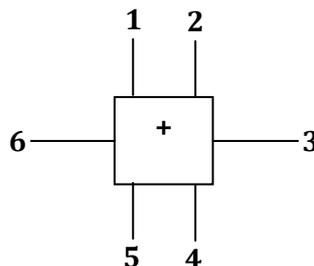


Figure V.5 - Interconnexion totale par câbles.

6 Ab : 6 lignes téléphoniques.

N<sub>ab</sub> : N lignes téléphoniques.



- **Etablissement d'une communication :**

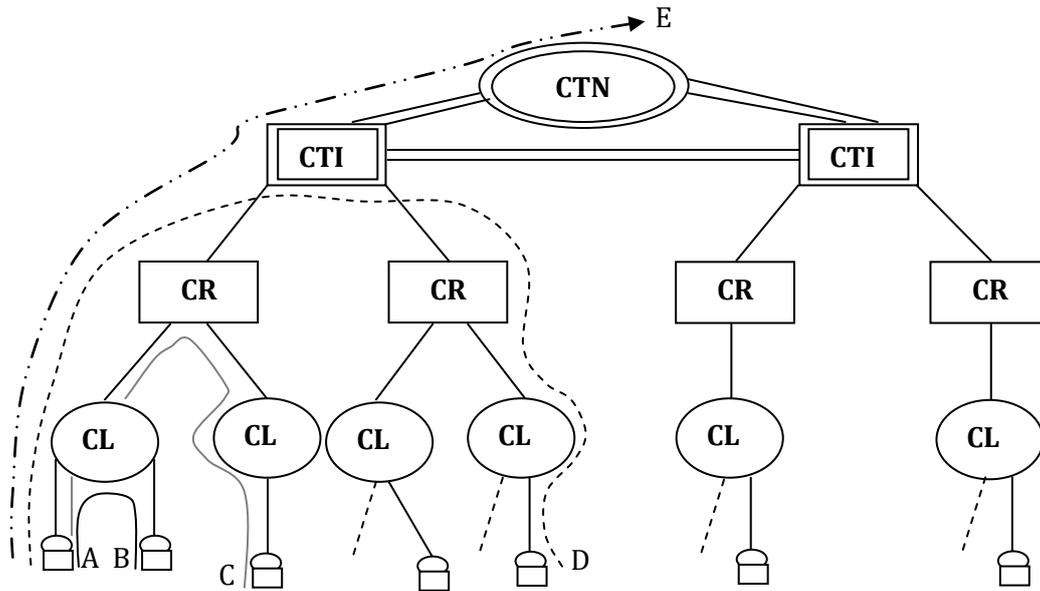


Figure V.6 – Types des appels.

- A → B : Appel Local.
- A → C : Appel Régional.
- A → D : Appel National.
- A → E : Appel International.

- **Les différents types d'établissement d'une communication :**

- Emission d'appel (Décrochage du combiné) : fermeture de la boucle.
- Présélection (reconnaissance de l'appel).
- Enregistrement (numérotation de l'abonné demandé).
- Traduction (Définition du routage : aiguillage).
- Sélection (acheminement de l'appel).
- Surveillance, taxation et libération.

- **Les systèmes de commutations :**

On distingue dans le réseau téléphonique plusieurs familles de commutation :

- **Le système manuel :** se fait par la présence d'une opératrice pour l'aiguillage des appels.
- **Le système ROTARY :** c'est un système mécanique qui est caractérisé par des contacteurs effectuant des mouvements de rotation importants.

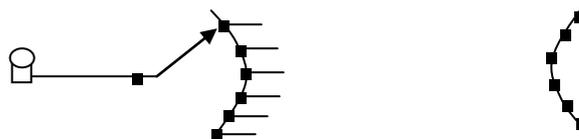


Figure V.7 – Système ROTARY.

C'est une filière de fabrication abandonnée dans les années 40.

- **Système CROSS-BAR** : C'est des systèmes électroniques. La connexion est réalisée physiquement par l'équivalent de contact à Relais.

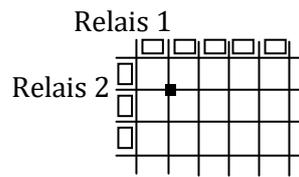


Figure V.8 – Système CROSS-BAR.

Si le relais 1 et 2 est actionné : on a un contact au niveau du point noir.

C'est une filière abandonnée en 1980. Leur inconvénient c'est qu'il fait beaucoup de bruit et occupe beaucoup de place.

- **Système électronique** : Ce sont des systèmes modernes qui ont vu le jour à partir de 1980. Les sélecteurs sont des commutateurs électroniques gérés par des microcontrôleurs. Ce sont des plaques circuits imprimés fonctionnant avec des transistors en régime saturé-bloqué. Ces centraux qui prennent peu d'espace, pas de bruits et ils sont plus rapide.

Il existe deux types de centraux électroniques :

- *Système Spatial* : c'est un système Analogique.
- *Système Temporel* : c'est un système Numérique.

### V.3.3 – La fonction de distribution

C'est la partie de réseau qui se trouve entre le poste d'abonné et son autocommutateur de rattachement (figure ci-dessous).

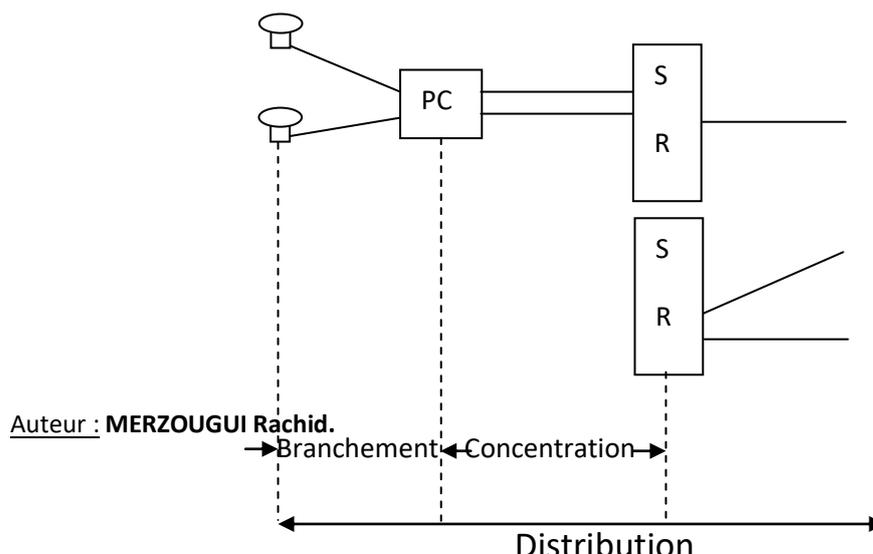


Figure V.9 – Distribution.

### V.3.4 – La fonction de transmission

On utilise pour cela des lignes de transmissions (supports physiques) qui peuvent être constitués par :

- Deux fils en cuivre simples, utilisés sur des liaisons de courtes distances < 12Km.
- Paire torsadée : elles sont utilisées en Urbain pour une moyenne distance < 50Km (MIC).
- Câble coaxial : utilisé pour la transmission interurbaine (longue distance) et pour les connexions internationales (sous-marines). C'est un câble qui supporte les hauts débits.
- La fibre optique : utilisée de plus en plus actuellement dans tous les domaines que ce soit dans les liaisons locales urbaines et interurbaines, capacité 100 000 appels, atténuation ne nécessite des amplificateurs que tous les 50Km.
- Faisceaux Hertzien : onde radioélectrique, on les utilise pour des liaisons de télécommunication à large bande (haut débit) pour des applications urbaines ou interurbaines. Les FH utilisent des fréquences de transmission très élevées nécessitent des amplifications toutes les 50Km.
- Les satellites : sont utilisés de plus en plus.

## V.4 – Appareil téléphonique

### V.4.1 – Poste d'abonné

Il existe deux types de postes d'abonnés :

- A cadran : Impulsion décimale.
- A multifréquence : une combinaison de deux fréquences, il contient un oscillateur à l'envoi d'un numéro, le central détecte deux fréquences donc il distingue le chiffre.

### V.4.2 – Schéma électrique d'un appareil téléphonique

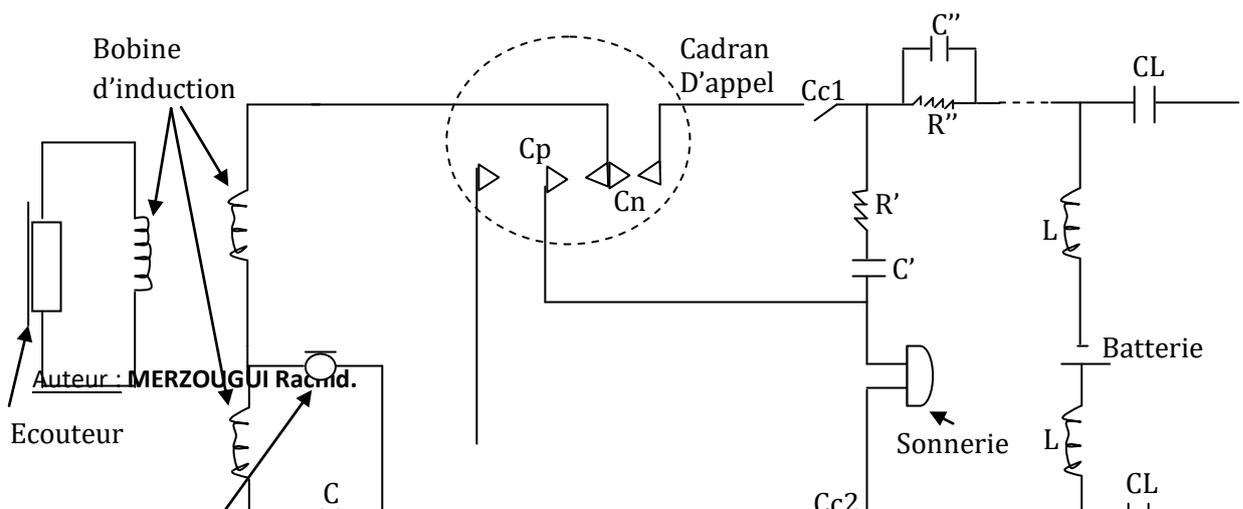


Figure V.10 – Schéma synoptique d'un appareil téléphonique.

- Le micro convertit la parole en signal électrique.
- L'écouteur convertit le signal électrique en parole.
- La bobine d'induction adapte la ligne téléphonique au poste téléphonique et produit l'effet antilocal (-20dB).
- La sonnerie (50Hz – 80Volts) envoyée par le central.
- Crochet commutateur réalise la fermeture et l'ouverture de la boucle.
- Cadran d'appel : permet la numérotation.
- Le poste téléphonique doit avoir une impédance entre 300 et 600 Ohm.
- Le poste téléphonique étant alimenté par la Batterie central (-48Volts), le retour du cadran d'appel permet pour chaque chiffre d'interrompre le circuit autant de fois que le chiffre comporte d'unité, exemple : une fois pour 1, 9 fois pour 9.
- R, C : Réglage antilocal (-20dB), consiste à ce qu'une partie du signal sonore incidente sur le micro soit déviée sur l'écouteur.
- R', C' : Le courant d'appel appliqué à la sonnerie.
- R'', C'' : Réglage du courant du micro.
- Cc1, Cc2 : Contact du crochet, commutateur, permet l'ouverture et la fermeture de la boucle.
- Cn : Contact ouvert périodiquement en cours de numérotation.
- Cp : Contact de protection pour court-circuiter l'ensemble (micro, écouteur et la sonnerie) en cours de la numérotation.
- CL : Capacité de liaison empêche le 48Volts d'aller vers le central.
- L : Bobine de lissage empêche le courant alternatif vers l'alimentation (Batterie centrale).

#### V.4.2.1 – Numérotation Décimal

Pour être comprise par le central de rattachement (local), chaque impulsion (Impulsion d'ouverture) dure 66ms suivie d'un établissement (Impulsion de fermeture) dure 33ms. Soit une période par unité de 100ms, entre l'envoi de deux chiffres, il faut un intervalle de 300ms.

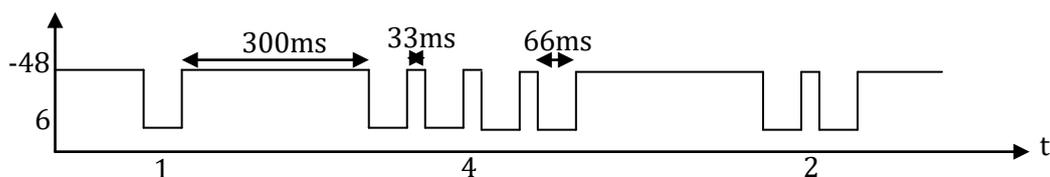


Figure V.11 – Les impulsions de numérotation.

#### V.4.2.2 – Numérotation Multifréquence

Dans les postes Multifréquences, on trouve intégrés des générateurs de fréquence qui sont alimentés par le central quand le combiné est décroché en appuyant sur une touche on génère l'envoi de deux fréquences.

Fréquences Hautes Fréquences Basse	F1 1203	F2 1336	F3 1477	F4 1633
f1 697	1	2	3	A
f2 770	4	5	6	B
f3 852	7	8	9	C
f4 852	*	0	#	D

Tableau V.1 – Fréquences de numérotation.

## V.5 – Les modes de signalisation

Dès le décroché et jusqu'au raccroché, de nombreuses informations gèrent la communication téléphonique. Ces informations constituent la signalisation. Lors de l'établissement d'une communication, des informations de signalisation sont échangées entre l'utilisateur et le réseau :

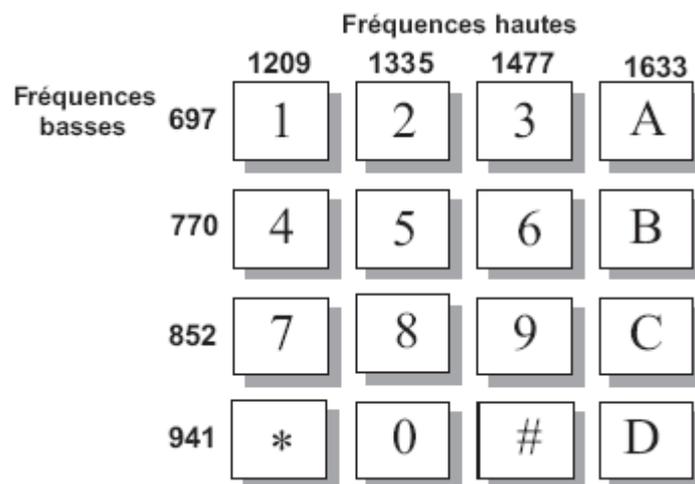


Figure V.12 – Clavier des postes à fréquences vocales.

Le décroché, l'invitation à numéroté, la numérotation, le retour d'appel, le décroché du correspondant..., cette signalisation est dite signalisation Usager/Réseau. D'autres, nécessaires à l'établissement du circuit et à la supervision du

réseau, n'intéressent que le réseau, c'est la signalisation réseau. Deux modes de transport des informations de signalisation sont utilisés en téléphonie (*Figure V.13*).

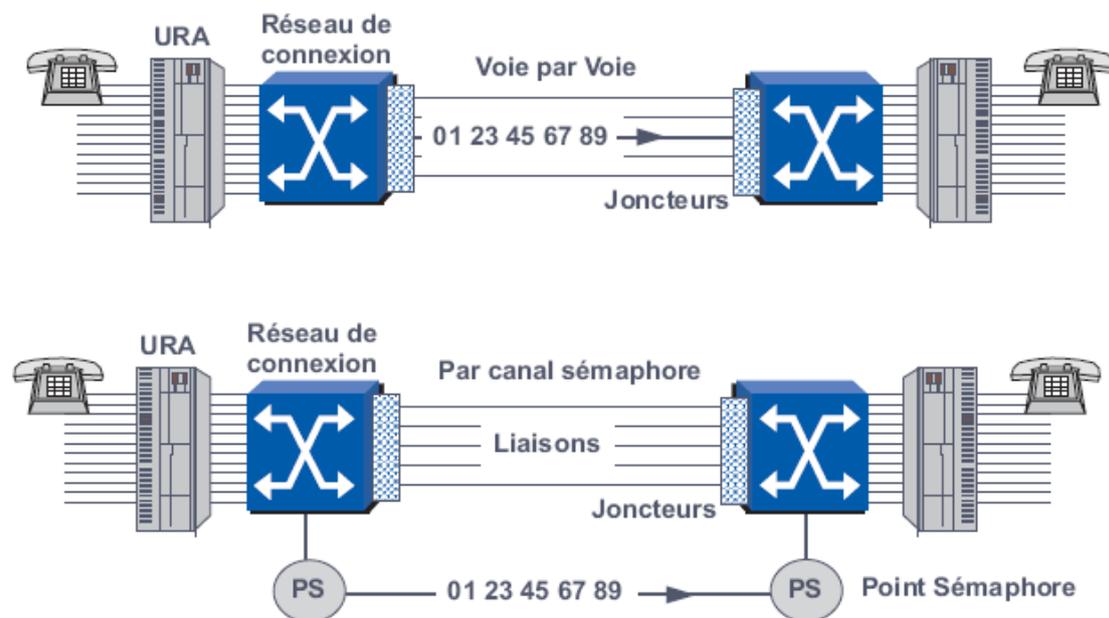


Figure V.13 – Les modes de signalisation.

Dans la signalisation **voie par voie** ou signalisation CAS (*Channel Associated Signalling*), une voie de communication correspond une voie de signalisation, la signalisation est associée à la communication. Ce qui nécessite l'établissement du circuit pour qu'elle soit transmise.

Cette signalisation est dite en mode événement, c'est-à-dire qu'à un événement spécifique est associé un état électrique (impulsion...). La numérotation est transmise sur les fils de voix. La signalisation voie par voie peut être dans la bande (Amérique du Nord et Japon) ou hors bande.

Elle a pratiquement disparu des réseaux publics mais subsiste sur la ligne de raccordement d'un usager analogique et dans de nombreuses installations

téléphoniques privées. La signalisation par **canal sémaphore** ou signalisation **CCS** (*Common Channel Signaling*) utilise un canal dédié (multiplexage avec les voies de communication) pour signaler tous les événements relatifs à un ensemble de circuits, la numérotation est acheminée sur le canal sémaphore en mode message. Les informations de signalisation sont transmises hors communication, ce qui autorise de nombreux téléservices. Le protocole de signalisation peut être normalisé ou propriétaire (protocole propre à un constructeur).

## V.6 - ÉVOLUTION DE LA TÉLÉPHONIE, LE RNIS

### V.6.1 - De l'accès analogique à l'accès numérique

La numérisation du réseau nécessite une conversion analogique/numérique en entrée du réseau et numérique/analogique en sortie. Un usager qui désire utiliser  $n$  communications téléphoniques simultanées doit être raccordé par  $n$  lignes (lignes groupées, les lignes groupées sont vues, pour le réseau, sous un même numéro). La numérisation autorise le multiplexage, d'où l'idée de réaliser des liaisons numériques de bout en bout, une seule ligne physique peut alors acheminer plusieurs communications téléphoniques (*Figure V.14*).

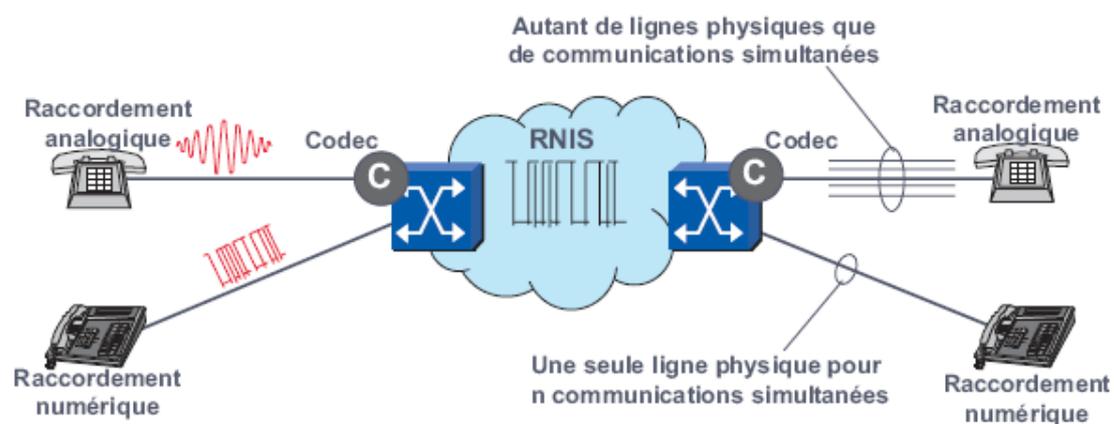


Figure V.14 - De l'analogique au numérique.

En réservant un IT (Intervalle de Temps) à la signalisation (débit de 64 kbit/s), on peut acheminer celle-ci en mode messages via un protocole de haut niveau. De ce fait, la signalisation peut être enrichie et autoriser de nombreux services nouveaux, c'est le **RNIS** (Réseau Numérique à Intégration de Service ou **ISDN**, *Integrated Service Digital Network*).

### V.6.2 – Le concept d'intégration de services

Le RNIS est une approche service du réseau devenu alors le réseau unique qui permet, à partir d'un seul raccordement, de disposer à la fois de services voix (téléphonie), vidéo (visiophonie, téléconférence), de transmission de données en mode paquets ou autre et de la transmission de l'écrit (télécopie). La figure 15.14 schématise cette évolution, en RNIS, si un télécopieur initialise un appel, seul le télécopieur de l'installation destination « sonne ».

Le raccordement de terminaux différents (voix, données, images) sur une même ligne nécessite une signalisation spécifique et enrichie qui permette, à la fois, l'identification du terminal et le type de service requis. C'est ainsi, que le RNIS distingue les canaux de transmission (transport) de données ou canaux B établis appel par appel (circuits commutés), du canal de signalisation ou canal D établi de manière permanente et transportant les informations nécessaires à l'établissement du circuit (adresse, type de service invoqué...).

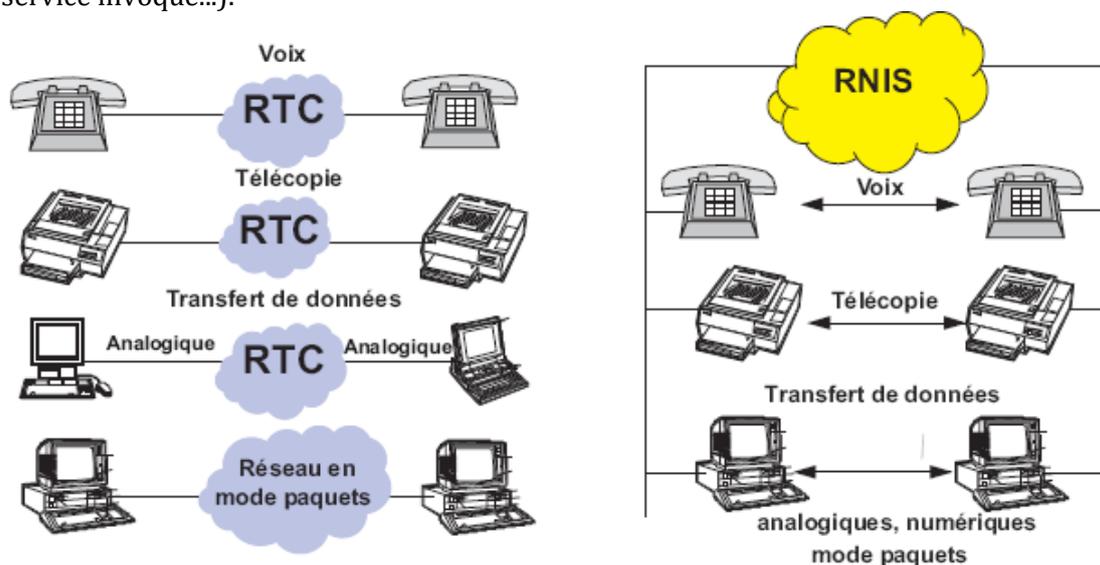


Figure V.15 – Évolution des accès avec le concept RNIS.

### V.6.3 – Structure du réseau

Un terminal RNIS utilise deux connexions : une connexion commutée à un canal B (*Bearer channel*) utilisé pour le transport d'informations utilisateur à 64 kbit/s (voix, données et images) et une connexion permanente sur le canal de signalisation (canal D, *Data channel*) de 16 ou 64 kbit/s. Des débits plus importants peuvent être obtenus par agrégation de plusieurs canaux B, on parle alors de canaux H (*High speed channel*) qui offrent un débit de 384 kbit/s (H0), 1 536 kbit/s (H11) ou de 1 920 kbit/s (H12). La Figure V.16 illustre le principe de raccordement d'un terminal au réseau RNIS.

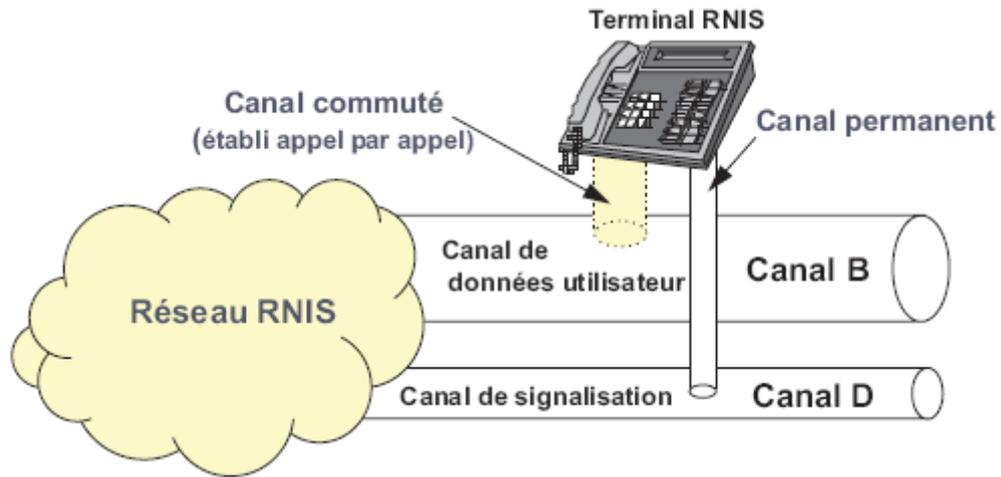


Figure V.16 – Connexions d'un terminal RNIS.

La connexion permanente du terminal au canal de signalisation rend obsolète la notion de terminal occupé : le terminal pourra toujours être alerté d'un appel entrant et recevoir, via le canal D, des messages (mini-messages). RNIS est donc un système de transmission utilisant deux réseaux distincts : un réseau de transmission (commutation de circuits) et un réseau de signalisation (commutation de paquets). Les réseaux sont fonctionnellement différents. Cependant, ils utilisent les mêmes capacités de transport (multiplexage) mais les commutateurs sont différents bien que situés sur les mêmes sites. La Figure V.17 illustre ce concept.

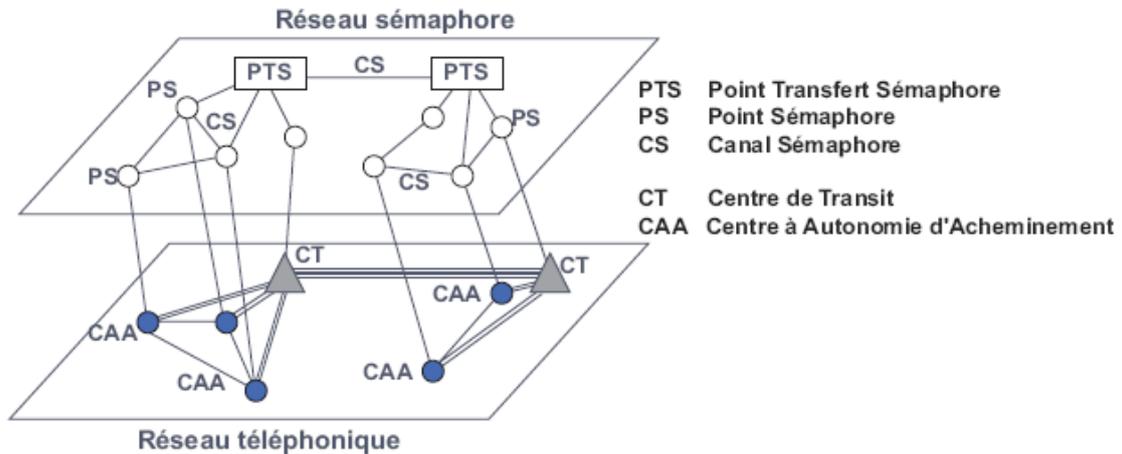


Figure V.17 – Réseau téléphonique et réseau sémaphore.

## V.7 – LA TÉLÉPHONIE ET LA MOBILITÉ

### V.7.1 – Principes généraux

Le besoin d'alerter ou de communiquer avec une personne en déplacement a conduit aux concepts de messagerie unilatérale (alerte à personne ou *paging*) et de radiotéléphonie cellulaire.

Le *paging* consiste à envoyer par diffusion à un petit terminal de poche un bip sonore ou un petit message alphanumérique. La communication est unilatérale, le message est transmis par Minitel ou par l'intermédiaire d'une opératrice. De ce fait, les techniques mises en œuvre pour le *paging* sont simples.

Il n'en est pas de même de la téléphonie mobile qui, en plein essor, soulève de nombreuses questions notamment :

- la bidirectionnalité de la communication et le nombre de communications à établir en même temps posent un problème d'allocation de fréquences. Le partage du spectre a introduit la notion de communication cellulaire. Une cellule est une zone dans laquelle les fréquences utilisées appartiennent à un même ensemble. Deux cellules adjacentes ne devront pas utiliser le même ensemble de fréquences ;
- l'accès multiple et le partage du support (politique d'accès) ;
- la localisation du mobile en déplacement ou itinérance (*roaming*) ;

- la possibilité pour le mobile en déplacement de maintenir la communication en cours (*hand over* ou *handoff*) ;
- la confidentialité des communications.

### Structure générale d'un système de radiotéléphonie

La figure 15.36 décrit les différents composants d'un réseau de radiocommunication cellulaire de type **GSM** (*Global System for Mobile*, initialement Groupe Spécial Mobile).

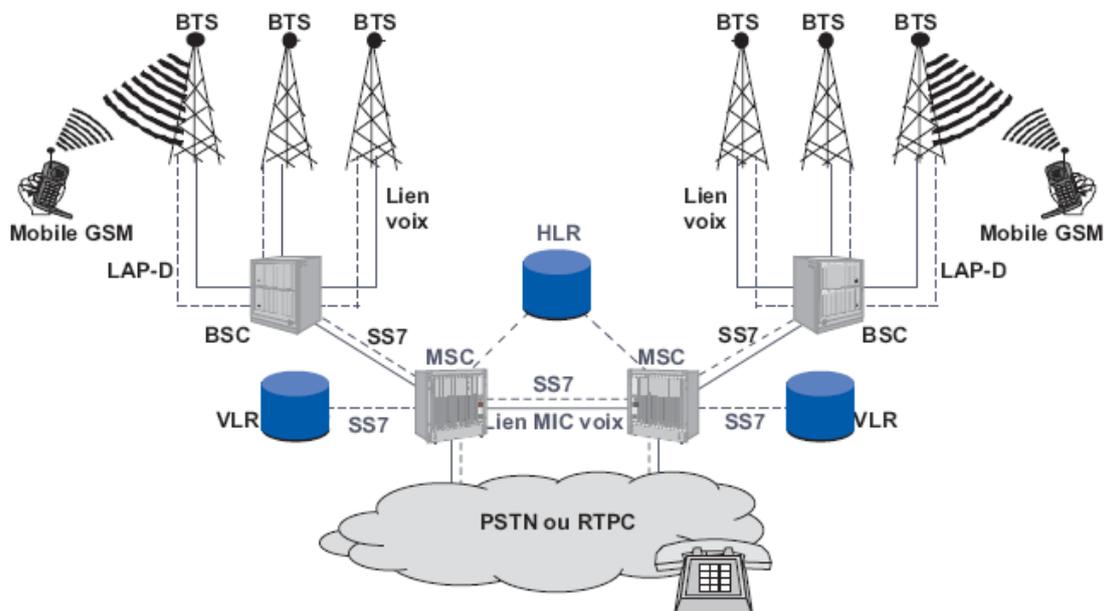


Figure V.18 - Principe d'un réseau GSM.

Un réseau de téléphonie mobile de type GSM comprend :

- des stations mobiles (**MS**, *Mobile Station* ou **mobile GSM**), celles-ci doivent être identifiées et localisées par le système pour pouvoir établir une communication (appel sortant) et être alertées (appel entrant) ;
- un sous-système radio (**BSS**, *Base Station Subsystem*) comportant un ensemble de bases radios (**BTS**, *Base Transceiver Station*) ou interfaces air qui gèrent le trafic radio avec le mobile. La zone couverte par une base radio (BTS) constitue une cellule. Une station de contrôle gère un ensemble de BTS (**BSC**, *Base Station Controller*) ;
- un sous-système réseau (**NSS**, *Network SubSystem*) comprenant les commutateurs de cœur de réseau (**MSC**, *Mobile services Switching Center*) associés à une base de données locale (**VLR**, *Visitor Location Register*) et une base de données centrale ou registre des abonnés nominaux (**HLR**, *Home Location Register*).

*Principe général de fonctionnement*

Chaque BTS diffuse en permanence sur un canal de signalisation (**BCCH**, *Broadcast Control CHannel*) des informations générales sur le type de réseau auquel la cellule est rattachée.

Lorsqu'un mobile est mis sous tension, il recherche (*scanning*) un canal BCCH. Le mobile sélectionne alors la BTS (cellule) dont le niveau de réception est le plus élevé en acquittant le signal de BCCH sur le canal d'accès aléatoire de la cellule (**RACH**, *Random Access CHannel*) et s'y inscrit. Le réseau lui attribue alors un canal de signalisation (**SACCH**, *Slow Associated Control CHannel*). Les données utilisateurs de la HLR (base de données centrale) sont recopiées dans la VLR (base de données locale des visiteurs de la cellule). À la demande de la BSC, la HLR enregistre la localisation du mobile pour être en mesure d'y acheminer les appels entrants. En principe, la base HLR est unique par réseau (**PLMN**, *Public Land Mobile Network*).

### V.7.2 – Gestion de l'abonné et du terminal

On distingue plusieurs types de terminaux selon leur taille (terminaux portables et portatifs), leur bande de fréquences (GSM 900 MHz, DCS 1 800 MHz et les terminaux bi-bandes). L'utilisation de systèmes portables miniaturisés, facilement « empruntables » et d'une interface air a nécessité l'introduction de mécanismes d'identification garantissant une certaine sécurité et préservant l'anonymat des communications. C'est ainsi, que les identifications de l'abonné et du terminal ont été dissociées.

L'abonné est identifié par un module spécifique dans lequel sont inscrites toutes les données propres à l'utilisateur (carte **SIM**, *Subscriber Identity Module*). Cette carte, délivrée par l'opérateur, mémorise un nombre important d'informations :

- des données propres à l'opérateur (réseau...);
- des données propres à l'utilisateur (identification, services optionnels, annuaire...);
- des données propres à l'usage du terminal (dernière zone de localisation, listes des réseaux utilisés...);
- les informations de sécurité (mots de passe utilisateur, compteurs d'erreur, clé de déblocage, clé d'authentification, clé de cryptage propre au terminal...);
- les mini-messages reçus (**SMS**, *Short Message Service*)...

L'utilisation du portable est protégée par un mot de passe utilisateur demandé à l'initialisation du système (CHV1, *Card Holder Verification* ou code **PIN**, *Personal Identity Number*), certaines fonctions ne sont accessibles qu'après l'introduction d'un mot de passe de second niveau (CHV2 ou PIN2).

La carte SIM permet de dissocier les données utilisateurs de celles du terminal et permettre à l'opérateur de bloquer l'un indépendamment de l'autre. Le terminal est identifié par l'**IMEI** (*International Mobile Equipment Identity*). À chaque utilisateur est associé un numéro d'appel international (**MSISDN**, *Mobile Station ISDN*) par lequel l'abonné peut être appelé et un identifiant utilisé par le réseau pour le localiser (**IMSI**, *International Mobile Subscriber Identity*).

Lorsqu'un utilisateur est présent dans une zone, pour ne pas transporter dans le réseau son identifiant personnel (confidentialité), un identifiant temporaire lui est attribué (**TMSI**, *Temporarily Mobile Station Identity*). La *Figure V.19* illustre l'utilisation de ces identifiants lors d'un appel entrant depuis le réseau public commuté (RTC).

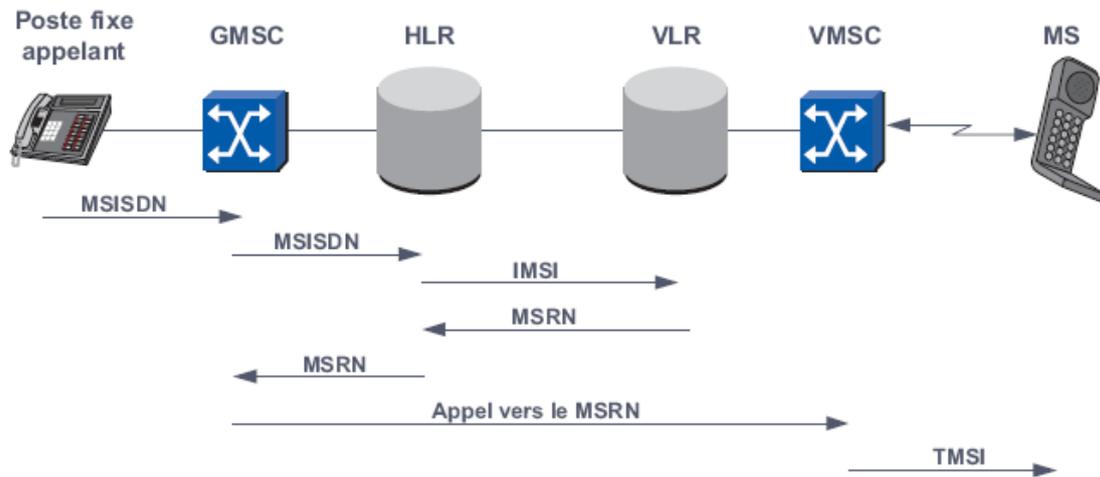


Figure V.19 – Echange des différents identifiants.

Le poste appelant numérote le MSISDN (06 xx xx xx xx), cet appel est acheminé par le réseau téléphonique fixe vers le commutateur du réseau de mobile le plus proche (MSC) qui fera office de passerelle entre les deux réseaux (**GMSC**, *Gateway MSC*). Le GMSC interroge le HLR pour connaître la localisation de l'appelé. Le HLR substitue au MSISDN le IMSI (N° attribué pour localiser l'appelé) et interroge la base VLR qui lui attribue alors un **MSRN** (*Mobile Station Roaming Number*), Numéro permettant le routage des appels, ce numéro est composé du code pays du VLR, de l'identifiant du VLR et du N° d'abonné). Le GMSC établit alors l'appel vers le **VMSC** (*Visited MSC*). Enfin, le VMSC établit l'appel vers le mobile en utilisant l'identité temporaire (TMSI).

L'affectation des canaux de communication est dynamique. Elle suit les procédures décrites ci-après. Lors d'un appel entrant, la base radio diffuse sur un canal d'appel (*paging*) l'identification de la station appelée. Le mobile qui reconnaît son identification accuse réception du message sur le canal de retour d'appel. La base radio affecte alors au mobile un canal de trafic (fréquence et IT). Lors d'un appel sortant, le canal de trafic n'est attribué par la base radio qu'après que l'appelant ait décroché. Cette technique dite du rappel du demandeur évite d'affecter des ressources à un appel non abouti.

### V.7.3 – L'interface radio

#### *Organisation cellulaire du réseau*

On appelle cellule, la zone géographique couverte par un émetteur (*Figure V.20*). La taille des cellules doit tenir compte de nombreux facteurs, notamment :

- des conditions de propagation. Les systèmes de téléphonie mobile utilisent des fréquences de l'ordre du GHz, la propagation de telles fréquences se fait uniquement par onde directe.

Les obstacles créent des zones d'ombre ;

- de la limitation de la puissance d'émission du mobile. Un des éléments essentiels de la téléphonie mobile est le poids du terminal, ce facteur impose des batteries de faible capacité et donc, afin de disposer d'une autonomie suffisante, une puissance d'émission limitée ;

- du nombre potentiel de stations à accueillir vis-à-vis de la capacité d'accueil de la base radio. La bande de fréquence utilisée par les bases radio limite le nombre de canaux gérés par la station. Dans les zones à fort potentiel d'utilisateurs il sera nécessaire de réduire la taille des cellules pour accueillir convenablement tous les mobiles de la zone. De ce fait, les cellules seront plus petites en zone urbaine qu'en zone rurale ;

- de la vitesse de déplacement du mobile. La gestion du *hand over* est délicate, plus les zones sont petites vis-à-vis de la vitesse de déplacement du mobile plus le changement de cellules sera fréquent.

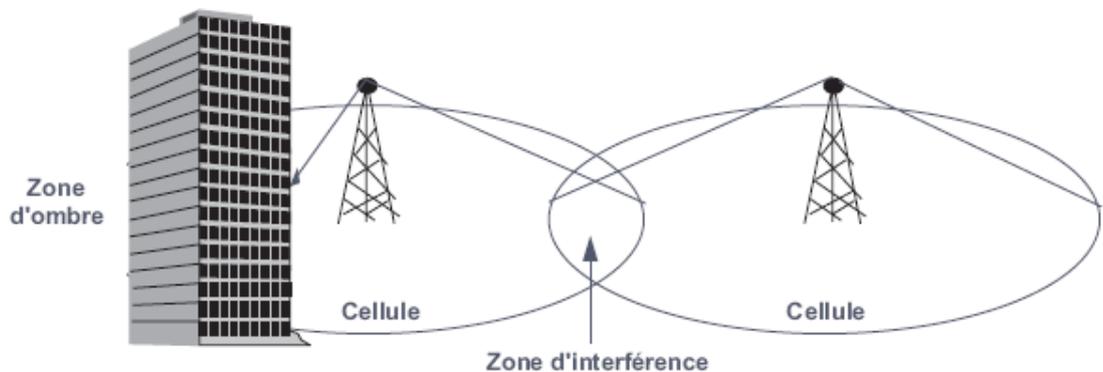


Figure V.20 – Couverture d'une liaison radio.

La limitation du spectre radio et les capacités d'un émetteur à gérer un nombre élevé de canaux radio conduisent à étudier la réutilisabilité des fréquences (bandes allouées). Les schémas de réutilisation des fréquences doivent tenir compte à la fois des puissances d'émission et des interférences (deux zones utilisant les mêmes fréquences ne doivent pas se perturber). Différents schémas de réutilisation sont utilisés, la Figure V.21 illustre un système à 9 fréquences (facteur de réutilisation 1/9). Les installations sans fil (*cordless*) privées (résidentielles ou derrière un petit PABX) peuvent être mono-cellulaire.



Figure V.21 – Organisation des cellules utilisant 9 jeux de fréquence de base.

#### Gestion de la mobilité

La localisation (itinérance ou roaming) permet au réseau de transmettre un appel (appel entrant) alors que l'appelant n'a aucune connaissance de la position géographique de l'appelé.

Le principe en est simple, lors de la mise sous tension le mobile s'identifie. Le MSC, centre de gestion local, de la cellule d'accueil interroge alors la base de données centrale (HLR) pour obtenir les informations relatives au visiteur et les inscrit dans la base de données locale (VLR). Le MSC attribue alors un identifiant temporaire au visiteur et informe la HLR de la position de celui-ci.

En permanence la base radio (BTS) analyse la qualité du signal reçu (canal de trafic ou voie de signalisation). En fonction de la qualité du signal, la station décide de maintenir le lien ou d'effectuer le transfert vers une cellule voisine. Le centre de gestion local demande alors aux cellules voisines d'effectuer une mesure de champ sur le canal

d'émission du mobile. En fonction des résultats obtenus le centre de gestion détermine la cellule qui doit accueillir le mobile et donne l'ordre de transfert.

Le transfert intercellulaire est effectué sans interruption perceptible de la communication.

Cependant, le temps de basculement n'est pas nul et reste un handicap au transfert de données.

Le transfert de données à partir d'une station mobile n'est fiable que lorsque le mobile est fixe !

De même, l'analyse de la puissance reçue par la BTS, du rapport signal à bruit et du taux d'erreur peut conduire la BTS à demander au mobile une éventuelle réduction de puissance d'émission afin d'une part de ne pas perturber les cellules voisines et, d'autre part d'économiser ses batteries.