



Télécommunications et Applications

Département de Génie Electrique
Niveau : 2^{ème} LMD Télécommunications



Université de Tébessa

Dr. HOUAM Lotfi



Télécommunications & Applications



Introduction à la Téléphonie

Sommaire :

- I. Principe de base de la téléphonie
- II. Introduction au réseau de téléphonie commuté (RTC)

I. Principe de base de la téléphonie

- Le transport de la voix est historiquement à l'origine des premiers réseaux de transmission
- La téléphonie a été initialement prévue pour transmettre la voix humaine entre deux lieux distants l'un de l'autre
- Elle utilise comme support des lignes électriques sur lesquelles transite un courant analogue aux signaux sonores

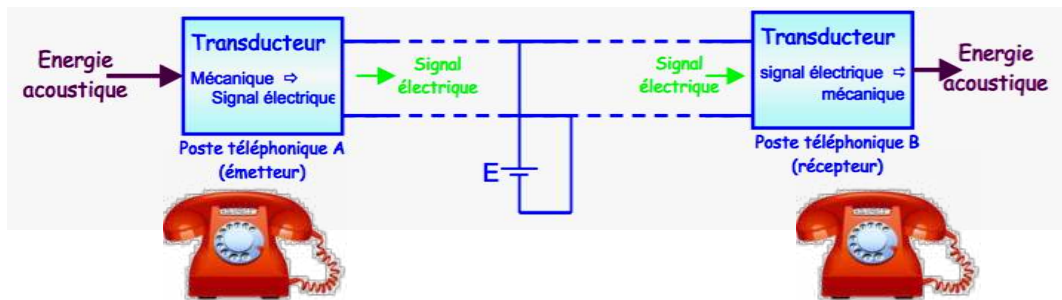


I. Principe de base de la téléphonie

- Du premier système primaire qu'il était, le téléphone a évolué et la téléphonie est devenue une science en soi
- Elle fait appel à des techniques de traitement du signal analogique et numérique
- De plus, la possibilité de commuter intelligemment et économiquement les lignes d'abonnés est un art, car il s'agit de bien dimensionner les commutateurs pour que tout abonné puisse être rejoint facilement, presque en tout temps et avec un minimum de délai

I. Principe de base de la téléphonie

- Une liaison téléphonique élémentaire est constituée par :
 - Deux dispositifs émetteur-récepteur appelés postes téléphoniques,
 - Une ligne bifilaire acheminant les signaux (paire torsadée),
 - Une source d'énergie électrique (E). Cette tension continue nécessaire à l'alimentation des postes téléphoniques est fournie par une source installée au central téléphonique (batterie centrale)



II. Introduction au réseau de téléphonie commuté (RTC)

Définition générale

- Un réseau téléphonique est constitué de l'ensemble des organes nécessaires pour mettre en communication deux installations téléphoniques d'abonnés en utilisant les renseignements fournis par l'abonné demandeur (numérotation), maintenir celle-ci pendant toute la durée de conversation avec une qualité d'écoute satisfaisante, tout en supervisant cette communication pour détecter toute coupure ou raccrochage afin de libérer les organes qui ont servi à la réalisation de la liaison et en fin, de faire une taxation

II. Introduction au réseau de téléphonie commuté (RTC)

Définition générale

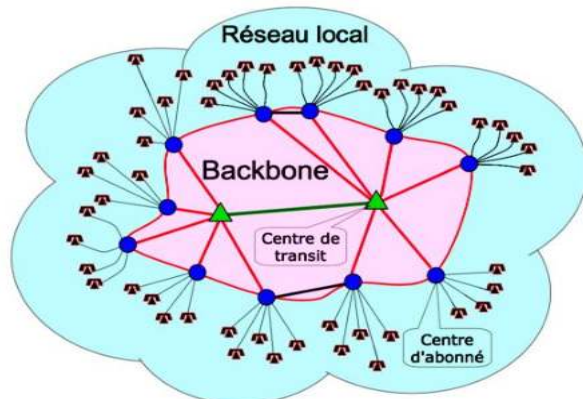
- Le RTCP (Réseau Téléphonique Commuté Public) ou **PSTN** (**P**ublic **S**witched **t**elephone **N**etwork) ou couramment appelé RTC constitue un des plus grands réseaux au monde avec plusieurs centaines de millions d'abonnés
- Essentiellement analogique au départ, le réseau s'est progressivement numérisé mis à part la ligne d'abonné qui reste encore analogique. Pour les abonnés du RNIS, la ligne d'abonné a été aussi numérisée

II. Introduction au réseau de téléphonie commuté (RTC)

Organisation du réseau téléphonique

- On peut considérer que le RTC est constitué d'un **réseau local** (boucle locale) et d'un **réseau dorsal** (**backbone**)

Structure du RTC



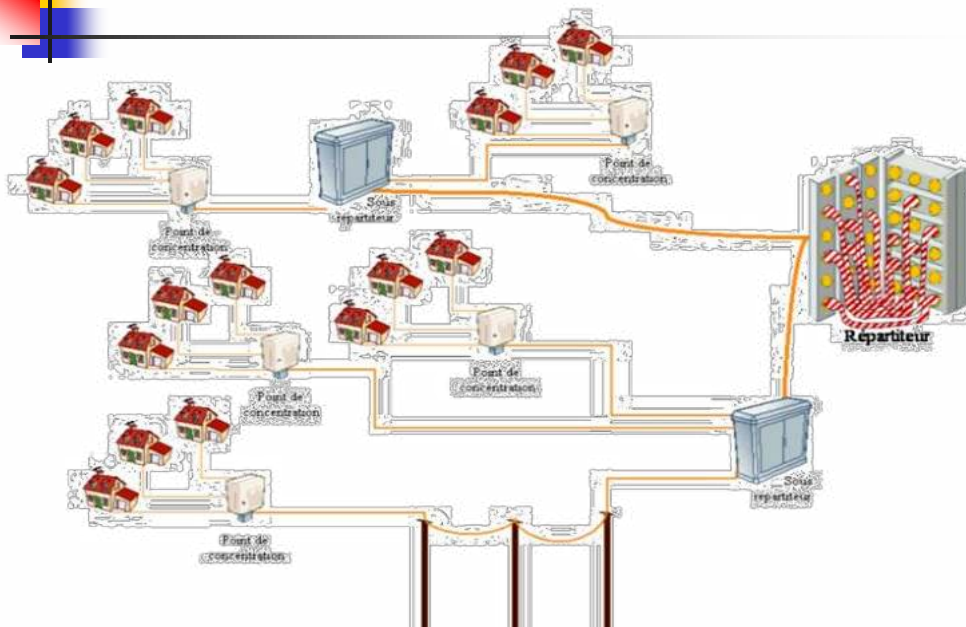
II. Introduction au réseau de téléphonie commuté (RTC)

Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

- Le **réseau local** ou réseau périphérique est constitué essentiellement des **lignes d'abonnés** qui sont constituées de paire de cuivre de diamètre 0.4 à 0.6 mm
- La **ligne téléphonique** aussi appelée **boucle locale** relie le poste téléphonique de l'abonné au commutateur d'entrée dans le réseau Backbone de l'opérateur
- Ce commutateur est appelé **commutateur de rattachement** ou **commutateur d'abonné**. Il se situe dans un bâtiment appelé central ou centre téléphonique (le terme centre sera souvent confondu avec le terme commutateur)

Boucle locale



II. Introduction au réseau de téléphonie commuté (RTC)

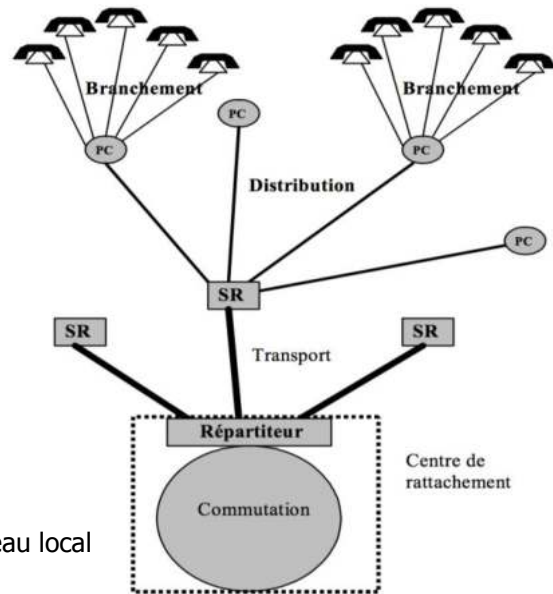
Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

■ Pour faciliter le déploiement et l'exploitation du réseau périphérique, celui-ci est organisé comme indiqué sur la Figure ci-contre :

- PC : point de concentration
- SR : sous répartiteur

Structure du réseau local

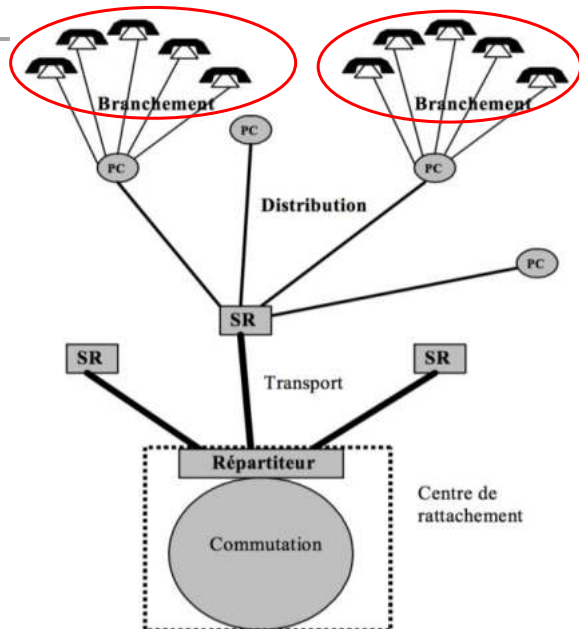


Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

On distingue :

1) Les postes téléphoniques

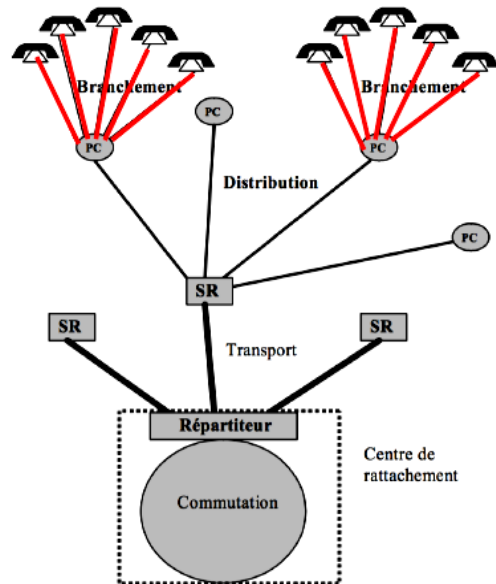


Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

2) Les câbles de branchement :

Ce sont des lignes bifilaires individuelles



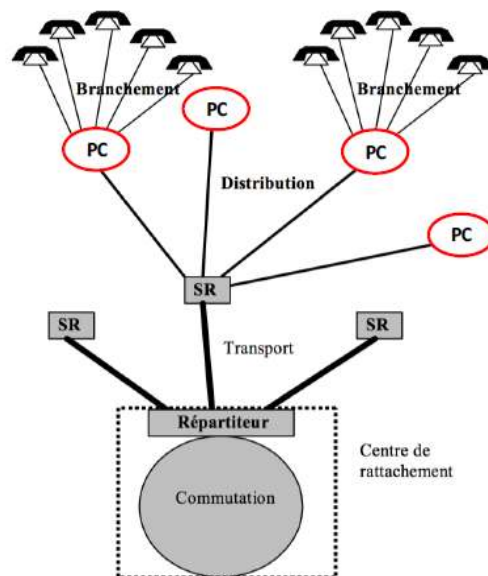
Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

3) Les points de concentration PC :

Ce sont des petites boîtes placées sur des poteaux ou dans des endroits réservés au sein des immeubles desservis

Les paires téléphoniques arrivent au P sur des **réglottes**, des connexions amovibles les relient à d'autres réglottes sur lesquelles sont branchés les câbles de distribution



Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

3) Les points de concentration PC :

Le point de concentration PC, n'est rien d'autre qu'un mini répartiteur de petite capacité d'une à quelques dizaines de paires

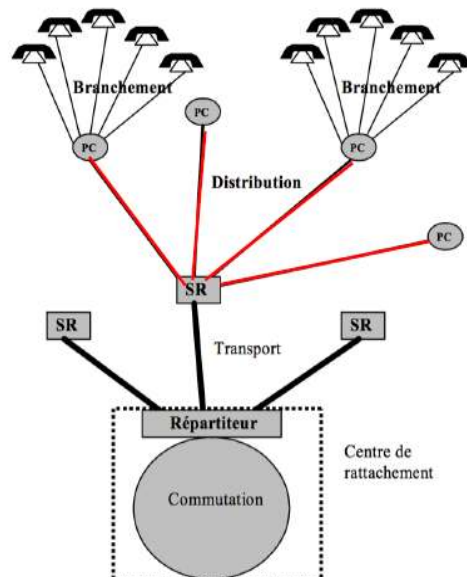


Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

4) Les câbles de distribution :

relient les points de concentration au sous répartiteurs. Ces câbles peuvent être soit aériens, soit posé en plein terre (moins onéreux mais vulnérables) soit en canalisations souterraines



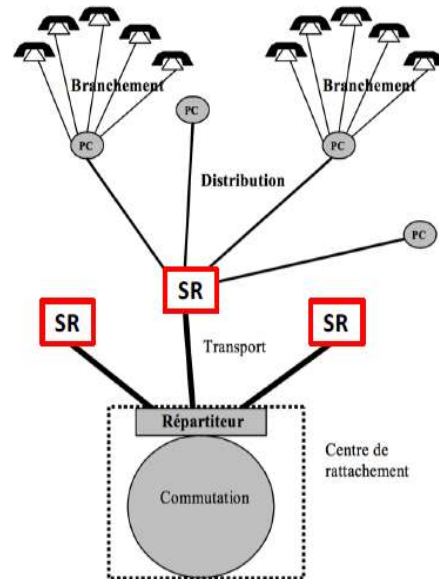
Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

5) Les sous répartiteurs SR :

Ce sont des armoires placées sur les trottoirs, appelés aussi **nœuds de raccordement abonné**.

Ils permettent de la même façon qu'un Point de Concentration de regrouper les câbles de distribution vers les câbles de transport qui sont plus volumineux. Un SR peut connecter jusqu'à **1500** paires



Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

Sous répartiteur SR



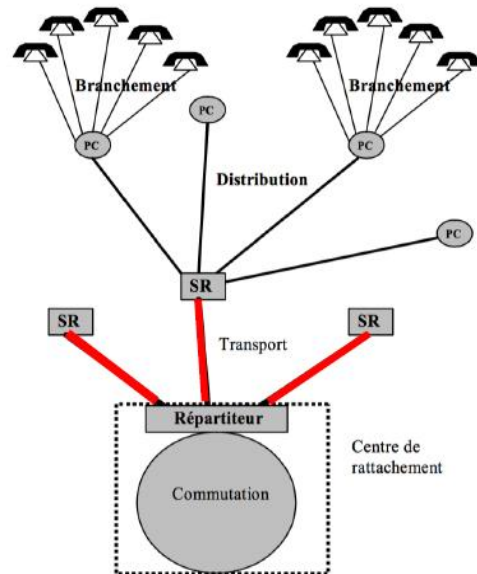
Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

6) Les câbles de transport :

Sont similaires aux câbles de distribution avec des capacités plus élevées, de 112 à 2688 paires

Ces câbles sont posés dans des conduites souterraines

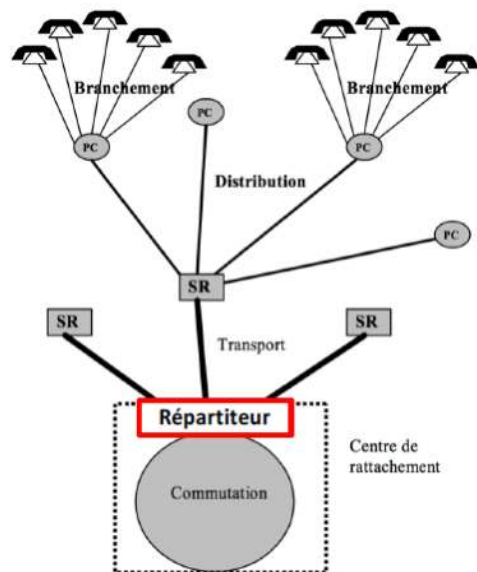


Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

7) Le répartiteur général :

Constitue le point d'accès des lignes à l'autocommutateur



Organisation du réseau téléphonique

a). Le réseau local

Répartiteurs généraux



Organisation du réseau téléphonique

b). Le réseau dorsal

- Il est constitué des **commutateurs** et des **systèmes de transmission**
- Le réseau a une structure **étoilée/maillée**, mais avec l'arrivée de la hiérarchie **SDH¹**, le réseau a tendance à migrer vers une structure en anneau

¹**SDH** : La Hiérarchie Numérique Synchronne (en anglais Synchronous Digital Hierarchy)



Organisation du réseau téléphonique

b). Le réseau dorsal

1) **Les commutateurs (centres)** : sont fonctionnellement de deux types :

- A. Les centres d'abonnés
- B. Les centres de transit.

¹**SDH** : La Hiérarchie Numérique Synchrones (en anglais Synchronous Digital Hierarchy)



Organisation du réseau téléphonique

b). Le réseau dorsal

1) **Les commutateurs**

A. **Les centres d'abonnés :**

Ce sont les centres qui permettent le rattachement des abonnés. Ils sont différenciés en deux types :

- **Les Centres à Autonomie d'Acheminement CAA** : qui sont capables d'analyser les numéros qu'ils reçoivent et les traduire en un itinéraire parmi ceux possibles pour acheminer la communication vers l'abonné demandé
- **Les Centres Locaux CL** : qui ne sont pas capables d'analyser la numérotation ou ils sont seulement capables d'analyser les numéros des abonnés qu'ils desservent, les autres sont tous acheminés vers une seule direction. Ils n'ont aucune intelligence et leur rôle se limite à la **concentration**, on les appelle aussi **Centres Auxiliaires**

Organisation du réseau téléphonique

b). Le réseau dorsal

commutation manuelle

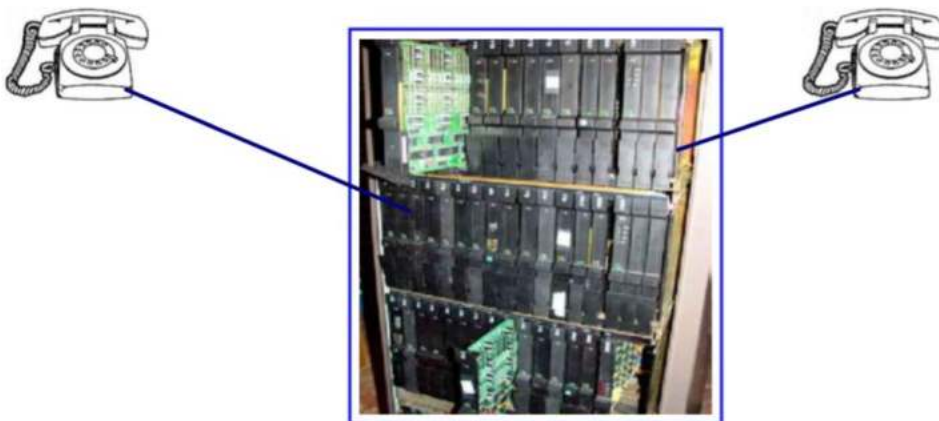
Avant le CAA



Organisation du réseau téléphonique

b). Le réseau dorsal

Commutateur à **A**utonomie d'**A**cheminement (CAA)
ou commutateur local





Organisation du réseau téléphonique

b). Le réseau dorsal

1) Les commutateurs

B. Les centres de transit :

- Ils permettent de connecter les commutateurs qui n'ont pas de liaison entre eux. Ceci permet d'avoir un réseau étoilé plus facile à gérer et moins onéreux
- Les centres de transit sont aussi différenciés en deux types, **les centres de transit secondaires (CTS)** et **les centres de transit principaux (CTP)**
- Les centres de transit qui permettent de connecter les réseaux de deux pays sont appelé **centres de transit internationaux**

Remarque : un centre peut assurer simultanément la fonction de rattachement d'abonnés et de transit



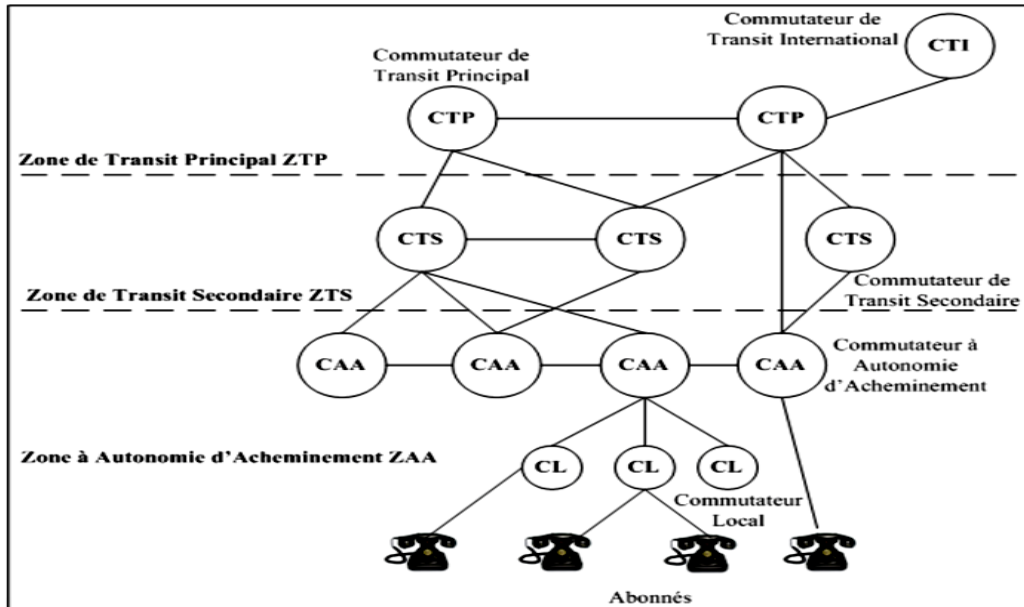
Organisation du réseau téléphonique

b). Le réseau dorsal

Le réseau dorsal est découpé **en zones**; on distingue :

- **Zone locale (ZL)**, c'est la zone desservie par un CL
- **Zone à autonomie d'acheminement (ZAA)**, c'est la zone desservie par un CAA. Une ZAA qui englobe plusieurs CAA est dite zone à autonomie d'acheminement multiple **ZAAM**
- **Zone de transit secondaire ZTS**, c'est la zone desservie par un centre de transit secondaire (CTS)
- **Zone de transit principale ZTP**, c'est la zone desservie par un centre de transit principal (CTP)

Schéma simplifié d'un tronçon du réseau RTC



Organes constitutifs d'un poste téléphonique simple

1). Les organes de conversation

Ils assurent l'échange conversationnel entre les 2 correspondants, et constitué des éléments :



- **Le microphone** : c'est un convertisseur d'énergie, les ondes sonores entraînent la vibration d'une membrane sensible qui provoque la création d'un signal électrique variant au même rythme que la voix
- **L'écouteur** : il restitue sous forme acoustique l'énergie électrique reçue, en la transformant en énergie mécanique imposant un mouvement vibratoire à l'air ambiant
- **Le combiné** : c'est le support ergonomique sur lequel sont montés le microphone et l'écouteur récepteur



Organes constitutifs d'un poste téléphonique simple

1). Les organes de conversation

- **Bobine d'induction** (ou transformateur) et **Condensateur** assurent :
 - Adaptation d'impédance entre le microphone et la ligne, et entre la ligne et l'écouteur
 - Elimination de l'effet local (antilocal), évite d'entendre sur l'écouteur les sons émis sur le microphone du même combiné
 - Séparation des courants de natures différentes
- **Deux diodes** : montées en antiparallèle sur le récepteur, elles absorbent les surtensions et réduisent le choc acoustique à un niveau supportable par l'oreille
- **Un redresseur** : rend l'appareil indépendant de la polarité de la ligne



Organes constitutifs d'un poste téléphonique simple

2). Les organes d'appel, d'émission

- L'abonné fait connaître à son centre de rattachement le numéro d'identification du correspondant désiré en le composant soit sur le cadran d'appel rotatif (ancien), soit sur le clavier numérique (actuel). Ce dispositif transmet alors au central un signal codé.

3). Les organes de réception d'appel

- La signalisation d'un appel est faite par une sonnerie mise en marche par un courant alternatif (au travers d'un filtre)
- Lors du décrochage du combiné, le centre de rattachement constate la fermeture du crochet, interrompt le signal d'appel et établit la liaison



Mise en relation et identification du destinataire

- Avant de commencer la communication, la mise en relation, fait intervenir un canal spécial appelé "**canal sémaphore**", qui gère, en outre la numérotation, et l'envoi d'une sonnerie au destinataire
- L'échange d'informations nécessaire à la mise en relation est appelé : "**signalisation**"



Mise en relation et identification du destinataire

Numérotation :

Le numéro d'abonné correspond à l'identification du point d'accès au réseau (prise terminale). L'adresse est du type hiérarchique, la structure en est donnée par la figure ci-dessous :

Préfixe international	Indicatif Pays	Numéro national demandé		
Pour sortir du réseau National: 00	Par exemple Algérie = 213	Exploitant Zone: 26	Numéro du commutateur de rattachement	Numéro de la ligne d'abonné

Les différents éléments qui la constituent sont :

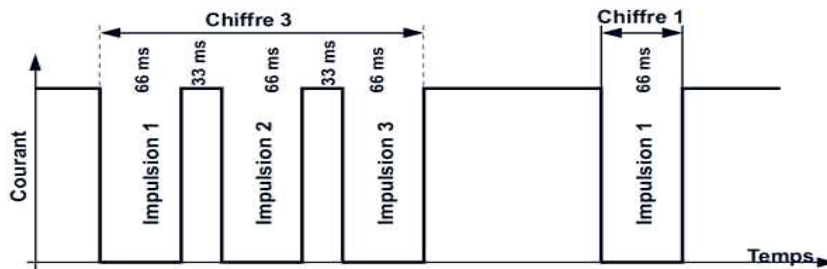
- La zone d'appel (Z), L'Algérie est divisée en 20 zones,
- Le commutateur de rattachement,
- Enfin, les 4 derniers chiffres qui désignent l'abonné local.

Mise en relation et identification du destinataire

Numérotation :

Il existe trois types de numérotation :

- a) La numérotation décimale ou analogique
 - b) La numérotation fréquentielle
 - c) La numérotation numérique
- a) **Numérotation décimale ou analogique** : c'est la plus ancienne, on l'appelle aussi 33/66 ou 10 Hz. Les numéros sont envoyés au commutateur de rattachement sous forme d'impulsions de 66 ms suivi d'un repos de 33 ms, d'où le nom de système 33/66. Le 1 correspond à une rupture, le 2 à deux... Etc le 0 à dix ruptures comme le montre la figure suivante (numérotation décimale de 31) :



Mise en relation et identification du destinataire

Numérotation :

b) **Numérotation fréquentielle** : Dans la numérotation fréquentielle ou vocale (multi-fréquentielle), normalisée par le CCITT (Comité Consultatif International Télégraphie et Téléphonie), l'enfoncement d'une touche génère deux signaux de fréquences différentes (une fréquence haute suivie d'une fréquence basse, transmis au central de rattachement

Chaque combinaison de fréquences a été déterminée pour minimiser le risque qu'une combinaison de voix lui ressemble

Les postes comportent 12 ou 16 touches, les touches A, B, C, et D peuvent être affectées à des fonctions particulières comme le montre la figure suivante :

		Fréquences hautes			
		1209	1335	1477	1633
Fréquences basses	697	1	2	3	A
	770	4	5	6	B
	852	7	8	9	C
	941	*	0	#	D

NB : Certains postes téléphoniques fréquents ont la possibilité d'émettre une numérotation décimale

Clavier des postes à fréquences vocales

Mise en relation et identification du destinataire

Numérotation :

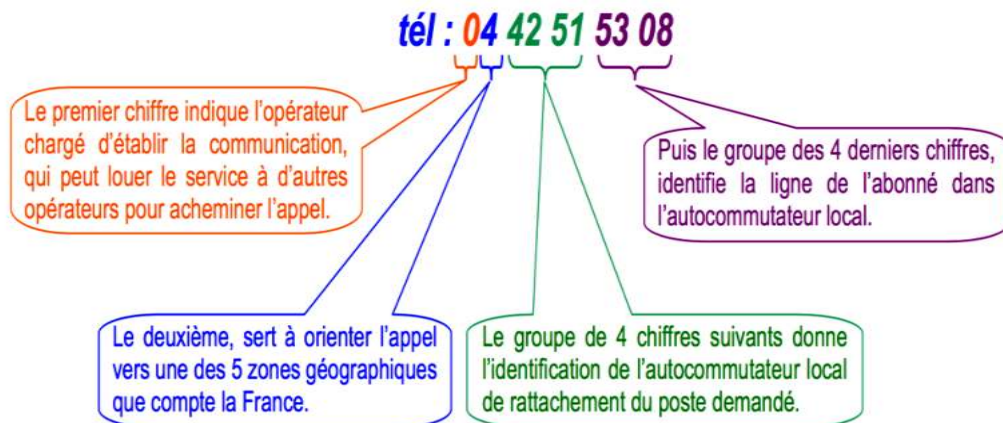
c) Numérotation numérique :

C'est la dernière génération de postes téléphoniques spécifiques dits postes numériques, la numérotation correspond à la transmission d'une valeur binaire sur une voie dite de signalisation

La numérotation peut être propriétaire (poste numérique propriétaire) ou normalisée (poste RNIS)

Mise en relation et identification du destinataire

Exemple de numérotation en France

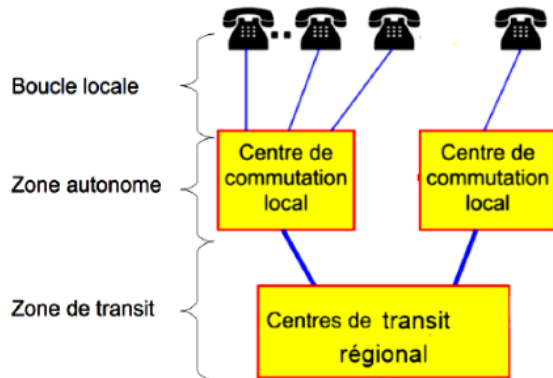




Mise en relation et identification du destinataire

Exemple : Communication locale en France :

02 38 95 01 23 vers 02 38 95 12 34




Seuls les 4 chiffres de droite sont nécessaires au CAA 38 95 pour mettre en relation les 2 postes



Télécommunications et Applications

Département de Génie Electrique
Niveau : 2^{ème} LMD Télécommunications

Université de Tébessa *Dr. HOUAM Lotfi*



Télécommunications & Applications

Objectifs de l'enseignement:

- Ce cours vise à brosser le tableau des principaux concepts et applications rencontrés en télécommunications.



Contenu de Module

- **Chapitre 1 : Introduction aux Applications des Télécommunications**, (Spectre électromagnétiques et télécommunications, Classification des systèmes des télécommunications, Le marché des télécommunications : état actuel et tendances futures.)
- **Chapitre 2 : Introduction à la téléphonie**, Principe de base de la téléphonie, Introduction au réseau de téléphonie commuté (RTC), Introduction au réseau de téléphonie Mobile (cellulaire).
- **Chapitre 3 : Introduction à la radiodiffusion et la télévision**, Radiodiffusion, Réseaux de télévision Terrestre et télévision câblée, La Télévision par satellite.
- **Chapitre 4 : Autres applications des télécommunications**, Principe du radar, Réseaux de communication sans fil, Réseaux informatiques.



Références bibliographiques

- [1]. D. Battu, Initiation aux Télécoms : Technologies et Applications, Dunod, Paris, 2002.
- [2]. P. Clerc, P. Xavier, Principes fondamentaux des Télécommunications, Ellipses, Paris, 1998.
- [3]. G. Barué, Télécommunications et Infrastructure, Ellipses, 2002.

Mode d'évaluation

Examen Final : 100%



Chapitre 1:

Introduction aux Applications des Télécommunications

Plan de cours

- La télécommunication
- Le spectre électromagnétique
- Classification des systèmes des télécommunications



1) La télécommunication : Définition

- Les télécommunications au sens large comprennent l'ensemble des moyens techniques nécessaires à l'acheminement aussi fidèle et fiable que possible d'informations entre deux points a priori quelconques, à une distance quelconque, avec des coûts raisonnables et à des instants quelconques.

1) La télécommunication : Historique

A. Le télégraphe électrique

- On peut estimer que l'histoire des télécommunications commence en **1832**, date à laquelle le physicien américain **Morse** (1791- 1872) eut l'idée d'un système de transmission codée (alphabet Morse) (exemple : **S O S** ... - - ...).
- En **1856**, la France adopta le système Morse. La première liaison transocéanique, réalisée en **1858**, ne fonctionna qu'un mois (défaut d'isolement du câble immergé).



1) La télécommunication : Historique

B. Le Téléphone

- En **1876**, l'Américain **Graham Bell** inventa le téléphone : enfin, la voix humaine pouvait être transportée au-delà de l'horizon sonore.
- De nombreuses améliorations du téléphone de Bell (comme l'invention du microphone à charbon par Hughes en **1878**) conduisirent au développement que l'on connaît.
- Paris fut la première ville à posséder un réseau de "téléphonie urbaine".



1) La télécommunication : Historique

C. La Radio

- Mais le fil de cuivre qui était à la base même de ces dispositifs de communication était très pénalisant : coûts de construction et de maintenance très importants, impossibilité de communiquer avec un bateau en mer...
- La découverte des ondes hertziennes allait ouvrir l'ère du "**sans fil**" et métamorphoser les lourds, fragiles et coûteux câbles de cuivre en liaisons invisibles que constituent les ondes **électromagnétiques**.



1) La télécommunication : Historique

- En **1899**, **MARCONI Guglielmo** (Italo-Irlandais) fut reconnu comme l'inventeur de la radio sans fil. Il permit à plusieurs stations d'émettre simultanément, et sans interférences, sur des longueurs d'ondes différentes
- En **1921**, des émissions expérimentales sont diffusées depuis la Tour **Eiffel** d'où sont transmis les premiers journaux parlés et émissions musicales en direct. Mais, c'est **Lee de Forest** qui avec l'invention de la triode en 1906 ouvrit véritablement la voie aux transmissions longues distances
- En **1927**, La première liaison téléphonique transocéanique par ondes hertziennes fut réalisée



1) La télécommunication : Historique

D. La Télévision

- C'est dans les années **1920** que les premiers prototypes de télévision apparaissent
- En **1929**, la **BBC** émet des émissions expérimentales malgré des images de mauvaise qualité
- En **1947**, 3 Américains inventent le **transistor**, qui peu à peu va détrôner les lampes, et faire accélérer les évolutions techniques



1) La télécommunication : Historique

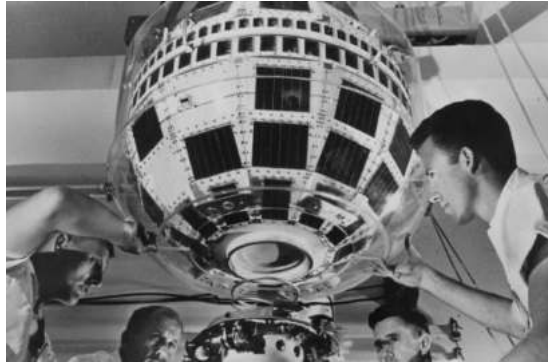
E. Les satellites

- Au début des années **1960**, les communications téléphoniques internationales restent très difficiles car les câbles sous-marins ont une capacité réduite
- De même la télévision ne permet pas encore de réaliser des "directs" sur de très longues distances
- Un projet est alors avancé : construire un satellite de télécommunications
- En **1961**, un accord a été signé entre la Grande Bretagne, la France et les Etats-Unis pour sa réalisation
- Ce satellite (**Telstar**) est construit par "**Bell Telephone Laboratories**" a été lancé de Cap Canaveral le **10 juillet 1962**

1) La télécommunication : Historique

E. Les satellites

- A l'occasion la France construit en Bretagne (Pleumeur-Bodou) une antenne réceptrice composée entre autres, d'une portion de sphère de **64** mètres de diamètre.
- Le **11 juillet 1962**, l'antenne capte dans d'excellentes conditions des images émises des Etats-Unis



1) La télécommunication : Historique

F. Internet

- En **1974**, les laboratoires Bell mettent au point un programme, qui permet d'échanger des données par **modem** via un réseau téléphonique
- Grâce à cette innovation, débute le premier véritable réseau planétaire, **UUNET**



- En **1994**, avec l'introduction de **Netscape**, doté d'une interface graphique spectaculaire, qui intègre les ressources multimédias, l'Internet connaît une explosion phénoménale
- L'expression "**Internet**" sert à désigner un ensemble de réseaux connectés entre eux

1) La télécommunication : Définition et Généralités

- Le terme fut inventé en **1904** par **Édouard Estaunié** et signifie « **communiquer à distance** »
- Le but des télécommunications est donc de transmettre un signal (à l'aide des moyens à base d'électronique et d'informatique), porteur d'une information (**voie, musique, images, données...etc.**), d'un lieu à un autre lieu situé à distance
- Les télécommunications recouvrent toutes les techniques de transfert d'information (filaires, radio, optiques, etc.) quelle qu'en soit la nature (symboles, écrits, images fixes ou animées, son, ou autres)

1) La télécommunication : Définition et Généralités

La chaîne de télécommunication est formée principalement d'un :

- 1. Canal** (ligne, câble coaxial, guide d'onde, fibre optique, lumière infra-rouge, canal hertzien, etc.)
- 2. Emetteur** (source), qui a comme fonction de fournir un signal (représentant le message) adapté au canal
- 3. Récepteur** (destinataire) dont la fonction est de reconstituer le message après observation du signal présent sur le canal

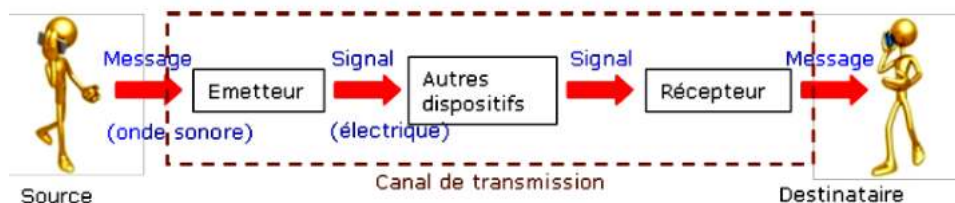


Schéma de base d'une chaîne de transmission

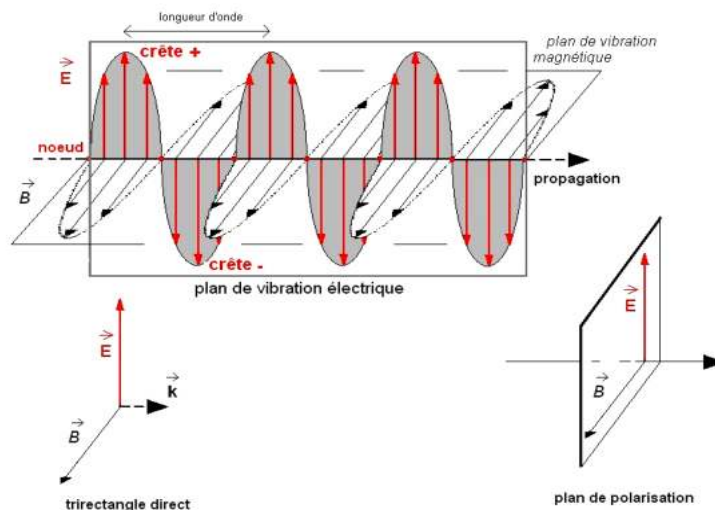
2) Le Spectre Electromagnétique

Ondes Electromagnétiques : OEM

- Les ondes électromagnétiques (OEM) se rattachent à des phénomènes électriques et magnétiques. Elles sont caractérisées par la présence de deux champs variables; l'un magnétique, l'autre électrique
- Maxwell étudia les rapports entre les deux champs, établissant des équations connues sous le nom d'équations de Maxwell
- La présence d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaire l'un à l'autre, et variant dans le temps, produit une onde électromagnétique se déplaçant à la vitesse de la lumière ($C=3.10^8$ m/s), dans une direction perpendiculaire à celle des lignes de champ électriques et magnétiques

2) Le Spectre Electromagnétique

Ondes Electromagnétiques : OEM



Approche simple pour rayonner de l'énergie électromagnétique

« Décharge oscillante »

C diminue encore ($L=Cste$)
Alors F augmente la capacité commence à rayonner E

C diminue $L=Cste$
Alors F augmente

Courant dans L charge C (Inter fermé) et C se décharge dans L (inter ouvert)

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

L diminue
 F augmente encore

fig 3

fig 4

Approche simple pour rayonner de l'énergie électromagnétique

$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{e}$

On diminue la surface des armatures de C à la section du brin (rayonnant)

Ce montage rayonne de l'énergie électromagnétique

L réduit à sa plus simple « expression » (simple conducteur)

6

Une onde électromagnétique (OEM) est constituée :

- d'un champ électrique \vec{E}
- d'un champ magnétique \vec{H}
- Qui se propagent dans une direction qui est celle \vec{S}
- du vecteur de Poynting

Ces trois grandeurs sont complexes (régimes sinusoïdaux).
 Dans le vide, ces deux champs sont orthogonaux et perpendiculaires à la direction de propagation (champs transverses)

Représentation en coordonnées sphériques

Télécommunications & Applications

2) Le Spectre Electromagnétique

Fréquence et Longueur d'onde : _____

On définit la longueur d'onde λ comme étant la période spatiale de l'OEM (Distance parcourue par l'onde pendant une période d'oscillation T)

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT$$

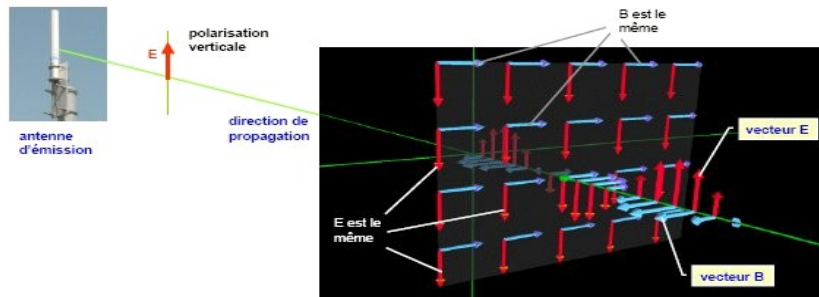
Vecteurs E et B le long d'un axe Ox

Polarisation d'une onde électromagnétique

La polarisation d'une onde Transverse Electromagnétique (TEM) est le type de trajectoire que décrit l'extrémité du champ électrique, \mathbf{E} , au cours du temps dans le plan transverse (plan perpendiculaire au vecteur de **Poynting**). Il existe trois types de polarisation:

✚ Polarisation Linéaire

Le champ \mathbf{E} n'a qu'une composante variant sinusoïdalement. Sa trajectoire est donc un segment de droite. La polarisation peut être dans ce cas **verticale** ou **horizontale**.



Polarisation d'une onde électromagnétique

✚ Polarisation circulaire

Le champ \mathbf{E} a deux composantes E_θ et E_ϕ de même amplitude et déphasées de 90° . \mathbf{E} décrit un cercle

✚ Polarisation elliptique

Le champ \mathbf{E} a deux composantes E_θ et E_ϕ d'amplitude et de phases quelconques



Classification des ondes électromagnétiques radio selon leur longueur d'onde

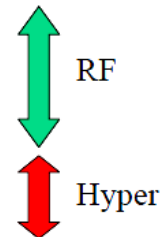
Dénomination	Fréquence longueur d'onde
Ondes Longues (GO)	30kHz à 300kHz λ de 10km à 1km
Ondes Moyennes (PO)	300kHz à 3MHz λ de 1km à 100m
Ondes Courtes	3MHz à 300MHz λ de 100m à 10m
Ondes Très Hautes Fréquences(VHF)	30MHz à 300MHz λ de 10m à 1m
Ondes Ultra Hautes Fréquences(UHF)	300MHz à 3GHz λ de 1m à 10cm
Ondes Supra Hautes fréquences(SHF)	3GHz à 30GHz λ de 10cm à 1cm
Ondes Extra Hautes Fréquences(EHF)	30GHz à 300GHz λ de 1cm à 1mm



Télécommunications & Applications

2) Le Spectre Electromagnétique

Fréquences	λ [m]	Dénomination
< 3 [kHz]	> 100 [km]	ELF
3 – 30 [kHz]	10 – 100 [km]	VLF
30 – 300 [kHz]	1 – 10 [km]	LF
300 – 3000 [kHz]	100 – 1000 [m]	MF
3 – 30 [MHz]	10 – 100 [m]	HF
30 – 300 [MHz]	1 – 10 [m]	VHF
300 – 3000 [MHz]	10 – 100 [cm]	UHF
3 – 30 [GHz]	1 – 10 [cm]	SHF
30 – 300 [GHz]	1 – 10 [mm]	EHF
300 – 3000 [GHz]	0,1 – 1 [mm]	
3 – 30 [THz]	10 – 100 [μm]	
30 – 430 [THz]	0,7 – 10 [μm]	
430 – 860 [THz]	0,35 – 0,7 [μm]	



Nomenclature de l'ITU-R

2) Le Spectre Electromagnétique

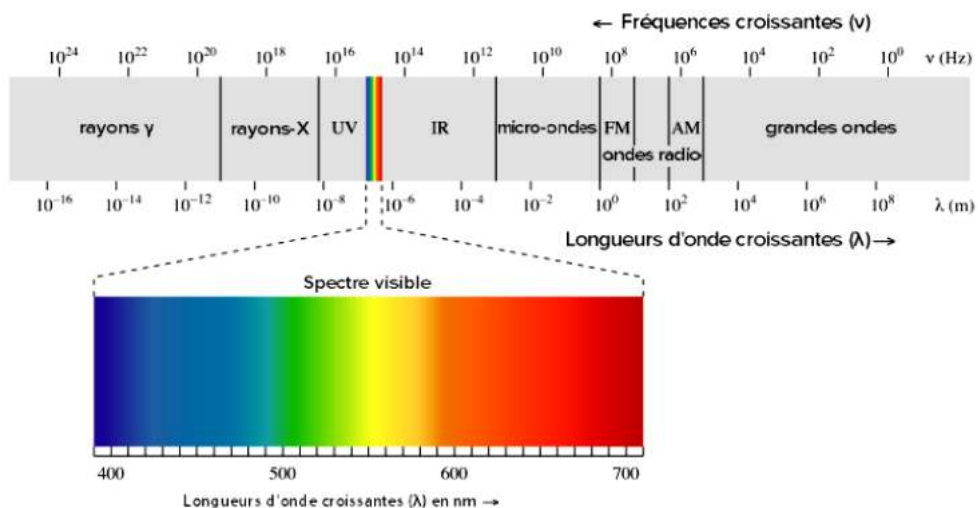
■ Le spectre électromagnétique est la décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses différentes composantes en termes de fréquence (ou période), d'énergie des photons ou encore de longueur d'onde associée, les quatre grandeurs ν (fréquence), p (période), E (énergie) et λ (longueur d'onde) étant liées deux à deux par :

La constante de Planck h (approx. $6,626069 \times 10^{-34}$ J·s $\approx 4,13567$ meV/Hz) et la vitesse de la lumière c (exactement 299 792 458 m/s)

selon les formules :

- $E = h \cdot \nu = h/p$ pour l'énergie transportée par le photon,
- $c = \lambda \cdot \nu = \lambda/p$ pour le déplacement dans le vide du photon,
- D'où aussi : $E = h \cdot c / \lambda$.

2) Le Spectre Electromagnétique



Le spectre électromagnétique

2) Le Spectre Electromagnétique

Utilisation du spectre

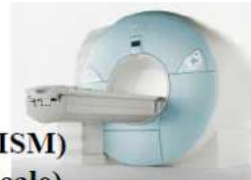
Applications rayonnantes

- Télécom (ex: téléphonie mobile, télévision, radio ...)
- Non télécom (ex: radar, GPS)



Applications non rayonnantes

- Industrielles, scientifiques, médicales (ISM)
(ex: four à micro-ondes, imagerie médicale)



2) Le Spectre Electromagnétique

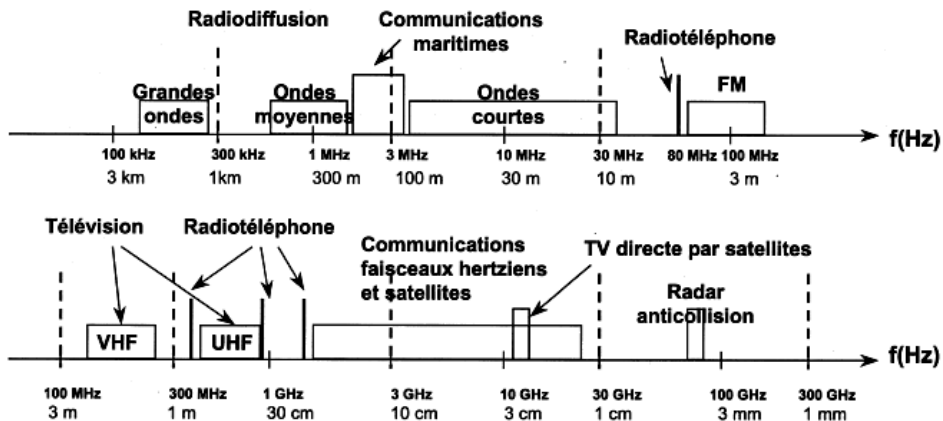
Principaux services utilisateurs du spectre radioélectrique

- Radiodiffusion et télévision
- Radiocommunications fixes et mobiles
- Météorologie (radars, satellites, diffusion des bulletins)
- Radioastronomie
- Applications militaires
- Surveillance aérienne et de l'environnement (Radar)
- Sécurité en mer et dans les airs
- Radiolocalisation (GPS, ...)
- Applications industrielles et médicales
- Applications civiles "sans fil" (Wifi, carte à puce,...)

Etc

2) Le Spectre Electromagnétique

Spectre radioélectrique



2) Le Spectre Electromagnétique

Gestion internationale du spectre

Les ondes électromagnétiques, dont le spectre utile s'étend de quelques kHz à plusieurs dizaines de GHz, se propagent dans l'espace sans tenir compte des frontières des états.

L'utilisation des fréquences doit donc faire l'objet d'une concertation internationale et doit être strictement réglementée.

L'Union Internationale des Télécommunications (ITU)



est une organisation internationale, basée à Genève, dont le rôle est de coordonner les réseaux et les services de télécommunication entre les gouvernements des états membres et les acteurs économiques du secteur.



2) Le Spectre Electromagnétique

Domaines du spectre électromagnétique

Nom	Longueur d'onde(m)	Fréquence(Hz)	Énergie du photon (eV)
Rayon gamma	< 10 pm	> 30 EHz	> 124 keV
Rayon X	10 pm – 10 nm	30 EHz – 30 PHz	124 keV – 124 eV
Ultraviolet	10 nm – 390 nm	30 PHz – 750 THz	124 eV – 3,2 eV
Visible	390 nm – 750 nm	770 THz – 400 THz	3,2 eV – 1,7 eV
Infrarouge	750 nm – 0,1 mm	400 THz – 3 THz	1,7 eV – 12,4 meV
Térahertz / submillimétrique	0,1 mm - 1 mm	3 THz - 300 GHz	12,4 meV - 1,24 meV
Micro-ondes	1 mm - 1 m	300 GHz - 300 MHz	1,24 meV - 1,24 µeV
Ondes radio	1 m – 100 000 km	300 MHz – 3 Hz	1,24 µeV – 12,4 feV



3) Classification des systèmes de télécommunications

- Lorsque l'on aborde le problème des télécommunications on est amené à faire usage de deux termes : **réseau et système**
- Le concept de système se rapporte essentiellement aux moyens de télécommunications mis en œuvre pour constituer des réseaux
- Les systèmes sont en quelque sorte **les supports des réseaux**
- On peut définir un système comme un ensemble cohérent de moyens mis en œuvre pour réaliser tout ou partie des fonctions des télécommunications
- Suivant cette terminologie on distingue, en général, dans le domaine des télécommunications, deux grands systèmes spécifiques :
 - **Les systèmes de transmission**
 - **Les systèmes de commutation**

3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

- Comprennent essentiellement les lignes de transmission proprement dites, c'est-à-dire les supports de transmission et les équipements de groupement des signaux à transmettre
- Ce groupement est appelé **multiplexage**. Il en existe trois types :
 - le multiplexage en fréquence (FDM),
 - le multiplexage en temps (TDM),
 - et le multiplexage en longueur d'onde (WDM, pour communications par fibre optique).

3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

- Ces lignes peuvent être de nature très diverse (câbles, liaisons hertziennes, liaisons par satellites)
- Actuellement, pour les liaisons entre stations fixes de télécommunications, on peut classer les supports de transmission en cinq grandes catégories techniques :
 - **Les câbles à paires symétriques (conducteurs),**
 - **les câbles coaxiaux (conducteurs),**
 - **les faisceaux hertziens (FH, l'air),**
 - **les satellites artificiels (l'air & espace),**
 - **et les fibres optiques (verre ou plastique).**

3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

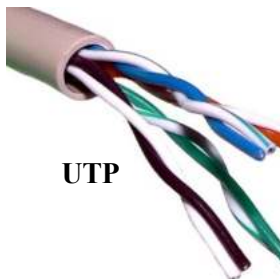
a. Les câbles à paires symétriques :

- Lignes bifilaires groupées à l'intérieur de câbles le plus souvent souterrains mais, parfois encore, aériens, dont la capacité varie en fonction du nombre d'abonnés à raccorder ou du trafic à écouler
- Ces types de câbles sont utilisés essentiellement dans les **réseaux locaux, soit pour le raccordement des abonnés à leur centre de rattachement**, soit pour des liaisons inter-centraux, urbaines ou rurales
- En général, les câbles à paires symétriques sont utilisés pour la transmission de signaux à faible ou moyenne largeur de bande (téléphone, télex, transmissions de données à moyen débit), mais on peut aussi les utiliser pour des transmissions de signaux à plus large bande (vidéo) sur de courtes distances



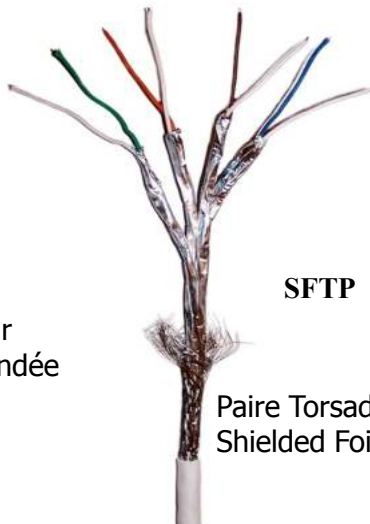
3) Classification des systèmes de télécommunications

a. Les câbles à paires symétriques :



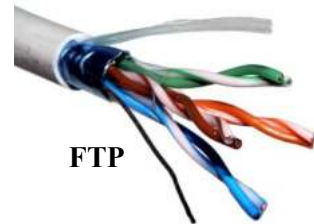
UTP

Unshielded Twisted Pair
Paire Torsadée Non Blindée



SFTP

Paire Torsadée Ecrantée et Blindée
Shielded Foiled Twisted Pair



FTP

Paire Torsadée Ecrantée
Foiled Twisted Pair

3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

b. Les câbles coaxiaux :



- Ils ont régné pendant longtemps sur le domaine des liaisons terrestres à grande distance et des liaisons intercontinentales par câbles sous-marins
- Ils sont utilisés aussi pour des « réseaux locaux à large bande », réseaux de télévision par câble, notamment, ou pour des liaisons interactives de vidéocommunication

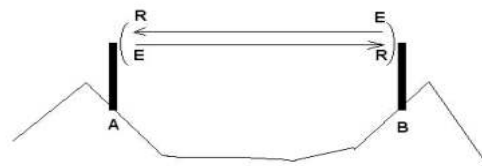
3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

c. Les faisceaux hertziens :

- Les FH désignent l'air ou le vide !!!, ils permettent la circulation d'ondes électromagnétiques ou radioélectriques diverses entre un émetteur et un récepteur



liaison point à point en visibilité
(ou "à vue")

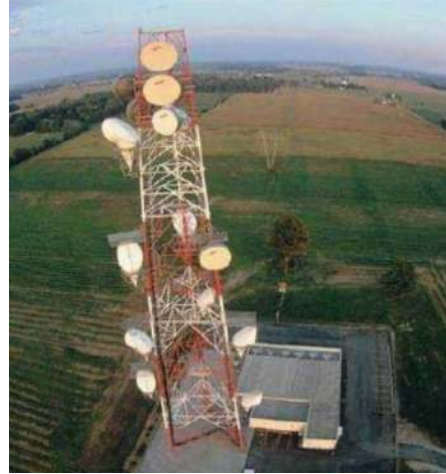
3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

c. Les faisceaux hertziens :

- Destiné à la mise en œuvre de réseau de télécommunication, le faisceau hertzien numérique est rapidement mis en service, offre de grandes capacités de débit, est évolutif en fonction des besoins de l'utilisateur
- Le faisceau hertzien est souvent complémentaire de réseau de fibre optique pour assurer la continuité de certains points de raccordement
- Les débits vont de **2 à 155 Mbit/s** sur des fréquences de **1,5 à 38 GHz**



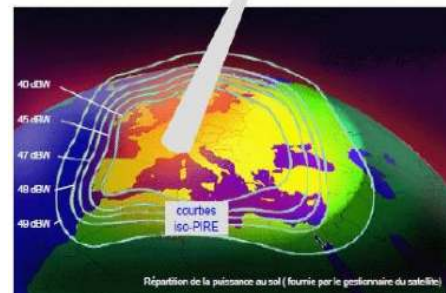
3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

d. Les satellites artificiels :

- L'ère des télécommunications par satellites artificiels a commencé en **1962** (première liaison transatlantique par satellite de télécommunication, le **11 juillet 1962**, entre **Andover**, aux États-Unis et **Pleumeur-Bodou**, en France)
- Les premiers satellites ont été d'abord des satellites à défilement (orbites basses et excentrées), Très rapidement on a été capable de lancer des satellites dits géostationnaires (orbite circulaire et rotation du satellite en synchronisme avec celle de la Terre)



3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

d. Les satellites artificiels :

- Les satellites artificiels ont révolutionné non seulement les télécommunications intercontinentales (possibilité de transmission simultanée de voies téléphoniques et de canaux de télévision) mais aussi, comme chacun sait, la météorologie, la navigation, la télédétection et la télésurveillance à objectifs civils ou militaires
- D'autre part, l'apparition des satellites de diffusion directe de télévision apporte encore une dimension supplémentaire aux satellites de télécommunications



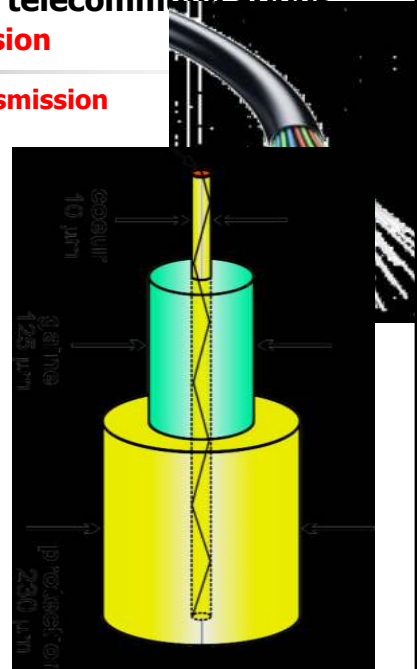
3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

e. Les fibres optiques :

- Une fibre optique est constituée :
 - a. d'un fil de verre très fin (quelques micromètres) à base de silice qui constitue le cœur dans lequel se propage la lumière,
 - b. d'une gaine en silice dopée et,
 - c. d'un revêtement de protection en polymère
- d. une impulsion lumineuse représente l'information binaire **1** tandis que l'absence de lumière représente l'information binaire **0**





3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

e. Les fibres optiques :

- Les avantages de la fibre optique sont nombreux :
 - Le diamètre extérieur est de l'ordre de **0,1 mm** et son poids de quelques grammes par kilomètre,
 - La largeur de bande passante utilisable est de **15 THz**, qui permet le multiplexage sur un même support de très nombreux canaux de télévision, ou de téléphone,
 - Une faible atténuation (**≈0,22 dB/km**) ce qui conduit à un espacement plus important des points d'amplification du signal transmis,
 - L'insensibilité des fibres aux parasites électromagnétiques ce qui constitue un avantage particulier pour la transmission de données
- L'inconvénient des fibres optiques tient :
 - aux coûts,
 - Flexibilité.



3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 1). Les Lignes (supports) de transmission

e. Les fibres optiques :

- Elles ont connu, en une décennie, un développement éclatant, aussi bien dans le domaine des liaisons intercontinentales par câbles sous-marins que pour les liaisons terrestres à grande distance,
- Elles remplacent progressivement les liaisons par câbles coaxiaux et par faisceaux hertziens
- **1977** : premières liaisons expérimentales,
- **1988** : mise en service du premier câble sous-marin en mois de décembre.

3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 2). Systèmes de multiplexage

On dispose globalement trois grands procédés de multiplexage :

- **Le multiplexage en fréquence (FDM),**
 - **Le multiplexage en temps (TDM),**
 - **et le multiplexage en longueur d'onde (WDM)**
- Lorsque la bande passante d'un support est nettement plus large que le spectre du signal à transmettre,
 - il est intéressant d'utiliser un même support pour transmettre parallèlement plusieurs signaux,
 - On parle de multiplexage. Le démultiplexage consiste à reconstituer les différents signaux à partir du signal multiplexé.

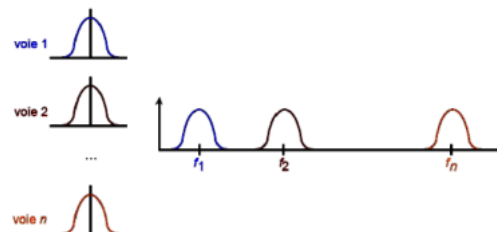
3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 2). Systèmes de multiplexage

a. Le multiplexage en fréquence

- Le multiplexage fréquentiel consiste à partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux ou sous-bandes plus étroites et à affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur
- **FDM (Frequency Division Multiplexing)**, est une technique de multiplexage par répartition de fréquence. Elle est utilisée pour augmenter les débits sur paires torsadées et plus particulièrement des lignes téléphoniques

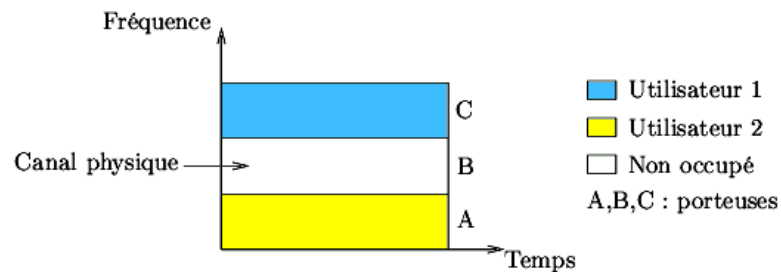


3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 2). Systèmes de multiplexage

a. Le multiplexage en fréquence



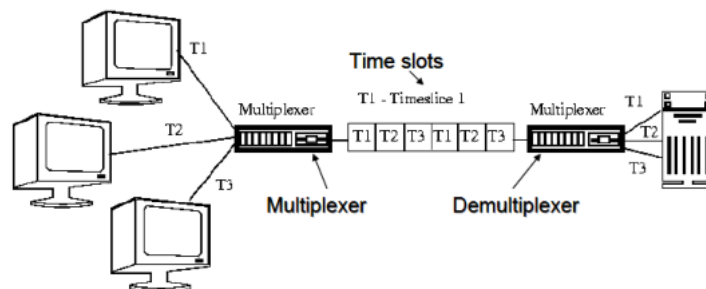
3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 2). Systèmes de multiplexage

b. Le multiplexage en temps

- Le multiplexage en temps TDM (Time Division Multiplexing) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant (IT) et à tour de rôle pour chaque utilisateur,
- Le multiplexage TDM permet de regrouper plusieurs canaux de communications à bas débits sur un seul canal à débit plus élevé.

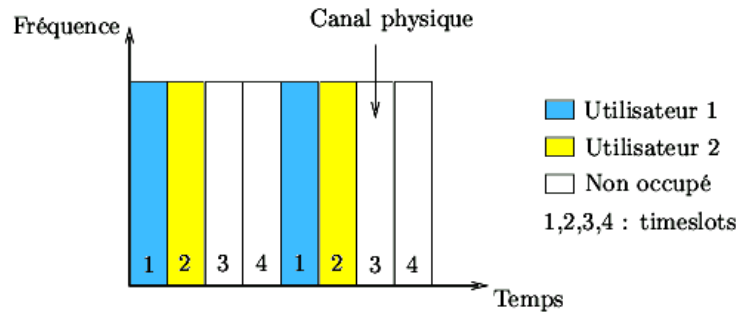


3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 2). Systèmes de multiplexage

b. Le multiplexage en temps



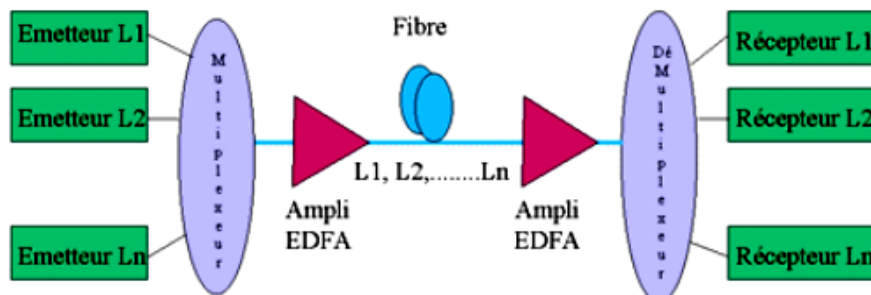
3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 1). Les systèmes de transmission

3. 1. 2). Systèmes de multiplexage

b. Le multiplexage en longueur d'onde (F.O)

- A l'inverse de la technologie TDM qui n'utilise qu'une seule longueur d'onde par fibre optique, la technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) met en œuvre un multiplexage de longueurs d'onde,
- L'idée est d'injecter simultanément dans une fibre optique plusieurs trains de signaux numériques sur des longueurs d'ondes distinctes.





3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 2). Les systèmes de commutation

- La **commutation** est, la deuxième grande fonction des réseaux de télécommunications après la transmission,
- En effet, si au début on pouvait se contenter de faire communiquer entre eux quelques usagers, en embrochant leurs postes sur une même ligne (principe de la ligne partagée) ou en les reliant deux à deux par des lignes directes, cela n'était plus possible lorsque le nombre de personnes susceptibles de communiquer entre elles dépassait la dizaine,
- Il était indispensable alors de mettre en œuvre d'autres moyens : la fonction **commutation** s'imposait d'elle-même.

Définition : La **commutation** consiste à choisir un chemin particulier parmi tous les chemins possibles et disponibles permettant de relier deux lignes téléphoniques données, le numéro composé par l'abonné servant alors d'instruction au commutateur.



3) Classification des systèmes de télécommunications

3. 2). Les systèmes de commutation

Les différents types de commutation :

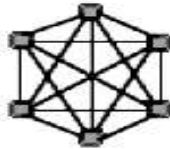
- La commutation de circuits
- La commutation de messages
- La commutation par paquets

3. 2). Les systèmes de commutation

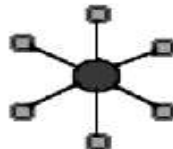
Télécommunications & Applications

Principe de la commutation

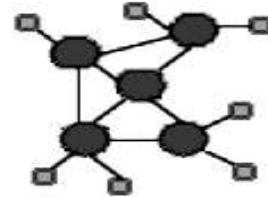
- Le concept de réseau à commutation est né de la nécessité de mettre en relation un utilisateur avec n'importe quel autre utilisateur et de l'impossibilité de créer autant de liaisons point à point qu'il y a de paires potentielles de communicants



Pas de commutation 15 liaisons



Commutation 6 liaisons



Réseau commuté

- Le nombre total de liens nécessaires dans un système de N nœuds est donc de :

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

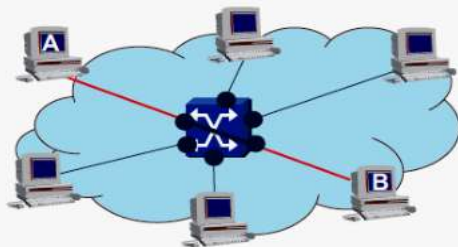
- Le terme **nœud** (node) désigne d'une manière générale tout calculateur qui reçoit, émet et/ou traite des données

3. 2). Les systèmes de commutation

Télécommunications & Applications

Exemple :

- Si on applique la formule précédente au réseau téléphonique, compte tenu qu'il existe environ $300 \cdot 10^6$ 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 $45 \cdot 10^{15}$ lignes !!!!
- D'où 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 ci-dessous, le commutateur met en relation les utilisateurs A et B

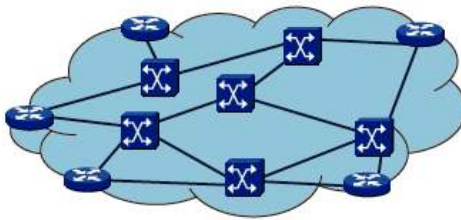


3. 2). Les systèmes de commutation

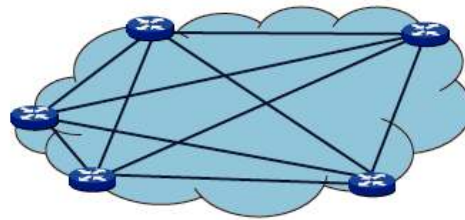
Télécommunications & Applications

Exemple :

- 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



Vue physique du réseau



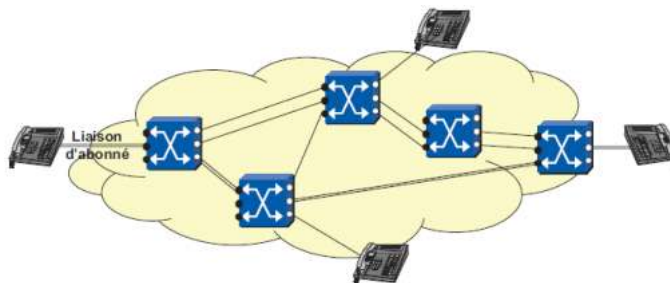
Vue logique du réseau

3. 2). Les systèmes de commutation

Télécommunications & Applications

1). 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
- La mise en relation physique est réalisée par les commutateurs avant tout échange de données et est maintenue tant que les communicants ne la libèrent pas
- Le taux de connexion est important, alors que le taux d'activité peut être faible



Réseau à commutation de circuits ou spatiale

3. 2). Les systèmes de commutation

Télécommunications & Applications

1). La commutation de circuits :

- L'ordonnancement des informations transférées, est garanti par la constitution d'un chemin physique
- Les données sont reçues dans l'ordre où elles ont été émises
- 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).
- 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)

3. 2). Les systèmes de commutation

Télécommunications & Applications

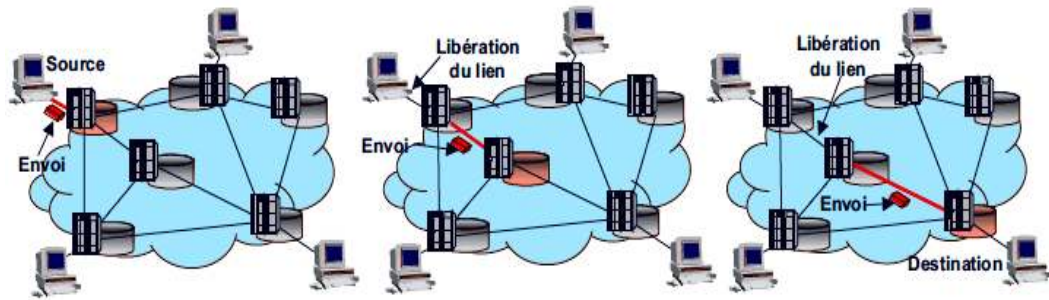
1). La commutation de circuits :



La commutation temporelle

2). La commutation de messages :

- En commutation de circuits, la régulation du trafic est réalisée à la connexion, s'il n'y a plus de ressource disponible, de bout en bout, la connexion est refusée
- En commutation de messages, l'information à transmettre est découpée en messages ; les messages circulent sur le réseau à la manière du transport automobile
- 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



2). La commutation de messages :

- Chaque bloc d'information (message) constitue une unité de transfert acheminée individuellement par le réseau
- 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

2). La commutation de messages :

Télécommunications & Applications

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.

3). La commutation de paquets :

Télécommunications & Applications

Principe :

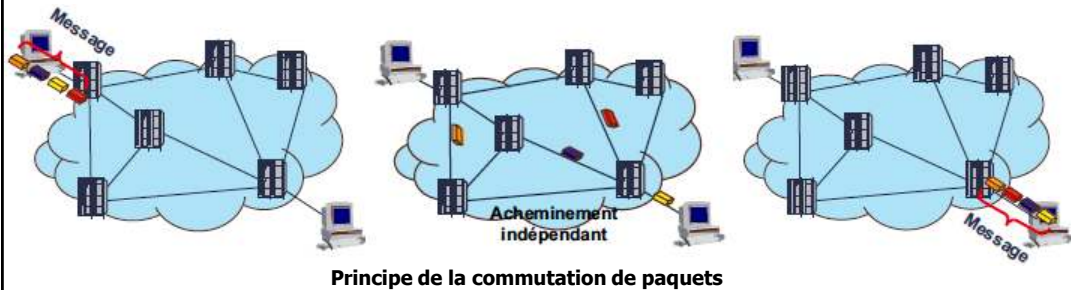
- Dans la commutation de paquets, un bloc d'information à transmettre est découpé en paquets
- Un paquet comporte donc une fraction de l'information à transmettre mais aussi un champ de contrôle, généralement placé en début de paquet



- Dans un réseau à commutation de paquets, un nœud de commutation a pour rôle de **recevoir les paquets** entrants, d'**examiner les en-têtes** et les **destinations**, de **choisir une voie de sortie optimale** pour chaque paquet, de **mettre les paquets reçus dans les files d'attente** adéquates pour leur acheminement.
- On notera, en particulier que des paquets provenant de messages différents peuvent être multiplexés (multiplexage temporel) sur une même liaison et que les débits des différentes liaisons peuvent être différents

3). La commutation de paquets :

Principe :



3). La commutation de paquets :

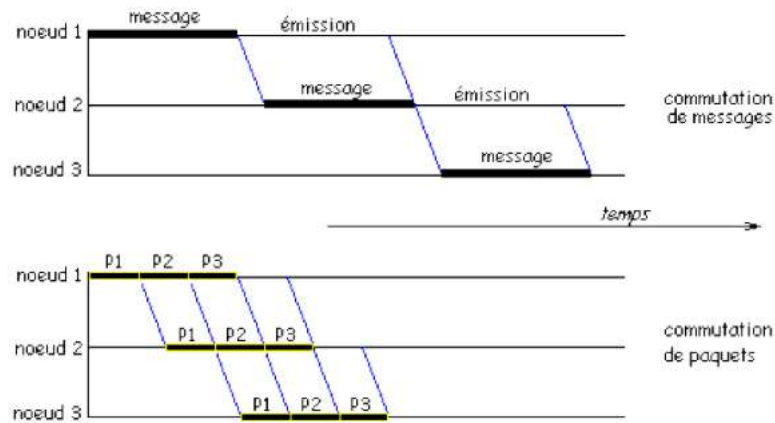
Notons que les paquets peuvent être acheminés suivant deux modes différents :

- le mode "**circuit virtuel**" : un chemin entre le nœud entrant et le nœud destination est construit (établissement du circuit virtuel), puis tous les paquets d'un même message suivent ce chemin ; ils arrivent donc dans l'ordre où ils ont été émis (**acheminement en séquence**)
- le mode "**datagramme**" : chaque paquet est traité indépendamment des autres ; les paquets n'arrivent donc pas nécessairement dans le même ordre que celui de l'émission ; ils doivent être remis en séquence pour délivrance au destinataire

3). La commutation de paquets :

Télécommunications & Applications

- L'intérêt de la commutation de paquets sur la commutation de messages peut être rendu évident par la figure ci-dessous ; on gagne du temps par la simultanéité de réception et de transfert de différents paquets



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
2^{ème} LMD Télécommunication

S4

CHAPITRE 2. LA TELEPHONIE

1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA TÉLÉPHONIE

Le transport de la voix est historiquement à l'origine des premiers réseaux de transmission. Le réseau téléphonique public **RTC** (Réseau Téléphonique Commuté) ou encore **PSTN** (*Public Switched Telecommunication Network*) a essentiellement pour objet le transfert de la voix.

Utilisant le principe de la commutation de circuits, le réseau téléphonique met en relation deux abonnés à travers une liaison dédiée pendant tout l'échange.

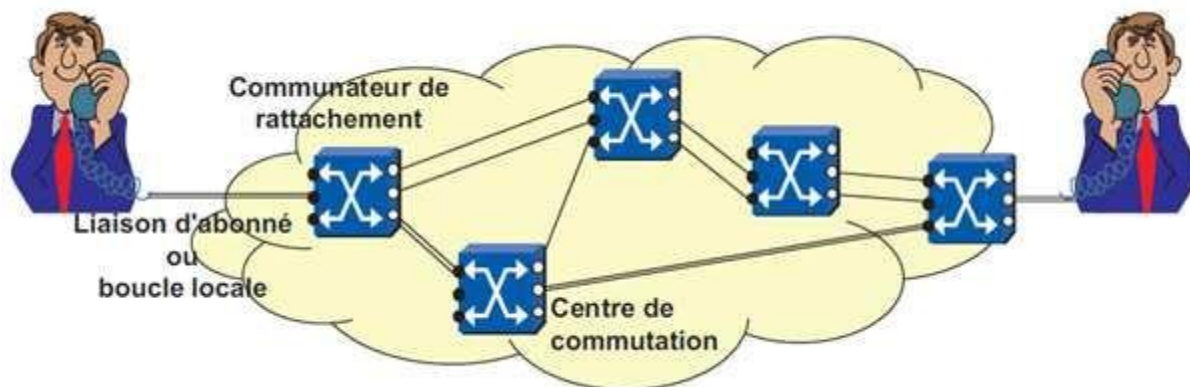


Figure 1: Principe du réseau téléphonique commuté

À l'origine, la mise en relation était réalisée manuellement par des opérateurs. Bien que les premiers concepts de commutation automatique apparurent en 1889.

La commutation de circuits ou commutation spatiale consiste à juxtaposer bout à bout des voies physiques de communication, la liaison étant maintenue durant tout l'échange. La numérisation de la voix a permis le multiplexage temporel des communications. Ce concept est illustré figure 2. En mettant en relation un IT d'une trame en entrée avec un IT d'une autre trame en sortie, la commutation temporelle émule un circuit. La communication est full duplex, une bande passante de 64 kbit/s, dans chaque sens, est donc réservée durant toute la communication.

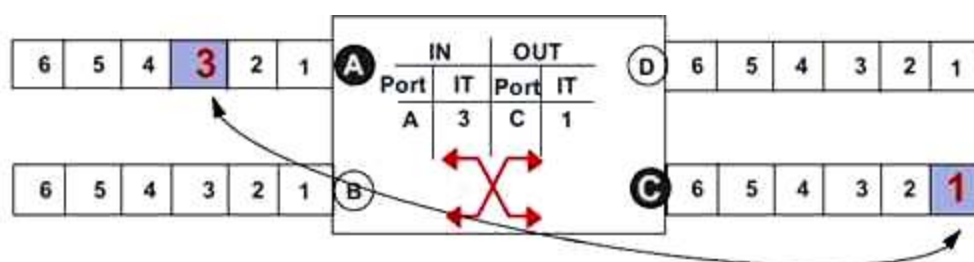


Figure 2: Principe de la commutation temporelle.

Les supports de transmission sont constitués de voies numériques multiplexées selon une hiérarchie appelée hiérarchie plésiochrone¹ (Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH). Malgré la numérisation du réseau, la liaison des abonnés résidentiels est restée essentiellement analogique.

C'est le commutateur de rattachement qui réalise la fonction de numérisation et de dénumérisation de la voix (Figure 3).

¹ En télécommunications, c'est un terme utilisé pour définir des systèmes communiquant à l'aide de signaux d'horloge ayant une même fréquence nominale mais avec une certaine tolérance spécifiée, de sorte que leur phase relative peut varier.

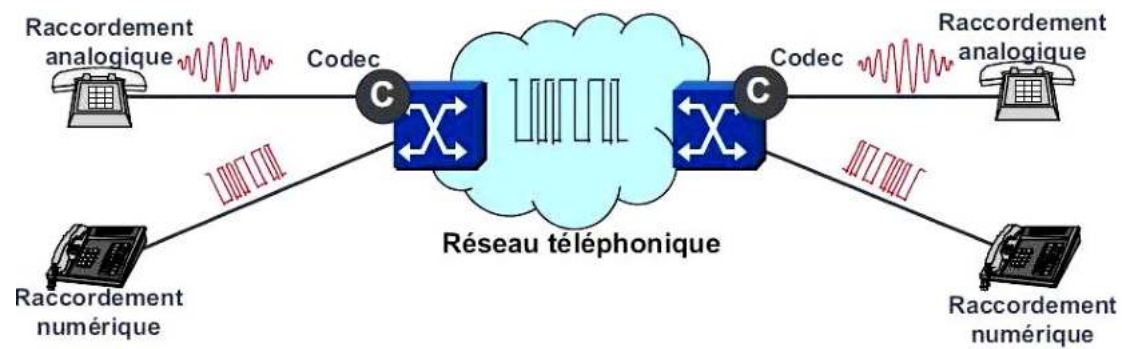


Figure 3: Les modes de raccordement.

2. ORGANISATION DU RÉSEAU TÉLÉPHONIQUE

Architecture traditionnelle

Le réseau téléphonique a une organisation hiérarchique à trois niveaux (**Figure 4**). Il est structuré en zones, chaque zone correspond à un niveau de concentration et en principe de taxation. On distingue :

- Zone à Autonomie d'Acheminement (**ZAA**), cette zone, la plus basse de la hiérarchie, comporte un ou plusieurs Commutateurs à Autonomie d'Acheminement (CAA) qui eux-mêmes desservent des Commutateurs Locaux (CL). Les commutateurs locaux ne sont que de simples concentrateurs de lignes auxquels sont raccordés les abonnés finals. La ZAA (Zone à Autonomie d'Acheminement) est un réseau étoilé, elle constitue le réseau de desserte ;
- Zone de Transit Secondaire (**ZTS**), cette zone comporte des Commutateurs de Transit Secondaires (CTS). Il n'y a pas d'abonnés reliés directement aux CTS (Commutateurs de Transit Secondaires). Le réseau étant imparfaitement maillé lorsqu'un CAA (Commutateur à Autonomie d'Acheminement) ne peut atteindre directement le CAA destinataire, ils assurent le brassage des circuits ;
- Zone de Transit Principal (**ZTP**), cette zone assure la commutation des liaisons longues distances. Chaque ZTP (Zone de Transit Principal) comprend un Commutateur de Transit Principal (CTP). Au moins un Commutateur de Transit Principal (CTP) est relié à un Commutateur de Transit International (CTI).

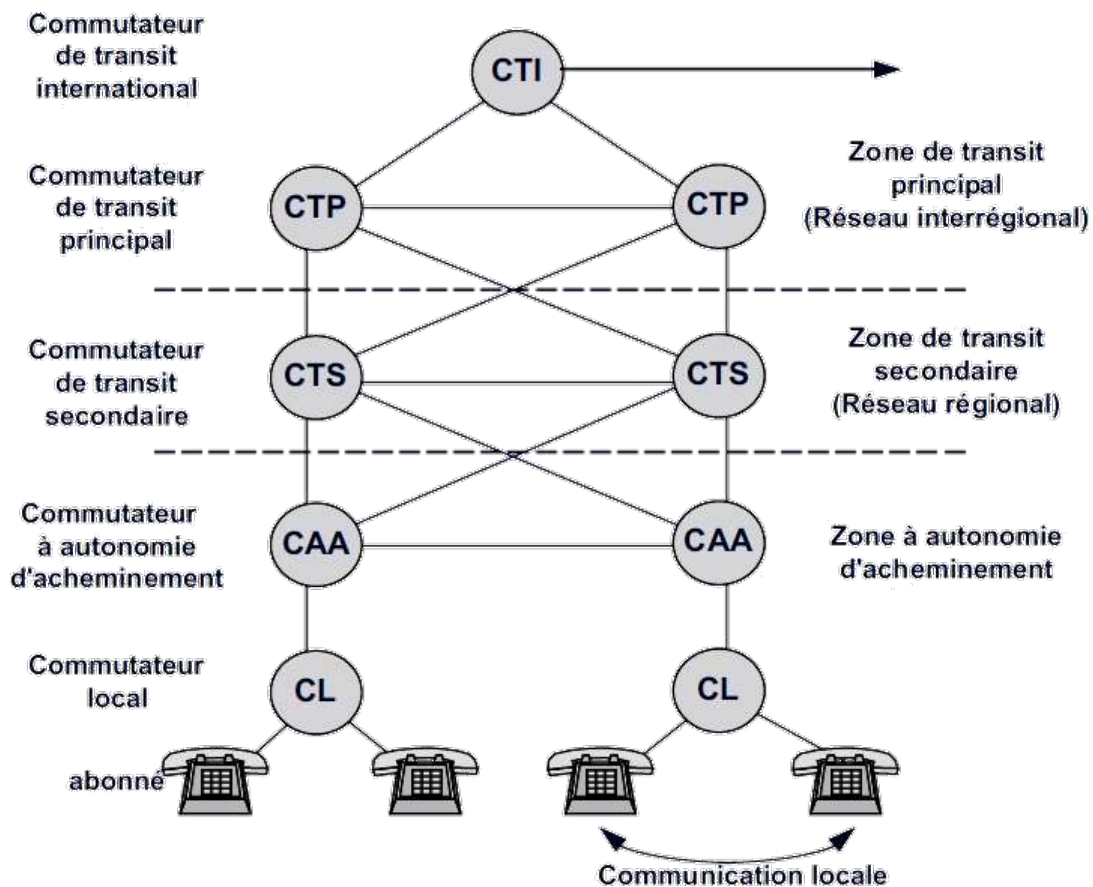


Figure 4: Organisation du réseau téléphonique.

Le réseau étant partiellement maillé, plusieurs itinéraires sont généralement possibles pour atteindre un abonné. Afin d'optimiser l'utilisation des faisceaux, on distingue deux types de faisceaux : les faisceaux de premier choix et les faisceaux de second choix ; les faisceaux de second choix constituent des faisceaux de débordement. Pour un numéro donné, le faisceau de premier choix est choisi de telle manière qu'il conduise l'appel vers le commutateur le plus proche de l'abonné appelé en empruntant les faisceaux de plus faible hiérarchie.

Gestion du réseau

La gestion générale du réseau discerne trois fonctions :

- A. La distribution:** celle-ci comprend essentiellement la liaison d'abonné ou boucle locale (paire métallique) qui relie l'installation de l'abonné au centre de transmission de rattachement. Cette ligne assure la transmission de la voix (fréquence vocale de 300 à 3 400 Hz), de la numérotation (10 Hz pour la numérotation décimale – au cadran – et 697 à 1633 Hz pour la numérotation fréquentielle) et de la signalisation générale (boucle de courant, fréquences vocales) ;
- B. La commutation:** c'est la fonction essentielle du réseau, elle consiste à mettre en relation deux abonnés, maintenir la liaison pendant tout l'échange et libérer les ressources à la fin de celui-ci. C'est le réseau qui détermine les paramètres de taxation et impute le coût de la communication à l'appelant ou à l'appelé ;

C. La transmission: c'est la partie support de télécommunication du réseau, cette fonction est remplie soit par un système filaire cuivre, par de la fibre optique ou par des faisceaux hertziens. Aujourd'hui, les réseaux sont intégralement numérisés, seule la liaison d'abonné est encore, la plupart du temps, analogique et sur support cuivre, notamment pour les abonnés résidentiels.

3. ÉTABLISSEMENT D'UNE COMMUNICATION TÉLÉPHONIQUE

Principe d'un poste téléphonique

Établir une communication téléphonique c'est mettre en relation deux terminaux téléphoniques. Le poste téléphonique doit remplir plusieurs fonctions, chacune est réalisée par un organe spécifique. Le terminal téléphonique élémentaire comporte cinq organes (**Figure 5**) :

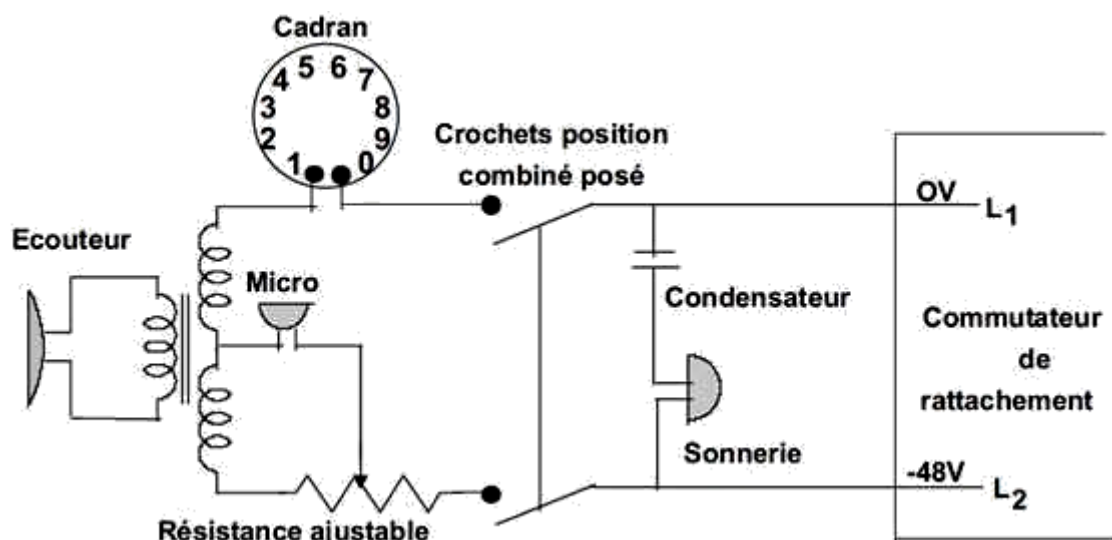


Figure 5: Le terminal téléphonique S63.

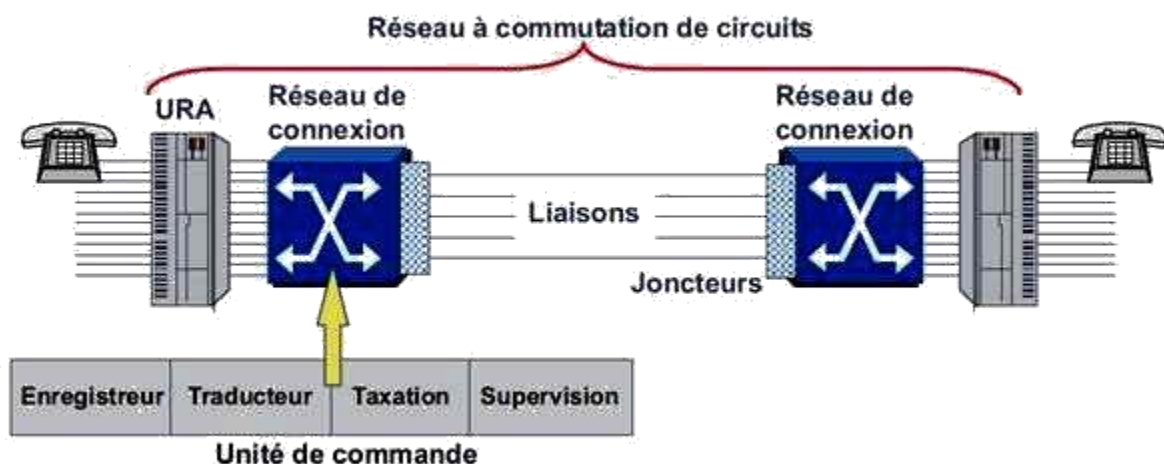
- Les crochets ou supports sur lesquels repose le combiné ; lorsque le combiné est soulevé les contacts se ferment. Le circuit électrique est alors fermé, le commutateur de rattachement détecte le courant et en déduit que l'abonné désire entrer en communication. Un potentiomètre permet d'ajuster ce courant à 30 mA. De même, lors du raccroché, le commutateur détecte l'ouverture de la boucle de courant. L'ouverture ou la fermeture de cette boucle permet, très simplement, au commutateur de rattachement de détecter le changement d'état du terminal (signalisation) ;
- Le micro ou capteur, constitué d'une simple membrane qui par ses vibrations, sous l'effet de la pression acoustique (voix), fait varier la résistance interne de celui-ci (micro au charbon). Ces variations de résistance entraînent des variations du courant dans la boucle de courant. Ce sont ces variations, proportionnelles à la pression sur la membrane (voix), qui constituent le signal analogique de voix transmis, après numérisation, à l'utilisateur distant ;

- Un écouteur, membrane métallique qui vibre selon les variations du courant dans le transformateur d'adaptation et restitue le son ;
- Un cadran, celui-ci en provoquant l'ouverture de la boucle de courant (numérotation décimale) envoie des impulsions au commutateur. Celles-ci seront interprétées et permettront d'identifier l'appelé ;
- Une sonnerie, alimentée en 50 Hz (80 volts), alerte l'abonné distant et l'invite à décrocher, c'est le commutateur de rattachement qui envoie le signal 50 Hz lors d'un appel.

Principe du raccordement d'utilisateur

L'utilisateur est raccordé au réseau via une unité de raccordement (URA, Unité de Raccordement d'Abonnés). Celle-ci peut être locale ou distante (URAD, Unité de raccordement d'Abonnés Distants). Le commutateur de raccordement assure les fonctions de réception et de mémorisation de la numérotation (Enregistreur), celle-ci est analysée et traduite par un traducteur qui va définir les conditions de taxation et déterminer le routage. Enfin, le sélecteur recherche une ligne disponible (Joncteur²) et affecte les ressources (circuits ou IT). La **figure 6** illustre ces différents éléments.

Figure 6: Principe du raccordement des abonnés.



La mise en relation Usager/Usager

La mise en relation de deux abonnés répond à un protocole qui organise le dialogue entre les terminaux d'utilisateur et le réseau (signalisation Usager/Réseau). Elle comporte deux ensembles de mécanisme. Le premier correspond à un échange d'information hors communication destiné à établir celle-ci ou à libérer les ressources, c'est la signalisation. Le second est la communication téléphonique proprement dite.

La **figure 7** illustre les différentes étapes de la mise en relation de deux abonnés, celles-ci au nombre de cinq sont détaillées ci-dessous :

² Situé à l'entrée ou à la sortie d'un [commutateur](#), le joncteur permet le traitement d'une partie de la signalisation et la supervision des communications.

- Décroché du combiné, détection de la boucle de courant, envoi de la tonalité d'invitation à numéroté;
- Numérotation, le numéro composé est mémorisé et décodé par le commutateur de rattachement. Le système établit le lien. Durant cet intervalle de temps, le demandeur recevait une tonalité;
- Envoi du signal de sonnerie à l'appelé distant et attente du décroché de celui-ci. L'appelant reçoit le signal de retour d'appel communément appelé sonnerie ;
- Le correspondant décroche. Le central de rattachement détecte le décroché (boucle de courant), il arrête les signaux de sonnerie, les signaux de retour d'appel et déclenche la taxation ;
- L'échange d'information (voix ou données) peut commencer.

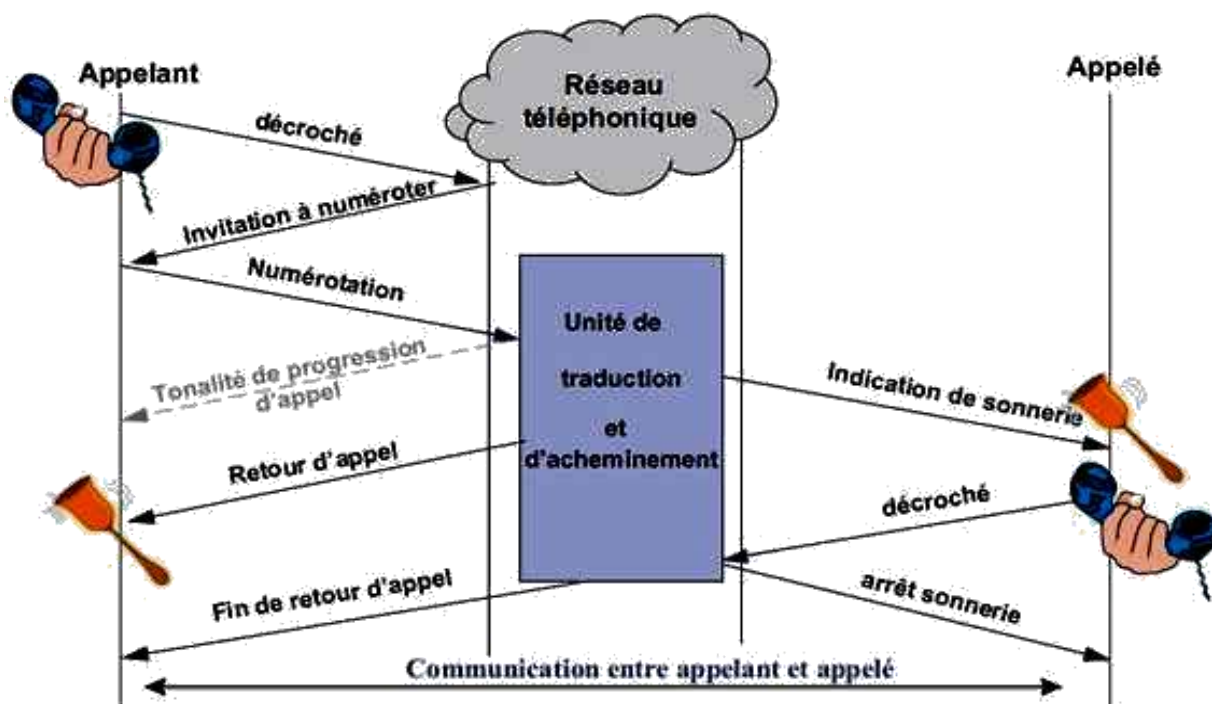


Figure 7: Diagramme d'une communication téléphonique.

La fin de communication est détectée par le raccroché (ouverture de la boucle de courant). Notons deux variantes lors de l'appel : la première correspond à l'incapacité du réseau à écouler la demande, l'appelant en est alors averti par un message du style : « Par suite d'encombrement... », la seconde correspond à l'occupation de la ligne appelée, l'appelant a alors, en retour, une tonalité spécifique dite tonalité d'occupation.

L'intention d'établir une communication est détectée par le décroché du terminal. Que se passe-t-il si on décroche le combiné mais que cette action n'est suivie d'aucune numérotation. La détection du décroché monopolise des ressources dans le commutateur de rattachement (enregistreur). Pour libérer ces ressources, il est nécessaire d'inhiber le poste dont l'usage restera interdit jusqu'à ce que celui-ci soit raccroché.

La **figure 8** décrit les différentes étapes du décroché malencontreux, la signification du diagramme est donnée ci-dessous :

- Lorsque l'appelant décroche le combiné, le réseau (le commutateur de rattachement) détecte la fermeture de la boucle de courant ;
- Il envoie à l'utilisateur l'invitation à numéroté (signal à 440 Hz). Dans le même temps, il déclenche une temporisation ;
- Le demandeur n'effectuant aucune opération, à l'échéance du compteur (Timer, de 15 à 20 secondes) le commutateur de rattachement inhibe le poste en lui envoyant la tonalité d'occupation (signal de décroché malencontreux) pendant environ une minute.

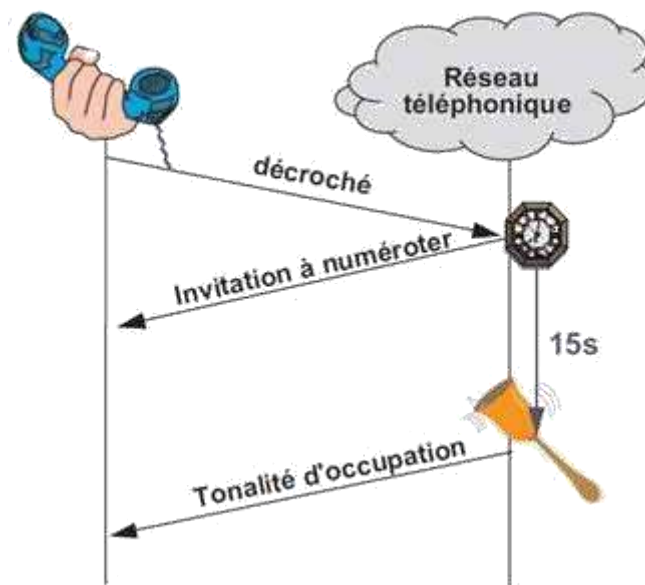


Figure 8: Diagramme des événements lors d'un décroché malencontreux.

La numérotation

Le numéro d'abonné correspond à l'identification du point d'accès au réseau (prise terminale). L'adresse est du type hiérarchique, la structure en est donnée par la **figure 9**.

Préfixe international	Indicatif Pays	Numéro national demandé		
Pour sortir du réseau National: 00	Par exemple Algérie = 213	Exploitant Zone (EZ) : 26	Numéro du commutateur de rattachement	Numéro de la ligne d'abonné

Figure 9: Structure d'un numéro d'abonné et valeur du préfixe.

Les différents éléments qui la constituent sont :

- La zone d'appel (Z), L'Algérie est divisée en 20 zones ;
- Le commutateur de rattachement;
- Enfin, les 4 derniers chiffres qui désignent l'abonné local.

Indicatif Téléphonique	Wilaya
+213 (0) 21	Alger
+213 (0) 24	Boumerdès, Tipaza
+213 (0) 25	Blida, Médéa
+213 (0) 26	Bouira, Tizi-Ouzou
+213 (0) 27	Chlef, Djelfa, Aïn-Defla
+213 (0) 29	Tamanrasset, Ouargla, Ghardaia, Illizi
+213 (0) 31	Constantine, Mila
+213 (0) 32	Oum-El-Bouaghi, El-Oued, Khenchela
+213 (0) 33	Batna, Biskra,
+213 (0) 34	Béjaïa, Jijel
+213 (0) 35	M'Sila, Bordj-Bou-Arreridj
+213 (0) 36	Sétif
+213 (0) 37	Tébessa, Guelma, Souk-Ahras
+213 (0) 38	Skikda, Annaba, El-Tarf
+213 (0) 41	Oran
+213 (0) 43	Aïn-Témouchent
+213 (0) 45	Mostaganem, Mascara
+213 (0) 46	Tiaret, Tissemsilt, Relizane
+213 (0) 48	Saida, Sidi-Bel-Abbès
+213 (0) 49	Adrar, Béchar, El-Bayadh, Tindouf, Naâma

Il existe trois types de numérotation:

- 1) La numérotation décimale ou analogique
- 2) La numérotation fréquentielle
- 3) La numérotation numérique

La numérotation la plus ancienne est la numérotation décimale ou analogique (33/66 ou 10 Hz). Elle est réalisée par le cadran de la **figure 5**. Ce dernier provoque des ruptures de circuit. Les numéros sont envoyés au commutateur de rattachement sous forme d'impulsions de **66 ms** suivi d'un repos de **33 ms**, d'où le nom de système **33/66**. Le correspond à une rupture, le 2 à deux... le 0 à dix ruptures (voir **figure 10**).

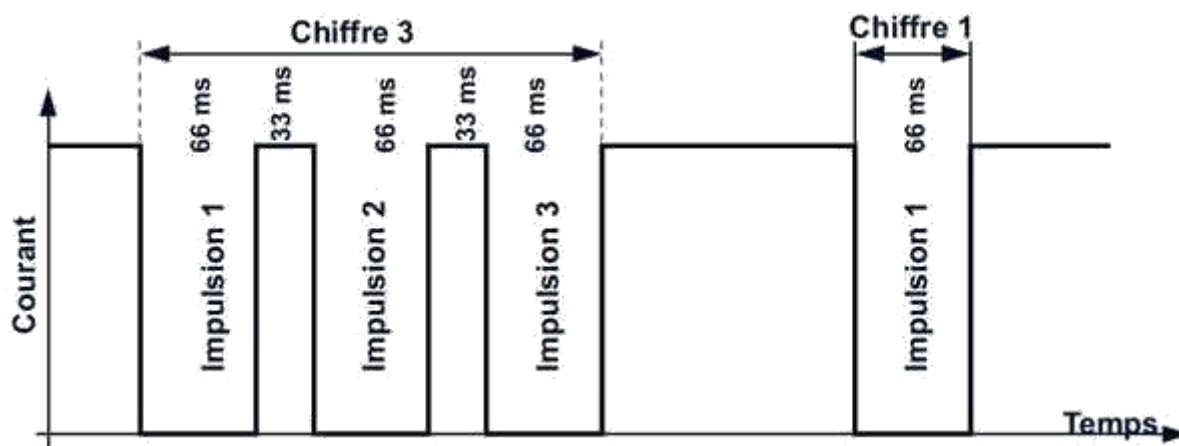


Figure 10: Exemple de numérotation décimale de 31.

Dans la numérotation fréquentielle ou vocale (multi-fréquentielle), normalisée par le CCITT (Comité Consultatif International Télégraphie et Téléphonie **Q.23**), l'enfoncement d'une touche génère deux signaux de fréquences différentes (une fréquence haute suivie d'une fréquence basse, DTMF, Dual-Tone Multi-Frequency) transmis au central de rattachement. Chaque combinaison de fréquences a été déterminée pour minimiser le risque qu'une combinaison de voix lui ressemble. Les postes comportent 12 ou 16 touches, les touches A, B, C, et D peuvent être affectées à des fonctions particulières (voir **figure 11**).

		Fréquences hautes			
		1209	1335	1477	1633
Fréquences basses	697	1	2	3	A
	770	4	5	6	B
	852	7	8	9	C
	941	*	0	#	D

Figure 11: Clavier des postes à fréquences vocales.

Certains postes téléphoniques fréquents ont la possibilité d'émettre une numérotation décimale. Enfin, avec la dernière génération de postes téléphoniques spécifiques dits postes numériques, la numérotation correspond à la transmission d'une valeur binaire sur une voie dite de signalisation. La numérotation peut être propriétaire (poste numérique propriétaire) ou normalisée (poste RNIS).

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 : 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 13**).

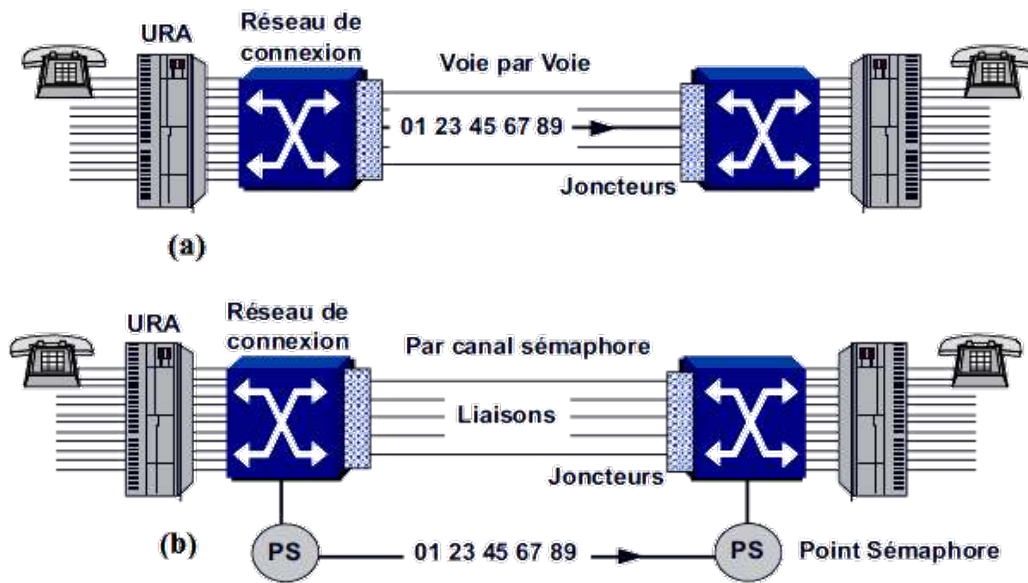


Figure 13: Les modes de signalisation.

- Dans la signalisation **voie par voie** ou signalisation **CAS** (*Channel Associated Signalling*), une voie de communication correspond une voie de signalisation (**figure 13 (a)**), la signalisation est associée à la communication. Ce qui nécessite l'établissement du circuit pour qu'elle soit transmise.
- 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 (**figure 13 (b)**), 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.

4. ÉVOLUTION DE LA TÉLÉPHONIE, LE RNIS

4.1. 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 (voir **figure 14**).

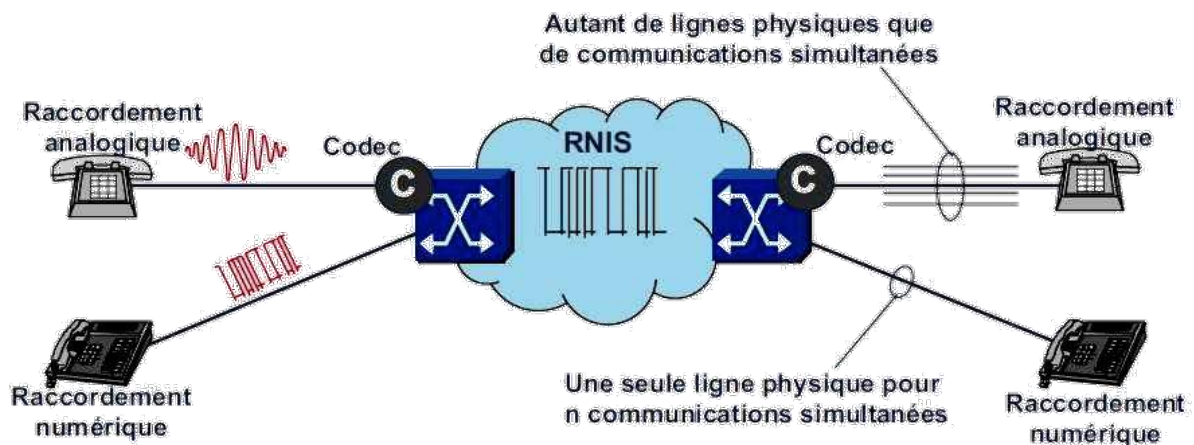


Figure 14: De l'analogique au numérique.

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 protocole³ 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).

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, téléconférence⁴), de transmission de données en mode paquets ou autre et de la transmission de l'écrit (télécopie). La **figure 15** schématise cette évolution, en RNIS, si un télécopieur initialise un appel, seul le télécopieur de l'installation destination « sonne ».

Le raccordement de différents terminaux (voix, données, images) sur une même ligne nécessite

³ Dans les réseaux informatiques et les télécommunications, un **protocole de communication** est une spécification de plusieurs règles pour un type de communication particulier. Initialement, on nommait protocole ce qui est utilisé pour communiquer sur une même couche d'abstraction entre deux machines différentes. Par extension de langage, on utilise parfois ce mot aussi aujourd'hui pour désigner les règles de communication entre deux couches sur une même machine.

⁴ La visiophonie est un service vidéo associé à téléphonie, les correspondants se voient durant la communication. La téléconférence consiste en l'organisation de conférences vidéo à partir d'un studio de télévision.

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**⁵ établis appel par appel (circuits commutés), du canal de signalisation ou **canal D**⁶ établi de manière permanente et transportant les informations nécessaires à l'établissement du circuit (adresse, type de service invoqué...).

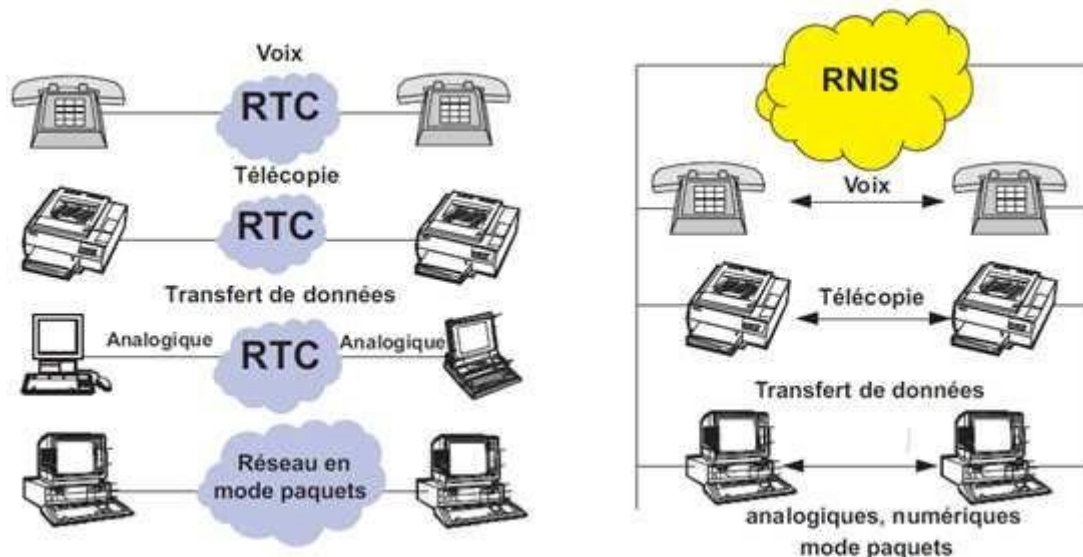


Figure 15: Évolution des accès avec le concept RNIS.

Lors de l'émission d'un appel, celui-ci est pris en compte par le protocole de signalisation. La demande d'établissement de circuit est acheminée en dehors de toute communication établie. Elle transporte les informations en relation avec le numéro de l'appelé, le type de service invoqué... Ainsi, dans l'exemple de la **figure 16**, l'appel émis à partir du télécopieur de l'appelant invoquera un service de télécopie chez l'abonné distant. Seul alors un télécopieur répondra à cet appel. Le téléphone de l'installation a bien reçu l'appel, mais non concerné par le service invoqué ne sonne pas.

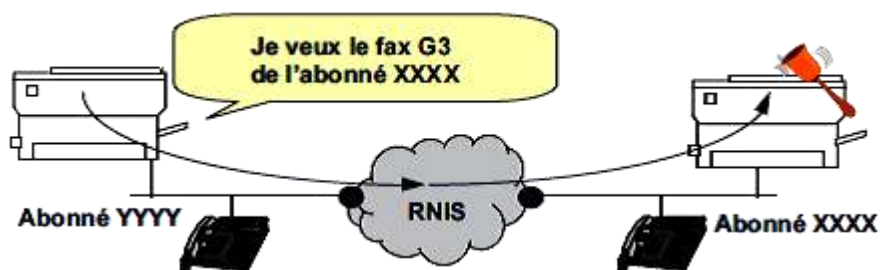


Figure 16: L'accès direct au service demandé.

⁵ **Canal B** : En RNIS, canal duplex à 64 kbit/s utilisé pour transmettre la voix ou des données.

⁶ **Canal D** (*D_Channel*) : Canal de signalisation du RNIS fonctionnant en duplex et à 16 kbit/s (accès de base) ou 64 kbit/s (accès primaire).

Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Electrique
2^{ème} LMD Télécommunication (S4)

Section I : Historique du GSM

1. Introduction
2. Evolution de l’Idée Cellulaire
3. Réalités Cellulaires
4. Le Système GSM
5. Présentation Générale du GSM

Section II : Introduction au Système GSM

1. Présentation Générale du Système
2. Spécification du Système GSM
3. Les Nœuds du Réseau GSM et les Equipements Associés
4. Structure Géographique d'un Réseau GSM

Section I

1. Introduction

Nous sommes aux origines d'une «révolution» dans les télécommunications mobiles ; d'une révolution qui nous libérera enfin, en tant qu'utilisateur de communication, de l'obligation d'être rattaché à un endroit particulier et fixe du réseau téléphonique, et qui nous offrira la possibilité de communiquer par la phonie et par les données en utilisant des équipements d'avant garde aisément transportables à un prix raisonnable. Le monde des télécommunications à la fin des années 80 est rapidement devenu de plus en plus mobile. La téléphonie mobile interconnectée a connu une histoire technique et réglementaire agitée.

- ◆ Le téléphone d'Alexandre Graham Bell en 1876 peut transmettre des paroles sous forme électrique dans un seul sens, sur un circuit filaire de cuivre à plusieurs centaines de mètres.
- ◆ En 1891 John J. Carty a démontré que des ondes longues peuvent être générées. Elles sont capables d'actions électriques et peuvent se propager à travers le brouillard le plus dense et même à travers un mur de pierre presque aussi facilement qu'à travers l'atmosphère la plus claire.
- ◆ La première application commerciale de la radio fut la communication avec les navires en mer en 1921.
- ◆ La configuration actuelle –la radio cellulaire analogique- fut conçue dans les années 40, planifiée dans les années 60 et lancée dans les années 80.
- ◆ En 1983 le premier système commercial cellulaire américain était mis en service à Chicago.
- ◆ En 1985 le 1^{er} système analogique français, *Radiocom 2000*.
- ◆ En 1993 démarrage de l'exploitation du GSM en France.
- ◆ En 1996 le réseau DCS 1800 (GSM 2^{ème} génération).
- ◆ En 1998 apparition du GPRS General Packet Radio Service (GSM+IP).
- ◆ En 2002 Universal Mobile Telecom.System (UMTS, GSM de 3^{ème} génération)

2. Evolution de l'idée de cellulaire

Il est important de comprendre que la radio cellulaire d'aujourd'hui n'est pas tant une nouvelle technologie qu'une nouvelle idée pour organiser la technologie existante sur une plus grande échelle. La transmission RF reste toujours la colonne vertébrale de la communication par système cellulaire. L'idée cellulaire commença à apparaître dans les années 40 laquelle dérive de la radiodiffusion basée sur le principe d'installation d'un émetteur de forte puissance au sommet de plus haut point de la zone et projetait le signal vers l'horizon (jusqu'à 60 à 80 km).

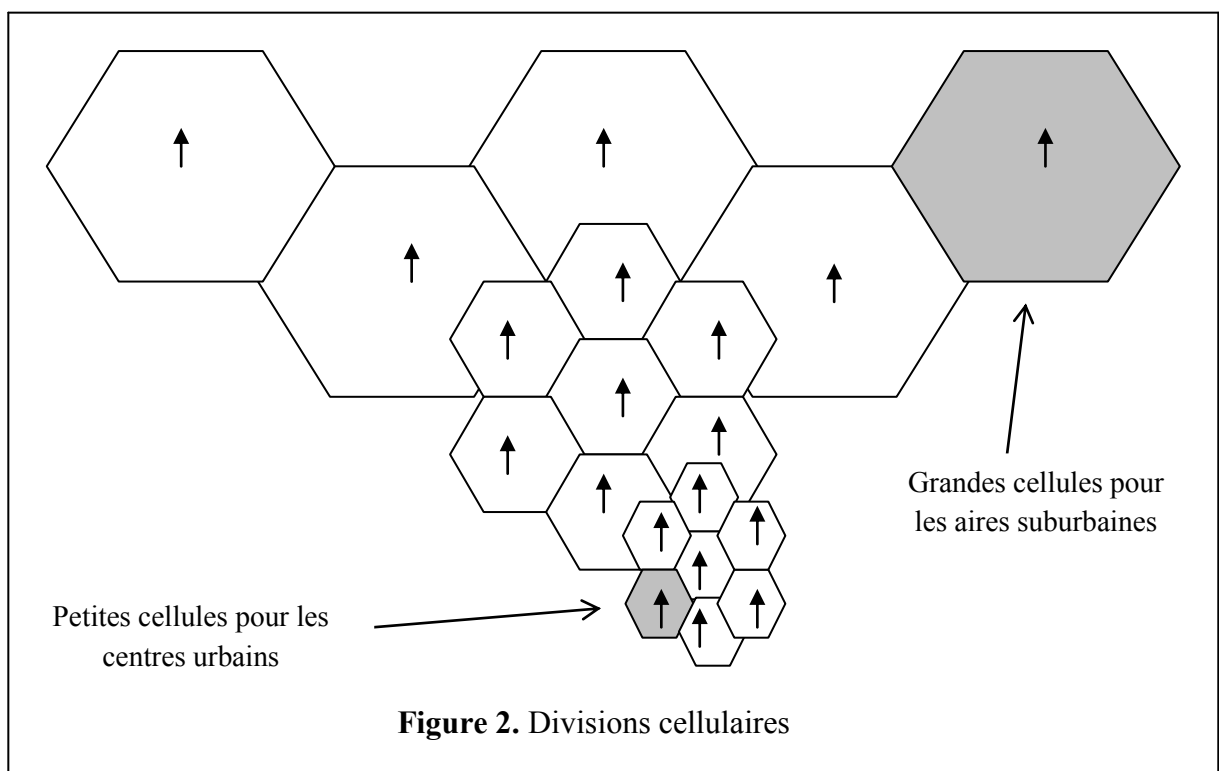
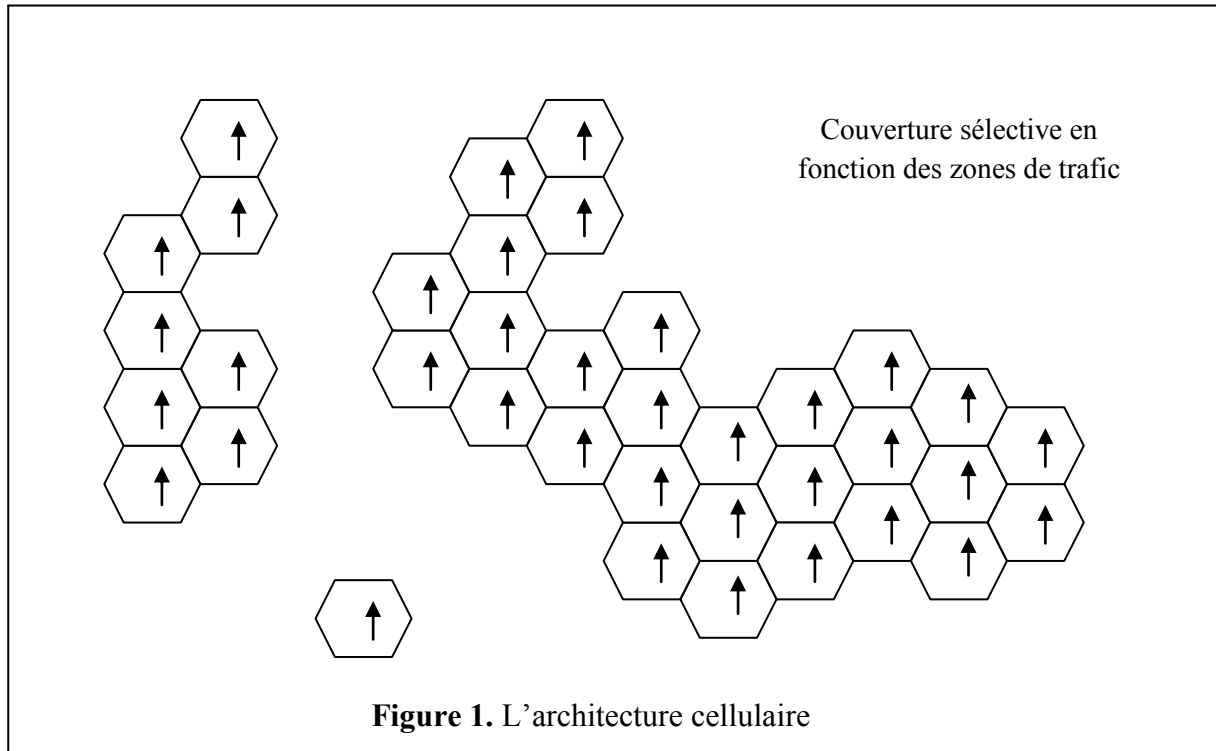
Cela permettait de bien adapter la couverture sur une plus grande surface. Ce qui signifiait que le peu de canaux disponibles était bloqué sur une grande surface pour un petit nombre d'appels. On a eu alors l'idée d'utiliser plusieurs émetteurs de faible puissance chacun spécifiquement conçu pour desservir une cellule (petite surface).

Les premiers calculs montrent que, du fait des interférences entre les mobiles opérant sur le même canal dans des cellules adjacentes on ne pouvait utiliser les mêmes fréquences dans deux cellules voisines. Il était nécessaire de sauter plusieurs cellules avant de réutiliser les mêmes fréquences.

Mais l'idée de la réutilisation en elle-même semblait valable. L'ingénieur système pouvait, en effet, créer plus d'un circuit téléphonique mobile à partir du même canal réutilisé dans différentes parties de la ville. Il est très cher de construire des systèmes à milliers de cellules dès le

commencement. Il apparut cependant que les cellules à grand rayon pouvaient évoluer aisément en cellules de plus petit rayon sur une certaine période par le biais d'une technique appelée division cellulaire.

La division cellulaire offre plusieurs avantages. Elle permet en premier lieu une répartition des investissements financiers au fur et à mesure de la croissance du système, de nouvelles cellules ne seront ajoutées que quand le nombre de consommateurs qui génèrent des revenus croîtra (des petites cellules dans des endroits à haute densité de trafic et des cellules à plus grand rayon pour les zones isolées).



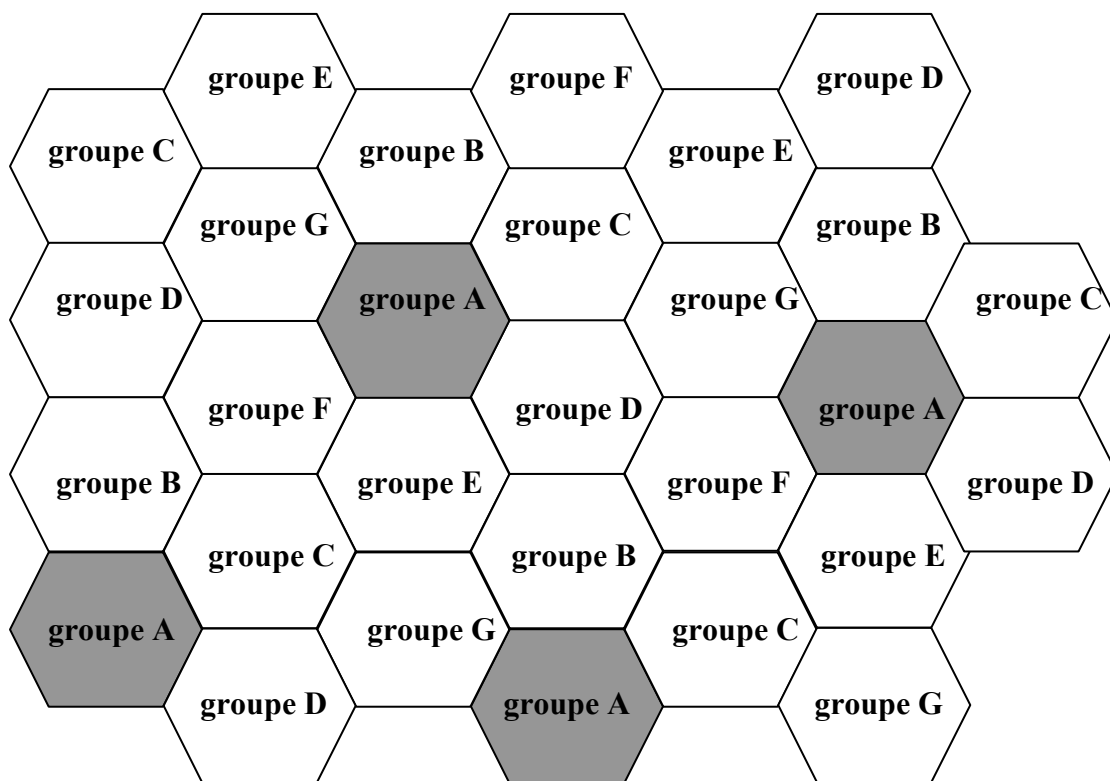


Figure 3. Réutilisation des fréquences (7 groupes)

3. Réalités cellulaires

Le système cellulaire de Chicago fut mis en service le 13 octobre 1983. A la fin de 1984, le service cellulaire était disponible dans 25 villes américaines. La quatrième année de la radio cellulaire (1987) a vu l'industrie de la téléphonie mobile, engager de sérieuses discussions pour, non seulement modifier mais abandonner les normes techniques établies. La prochaine génération technologique est déjà étudiée en Europe.

Les prévisions habituelles pour la mise en service réelle de cette génération sont environ les années 1990 à 1995. Il ne s'agit pas d'un cas dévalorisation planifié. Si une nouvelle génération technologique doit arriver sitôt. Le concept cellulaire, développé par les Bell Laboratories, était bien connu en Europe avant même qu'il n'y fut exploité.

L'Europe a établi alors ses propres normes, inspirées de plus ou moins près des idées américaines. Quatre principales normes sont alors apparues.

- La norme NMT (Nordic Mobile Telephone) fut établie par les pays scandinaves.
- La norme TACS (Total Access Communication System, employé en UK, Irlande et en Japon)
- La norme C développée par l'Allemagne.
- La norme Radiocom 2000 développée en France.

Ces systèmes entrés pour la plupart en service dans la première moitié des années 80, sont saturés et rencontrent les mêmes problèmes de congestion que les systèmes américains. Ils devaient

être, à court terme, complétés par un réseau utilisant toujours le concept cellulaire mais avec une nouvelle technologie numérique, comme en a décidé la communauté économique européenne. Ce nouveau réseau dit GSM permettra un usage sans frontière avec une meilleure utilisation du spectre des fréquences et des services étendus.

4. Le Système GSM

En 1982 la conférence européenne des postes et télécommunications (CEPT) créait un groupe d'étude ; le Groupe Spécial Mobile. Le projet de ce groupe avance lentement pendant les toutes premières années car les différents pays se focalisent sur l'ouverture de leurs réseaux mobiles analogiques nationaux. En 1985, une impulsion nouvelle est donnée par la commission de la communauté européenne qui annonce son intention d'imposer à ses pays membres la norme élaborée par le GSM. En 1987, le GSM entérine le choix de la transmission numérique avec multiplexage temporel à bande moyenne. Toujours en 1987, les exploitants des réseaux des pays européens signent un protocole d'accord pour l'ouverture concertée du GSM en 1991.

En juillet 1991, la première communication entre un abonné du réseau téléphonique et un terminal GSM de laboratoire est effectuée. Au mois d'octobre de la même année, un réseau de démonstration est mis en place à l'occasion de l'exposition TELECOM 91 à Genève et plusieurs constructeurs présentent des terminaux. Les premiers réseaux pilotes ouvrent malgré de nombreux problèmes techniques à la fin de l'année 91.

5. Présentation générale du GSM

Le réseau GSM offre à ses abonnés des services qui permettent la communication de station mobile de bout en bout à travers le réseau. La téléphonie est le plus important des services offerts. Ce réseau permet la communication entre deux postes mobiles ou entre un poste mobile et un poste fixe. Les autres services proposés sont la transmission de données et la transmission de messages alphanumériques courts.

Appel d'un abonné du réseau GSM vers un abonné du RTPC :

Pour émettre un appel, un abonné du réseau GSM compose le numéro de son correspondant. Sa demande arrive à la BTS de sa cellule, puis traverse le BSC pour aboutir dans le commutateur du réseau. Le commutateur MSC transmet alors l'appel au réseau public et demande au contrôleur BSC de réserver un canal pour la future communication.

Appel d'un abonné du réseau RTPC vers un abonné du réseau GSM :

Lorsqu'un abonné du réseau fixe numérote, le numéro composé est analysé par le commutateur dont dépend l'abonné. Puis, l'appel est aiguillé vers le réseau GSM pour interroger le HLR du numéro d'annuaire demandé afin de localiser le destinataire. Quand le demandé est libre, le réseau interroge le VLR dans lequel il est inscrit pour connaître la cellule et le contrôleur de station BSC de la zone qui peut joindre le demandé. Afin de commander la sonnerie du terminal demandé, le contrôleur BSC fait diffuser un avis d'appel par l'ensemble des stations BTS de sa zone vers le terminal demandé. Si le terminal du demandé écoute le réseau et reconnaît son numéro, il active la sonnerie. Dans le même temps les bases de données VLR et HLR mettent à jour l'état de l'abonné.

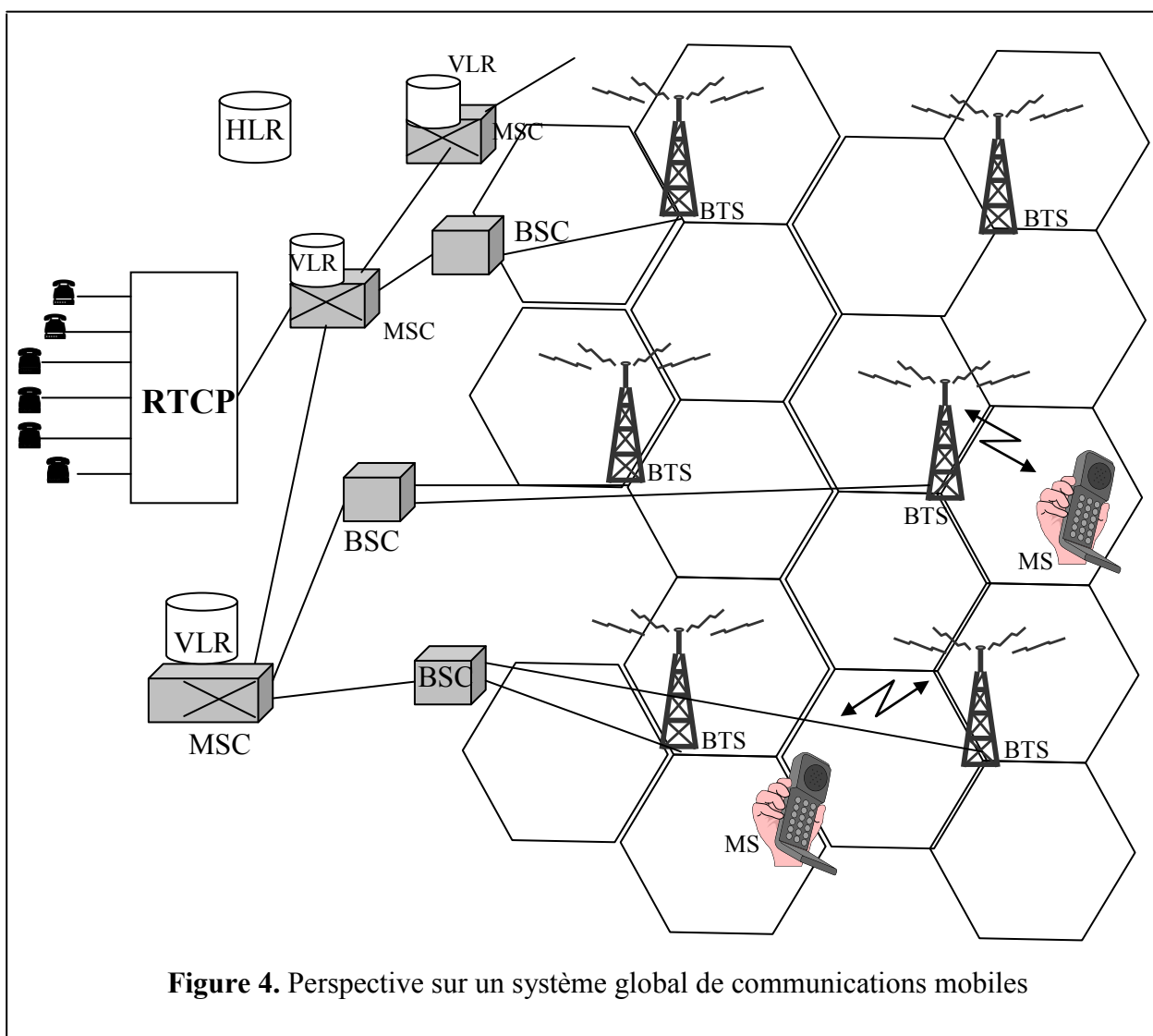
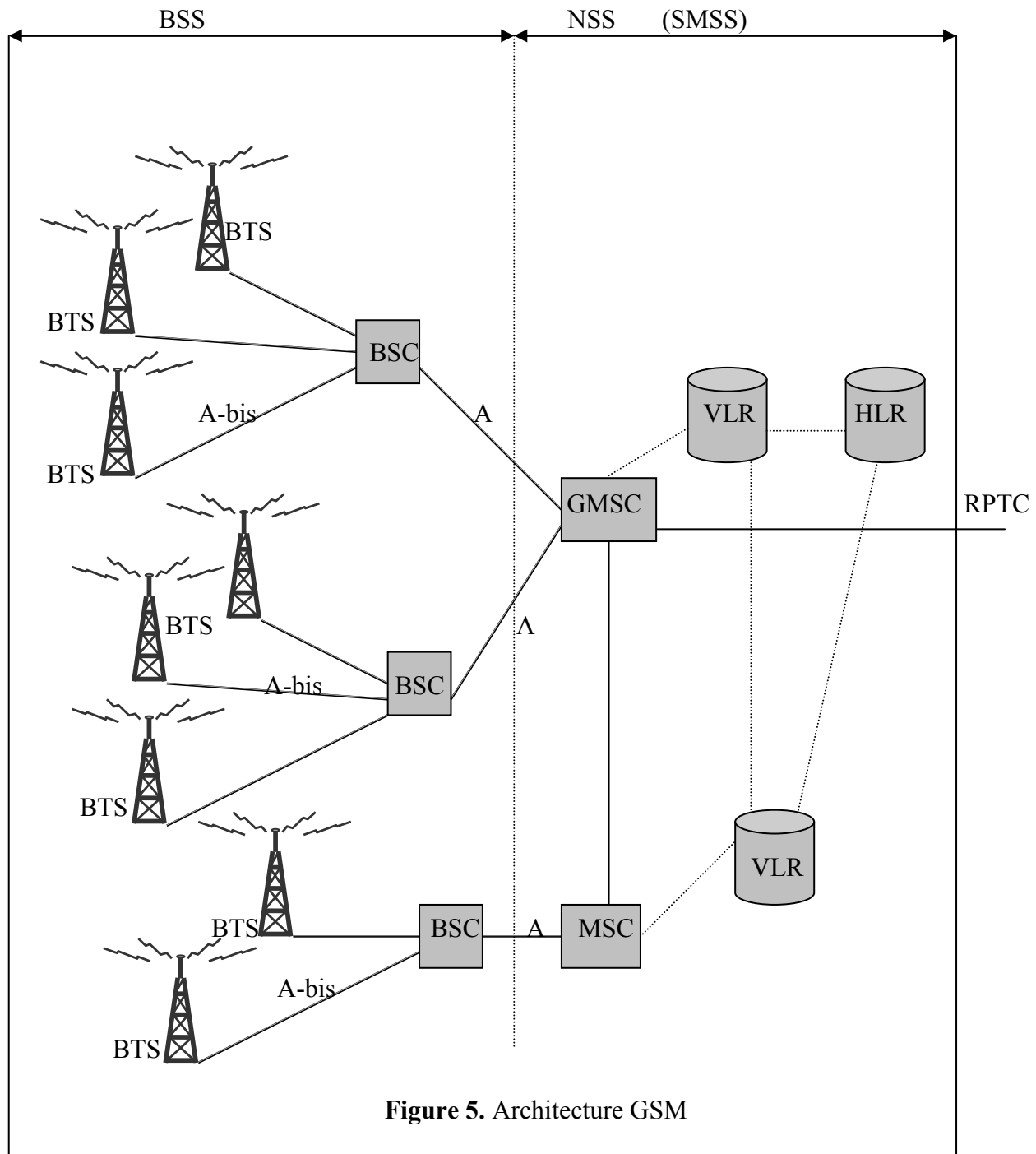


Figure 4. Perspective sur un système global de communications mobiles

Architecture

La figure ci-dessous indique les principaux éléments d'un réseau GSM.



SMSS : Switching and Management Sub-System

NSS : Network Sub-System

VLR : Visitor Location Register

HLR : Home Location Register

MSC : Mobile Services Switching Center

GMSC : Gateway MSC, passerelle réalisant l'interface entre le PLMN et le RTPC pour les appels à destination d'un mobile.

PLMN : Public Land Mobile Network, réseau GSM opéré par un opérateur particulier sur un territoire.

Section II

1. Présentation générale du GSM

Les télécommunications cellulaires constituent l'une des applications des télécommunications ayant la croissance la plus rapide et les exigences les plus contraignantes de toute l'histoire de la téléphonie. Les solutions cellulaires numériques, concurrencent avec succès les réseaux câblés classiques et les téléphones sans fil. Les téléphones cellulaires numériques mobiles constituent l'outil de télécommunication universel.

Beaucoup de pays conçoivent des systèmes de radiotéléphonie cellulaire depuis les années 70. Parmi eux la Suède (Ericsson) et proposent des produits réseaux pour toutes les principales normes cellulaires telles que les systèmes :

- NMT (Nordic Mobile Telephone),
- TACS (Total Access Communication System),
- AMPS (Advanced Mobile Public System),
- AMPS numérique
- PDC (Pacific Digital Cellulaire) : Norme japonaise
- PCS (Personnel Communication System) : Américain.

Le groupe de normalisation GSM (Groupe Spécial Mobile) fut créé en 1982 dans le but d'établir des spécifications pour un système de radiotéléphonie cellulaire mobile fonctionnant dans la bande des 900 MHz. Ces spécifications furent ultérieurement élargies pour intégrer une interface hertzienne (de la station de base mobile) dans la bande de fréquence des 1800 MHz. Le DCS1800 (Digital Communication System).

Entre 1982 et 1985, les discussions ont porté sur le choix d'un système analogique ou numérique. Ce dernier remporte la décision en 1985. L'étape suivante a consisté à choisir entre une solution à bande étroite ou à bande large.

Après plusieurs essais, la solution TDMA (Time Division Multiple Access) a été choisie en mai 1987. Simultanément les 13 premiers pays ont signé un MoU (Mémoire of Understanding) les engageant vis-à-vis de ces spécifications ouvrant ainsi un vaste marché potentiel au GSM. Tous les opérateurs ayant signé ce mémorandum s'engageaient à disposer d'un système GSM opérationnel au 1^{er} juillet 1991.

2. Spécifications du système GSM

Système	Liaison	Bande de fréquence	Ecartement duplex
GSM 900	Liaison montante	890 - 915 MHz	45 MHz
	Liaison descendante	935 - 960 MHz	
GSM 1800	Liaison montante	1710 - 1785 MHz	95 MHz
	Liaison descendante	1805 - 1880 MHz	
GSM1900	Liaison montante	1850 - 1910 MHz	80 MHz
	Liaison descendante	1930 - 1990 MHz	

Mémorandum : une description narrative.

Spécifications communes :

Séparation entre porteuses	200 KHz
Modulation	GSMK
Débit de transmission	270 kb/s
Méthode d'accès	TDMA
Codeur du signal de parole	PRE LPC à 13 kb/s, Codage de canal, Entrelaçage, Saut de fréquence, Egalisation adaptative

3. Les nœuds du réseau et équipements Associés

Le système de téléphonie mobile GSM se compose de trois parties principales (voir figure 6) :

1. Le système de commutation (SS, Switching System) où sont effectuées la plupart des fonctions de traitement des appels et des fonctions liées aux abonnés.
2. Le système de stations de base (BSS, Base Station Sub-system) où sont concentrées les fonctions liées à la radio.
3. Le système d'exploitation et de soutien (OSS, Operation Support System) qui couvre les aspects de conception technique du réseau cellulaire et les exigences commerciales liées à l'exploitation d'un réseau cellulaire.

3.1. Le système de commutation

Le système de commutation comporte les nœuds suivants :

- Le centre de commutation des services mobiles (MSC) assure les fonctions de commutation téléphonique. Une fonction spécifique de MSC est la passerelle (GMSC : Gateway MSC) qui coordonne le trafic en provenance d'autres réseaux. Il comprend également les fonctions de commutation, d'interfaçage avec le réseau de signalisation par canal sémaphore.
- L'unité d'inter fonctionnement GSM (GIWU : GSM Interworking Unit) pour les communications de données avec d'autres réseaux, est également mise en œuvre dans MSC.
- Le registre de localisation des visiteurs (VLR) est une base de données contenant des informations relatives à toutes les stations mobiles se trouvant dans la zone de couverture du MSC à tout moment donné. Le VLR est souvent intégré au MSC.
- Le registre de localisation de rattachement (HLR) est une base de données qui stocke et gère les abonnements. Il contient des données d'abonnés permanentes comme le type d'abonnement, les services souscrits et ainsi de suite. Il stocke également les informations relatives à la localisation des abonnés. Le HLR peut être intégré au même nœud que le MSC ou être mis en œuvre sous la forme d'un nœud distinct.

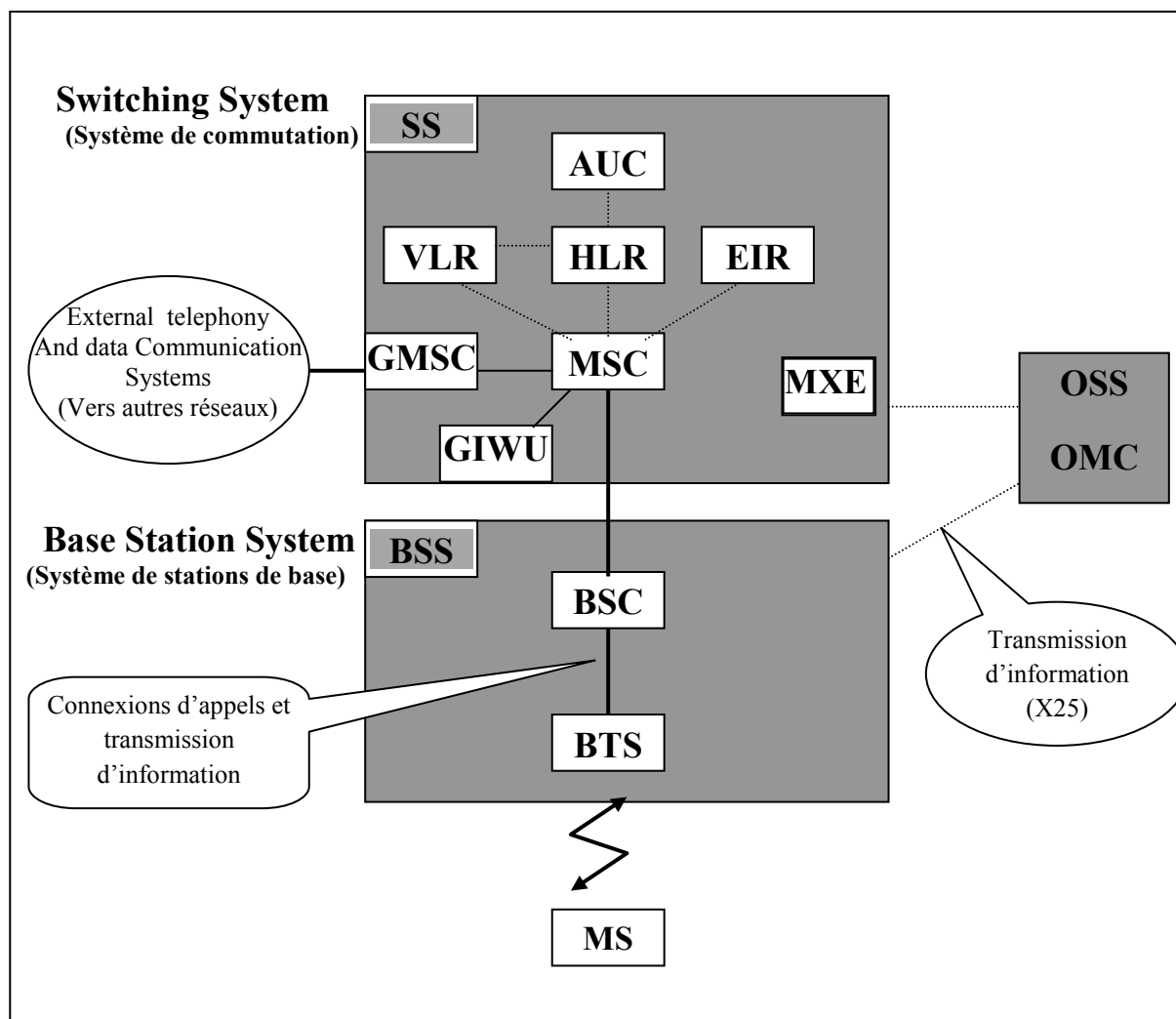


Figure 6. Diagramme d'un système GSM

AUC	Authentification Centre	Centre d'Authentification
BSC	Base Station Controller	Contrôleur de station de base
BTS	Base Transceiver Station	Station Emetteur/ récepteur de base
EIR	Equipment Identity Register	Registre d'identification des équipements
HLR	Home Location Register	Registre de localisation de rattachement
MS	Mobile Station	Station mobile
MSC	Mobile Services Switching Center	Centre de commutation des services mobiles
OMC	Operation and Maintenance Center	Centre d'exploitation et maintenance
VLR	Visitor Location Register	Registre de localisation des visiteurs
GIWU	GSM Interworking Unit	Unité d'inter fonctionnement GSM
GMSC	Gateway MSC	Passerelle GATEWAY
MXE	Message centre	Centre de Messagerie
MSN	Mobile Service Node	Nœud de service mobile

- Le centre d'authentification (AUC) délivre les paramètres d'authentification et de chiffage nécessaire pour contrôler l'identité des utilisateurs de stations mobiles (MS) et pour assurer la confidentialité des appels.
- Le registre d'identification des équipements (EIR) est une base de données contenant des informations d'identification des équipements mobiles destinée à prévenir l'usage illicite des stations mobiles (MS), elle permet par exemple d'établir des listes noires contenant les numéros de terminaux volés. L'EIR est souvent situé dans le même nœud que l'AUC mais peut également être mis en œuvre sous la forme d'un nœud distinct.

- L'ensemble combiné MSC/BSC (contrôleur de station de base) regroupe les équipements MSC/ VLR/HLR et BSC dans une cabine commune facilement déployable.

3.2. Le système de stations de base (BSS, Base Station Subsystem)

Le système de station de base comporte les nœuds suivants :

- ♦ Le contrôleur de stations de base (BSC) est un commutateur de grande capacité, chargé des fonctions radio, comme le handover, la gestion des ressources radio du réseau et la gestion des données de configuration des cellules. Il commande également les niveaux de puissance radiofréquence des (BTS) et des stations mobiles.
- ♦ La station émetteur-récepteur de base (BTS) est l'équipement radio nécessaire à la desserte d'une cellule (selon la norme GSM) L'équipement permettant de desservir un grand nombre de cellules est désigné comme station de base radio (RBS). L'interface de trafic entre le BSC et le BTS est l'interface A-bis. En règle générale, un MSC du système de commutation supervise un ou plusieurs BSC qui, à leur tour, commandent un certain nombre de BTS.

3.3. Système d'exploitation et de soutien (OSS)

Les fonctions d'exploitation et de maintenance sont essentiellement basées sur des logiciels implantés localement dans les nœuds (tels que le BSC et MSC). Il est toujours possible d'accéder à ces fonctions de base à partir de terminaux d'exploitation et de maintenance locaux.

Cependant les tâches d'administration du réseau d'un niveau plus élevé peuvent être effectuées depuis un ou plusieurs centres d'exploitation et de maintenance centralisée (OMC) et/ ou centre de gestion du réseau (NMC), par l'intermédiaire de l'OSS. L'OMC, permet une supervision locale des équipements.

L'OSS constitue le moyen nécessaire à une gestion efficace du réseau au fur et à mesure de la croissance rapide de celui-ci.

Chaque élément d'un réseau GSM (l'OSS désigne comme éléments du réseau des nœuds tels qu'un MSC ou un BSC) comporte des fonctions intégrées de supervision et de signalisation de son état fonctionnel à l'OSS. Les erreurs détectées dans les nœuds sont classées au moyen d'icônes et de symboles en fonction de leur gravité et sont visualisés sur des cartes, sur des stations de travail graphiques raccordées à l'OSS, ce qui simplifie la détermination des actions de maintenance à entreprendre. L'OSS assure également des fonctions de gestion de la configuration du réseau radio ainsi que des fonctions de mesures de trafic radio et réseau, de post-traitement de visualisation et d'élaboration de rapports.

4. Structure géographique du réseau

Chaque réseau téléphonique nécessite une certaine structure pour pouvoir acheminer les appels entrants au central adéquat puis à l'abonné appelé. Cette structure est particulièrement importante dans le cas d'un réseau mobile en raison de la mobilité de tous les abonnés.

♦ La zone de service MSC/ VLR :

Une zone MSC représente la partie du réseau couverte par un MSC (figure 7). Pour acheminer un appel vers un abonné mobile ; il est transmis au travers du réseau au MSC dans la zone duquel l'abonné se trouve à ce moment.

Une zone de service est la partie du réseau définie comme une zone où une station mobile peut être jointe. En raison du fait que la MS est enregistré dans un registre de localisation des visiteurs (VLR). La zone MSC et la zone de service couvrent exactement la même partie du réseau, le MSC et le VLR étant toujours implantés dans le même nœud.

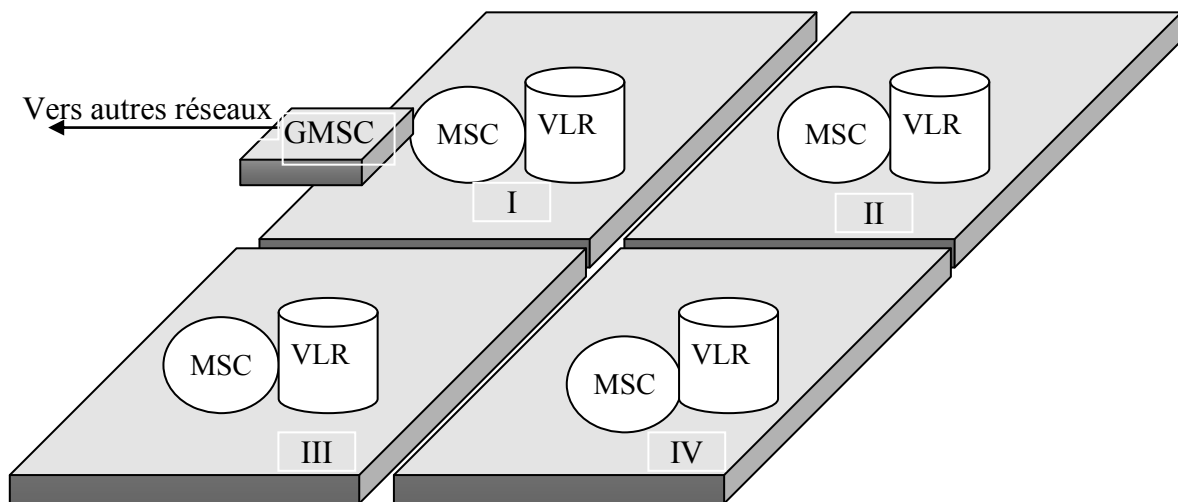


Figure 7. Zone de service MSC/ VLR I à IV

♦ La zone de localisation (LA : Location Area)

Chaque zone de service MSC/ VLR est subdivisée en plusieurs zones de localisation (figure 8). Une zone de localisation (LA) est une partie de la zone de service MSC/ VLR dans laquelle une station mobile peut se déplacer librement sans devoir remettre à jour ses informations de localisation dans le centre MSC/ VLR qui commande la zone de localisation.

Une zone de localisation est la zone où un message de recherche est diffusé pour rechercher un abonné mobile appelé. Une zone de localisation peut comporter plusieurs cellules et dépendre d'un ou plusieurs BSC mais appartient toujours à un seul MSC/ VLR.

La zone de localisation est identifiée dans le système au moyen de l'identification de zone de localisation (LAI : Location Area Identity). Le système utilise la zone de localisation pour rechercher un abonné actif.

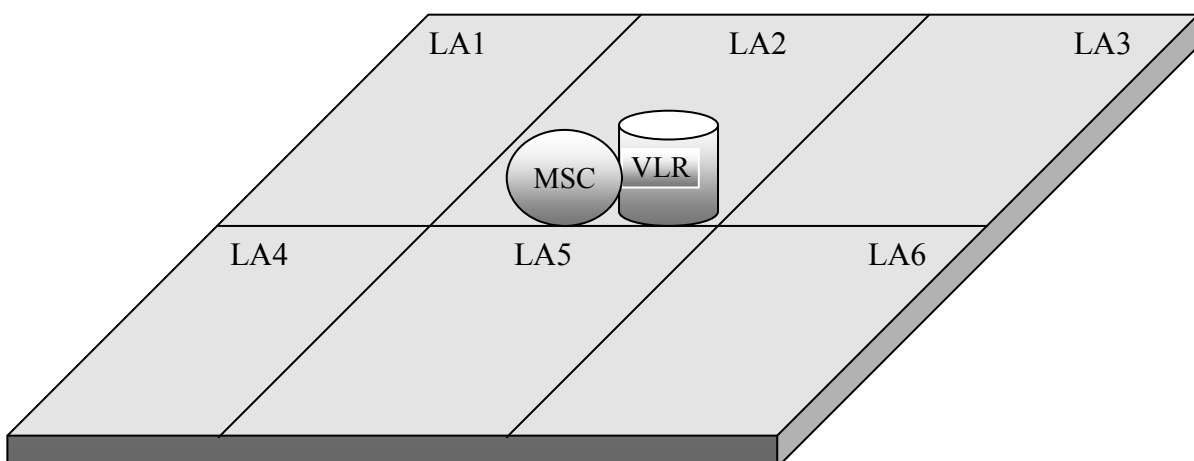


Figure 8. Subdivision de la zone de service MSC/VLR en zones de localisation

♦ La cellule (Cell)

Une zone de localisation est subdivisée en un certain nombre de cellules (figure 9). Une cellule est une zone de couverture radio, identifiée par le réseau au moyen de l'identification globale de cellule. (CGI : Cell Global Identity). La station mobile distingue entre des cellules utilisant les mêmes fréquences porteuses en utilisant le code d'identification de station de base (BSIC : Base station Identity Code).

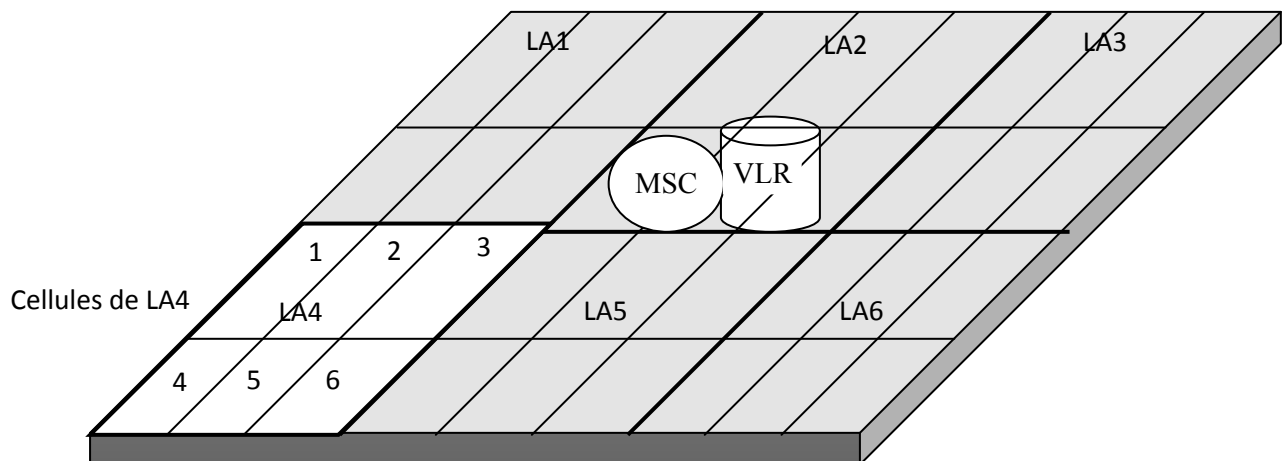


Figure 9. Subdivision de la zone de service MSC/VLR en zones de localisation et cellules

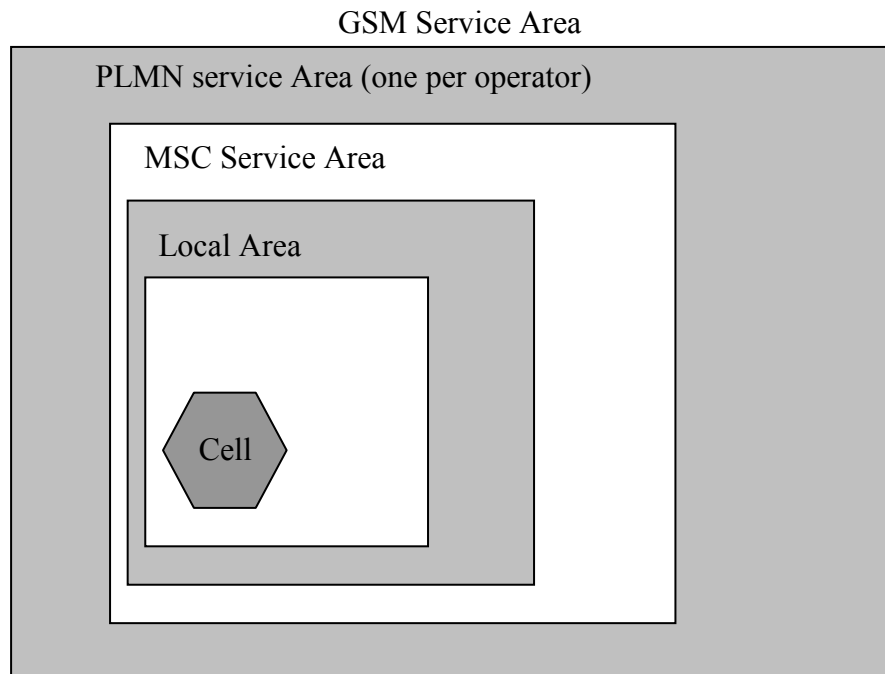


Figure 10. Les rapports entre les différentes zones du GSM

Section III : Transmission sur l'Interface Radio

3.1. Partage des ressources radio

3.1.1 Partage en fréquence (*FDMA*)

3.1.2 Partage en temps (*TDMA*)

3.2. Duplexage 16

3.2.1 Séparation des bandes

3.2.2 Canal physique duplex

3.3. Format du burst

3.4. Chaîne de transmission

3.4.1 Cas de la parole

3.4.2 Transmission de la parole packetée

Section IV: La carte SIM

4.1. La carte SIM

4.2. Fonction de sécurité

4.3. Blocage, déblocage du SIM

4.4. Liste des informations stockées dans la carte SIM

Section V : Handover

3. Transmission sur l'Interface Radio

L'interface radio est une des parties les plus sophistiquées du système; nous allons présenter les caractéristiques de base de cette interface (méthode d'accès et technique de transmission) et de montrer les différents traitements que subit le signal utilisateur lors d'une communication.

3.1. Partage des ressources radio

Un système radio-mobile a besoin d'une partie du spectre radio pour fonctionner. Les concepteurs doivent donc demander une bande de fréquence auprès de l'instance officielle chargée de la gestion du spectre. Pour un système à exigence internationale, la bande est allouée au niveau de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications). La bande dédiée au système GSM est de 890 à 915 MHz pour la voie montante et de 935 à 960 MHz pour la voie descendante; les bandes de fréquence allouées à son extension DCS sont de 1710 à 1785 MHz pour la voie montante et de 1805 à 1880 MHz pour la voie descendante (voir section II).

La bande radio représentant une ressource rare, les défenseurs de la norme doivent l'utiliser à bon connaissance et avec cupidité. Le premier choix architectural a donc été de découper le spectre alloué pour obtenir des canaux physiques qui supporteront une communication téléphonique.

3.1.1. Partage en fréquence (FDMA, Frequency Division Multiple Access)

Chacune des bandes dédiées au système GSM est divisée en 124 canaux fréquentiels d'une largeur de 200 kHz. Sur une bande de fréquence sont émis des signaux modulés autour d'une fréquence porteuse qui siège au centre de la bande. Les fréquences sont allouées d'une manière fixe aux différents BTS et sont désignées souvent par le terme de "porteuses", de plus, il faut contrôler à ce que deux BTS voisines n'utilisent pas des porteuses identiques ou proches (voir section I).

3.1.2. Partage en temps (TDMA, Time Division Multiple Access)

Principe

Chaque porteuse est divisée en intervalles de temps appelés slots. La durée élémentaire d'un slot a été fixée pour la norme GSM sur une horloge à 13 MHz et vaut:

$$T_{slot} = (75/130) \times 10^{-3} s \text{ soit environ } 0.5769 \text{ ms.}$$

Un slot accueille un élément de signal radioélectrique appelé **burst**.

L'accès *TDMA* permet à différents utilisateurs de partager une bande de fréquence donnée. Sur une même porteuse, les slots sont regroupés par paquets de **8**. La durée d'une trame *TDMA* est donc:

$$T_{TDMA} = 8 \times T_{slot} = 4.6152 \text{ ms.}$$

Chaque usager utilise un slot par trame *TDMA*. Les slots sont numérotés par un indice T_N qui varie de 0 à 7. Un "canal physique" est donc constitué par la répétition périodique d'un slot dans la trame *TDMA* sur une fréquence particulière.

Les concepteurs de GSM ont prévus la possibilité de n'allouer à un utilisateur qu'un slot toutes les 2 trames *TDMA*. Cette allocation constitue un canal physique demi-débit par opposition au canal plein débit défini précédemment (voir figure 11).

Implantation du saut de fréquence

L'option du saut de fréquence lent (SFH, Spread Frequency Hopping) semble être intéressante pour augmenter la capacité du système GSM. Le saut de fréquence permet de lutter contre les évanouissements sélectifs, c'est-à-dire une diminution momentanée de la puissance de l'onde radioélectrique lors de la réception, grâce à la diversité en fréquences. Habituellement le saut est activé lorsque la charge du réseau devient importante, il doit alors apporter un accroissement notable des performances.

Lorsque le saut de fréquence lent est activé, un canal physique ne siège pas sur une seule fréquence mais utilise un ensemble de porteuses.

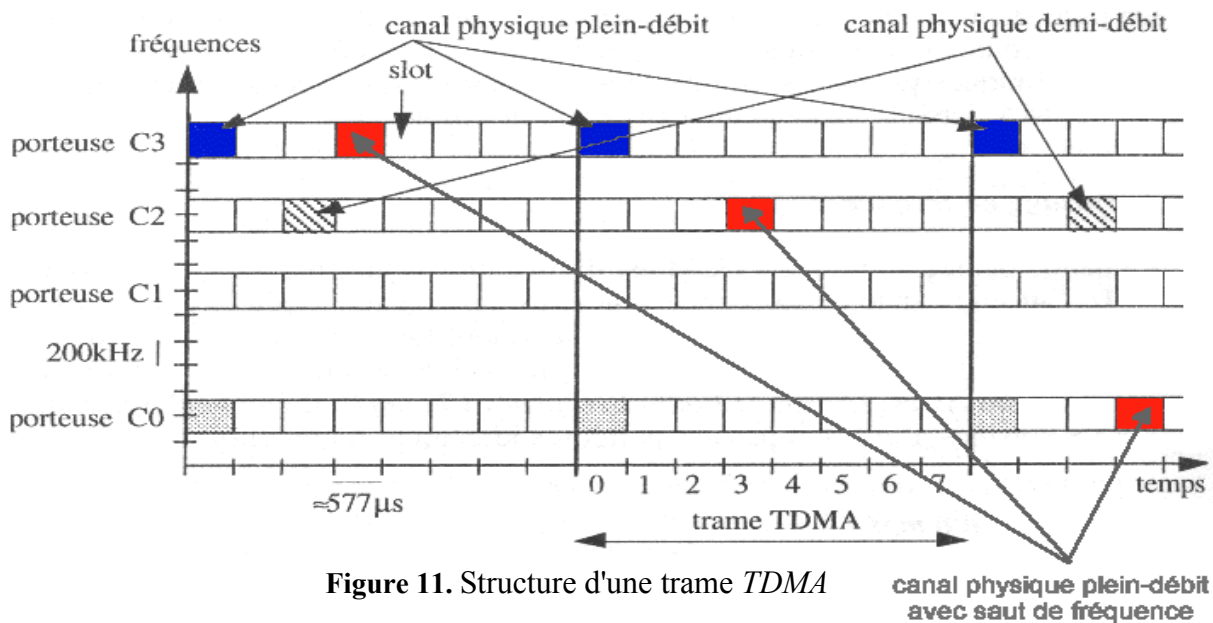


Figure 11. Structure d'une trame TDMA

3.2. Duplexage

3.2.1. Séparation des bandes

Dans le système GSM le duplexage se fait en fréquence. La bande totale allouée au système est divisée en deux sous-bandes d'égale importance; l'intervalle fréquentiel qui les sépare n'est pas attribué au système. Ce partage entre les bandes montantes (**mobile** → **réseau**) et les bandes descendantes (**réseau** → **mobile**) facilite le filtrage et la séparation des voies.

Dans GSM l'écart duplex vaut $\Delta W_{duplex} = 45$ MHz, et dans le cas de DCS1800 il vaut $\Delta W_{duplex} = 95$ MHz (voir section II).

3.2.2. Canal physique duplex

Un canal simplex se rapporte à un slot par trame TDMA sur une porteuse (en l'absence de saut de fréquence). Un canal physique duplex correspond à deux canaux simplex. Si la porteuse supportant la voie descendante est f_d , la voie montante est sur la fréquence f_u :

$$f_u = f_d - \Delta W_{duplex}$$

Un canal physique correspond à la ressource radio qu'il faut utiliser pour supporter une communication téléphonique.

Dans le système GSM un mobile émet et reçoit à des instants différents. Au niveau du mobile, l'émission et la réception sont décalées dans le temps d'une durée de trois slots, mais pour conserver la même numérotation T_N de 0 à 7 de slots, la synchronisation de la trame TDMA montante est aussi décalée de $3 \times T_{slot}$. Ce décalage permet de simplifier le filtre duplex présent dans chaque mobile. Son rôle se réduit à rejeter le signal provenant d'une éventuelle autre BTS émettant pendant une phase de réception du mobile. La figure 12 montre un exemple d'émission-réception en mode duplex.

3.3. Format du burst

Le format d'un **burst** normal est donné par la figure 13, c'est le type le plus couramment utilisé, il permet de transmettre **114 bits**. On remarque qu'il y a une période de garde de **30.5 µs** correspondant à la différence de durée entre un **burst** et un slot, ce délai sert à compenser les temps de transmission entre le mobile et la station de base (BTS).

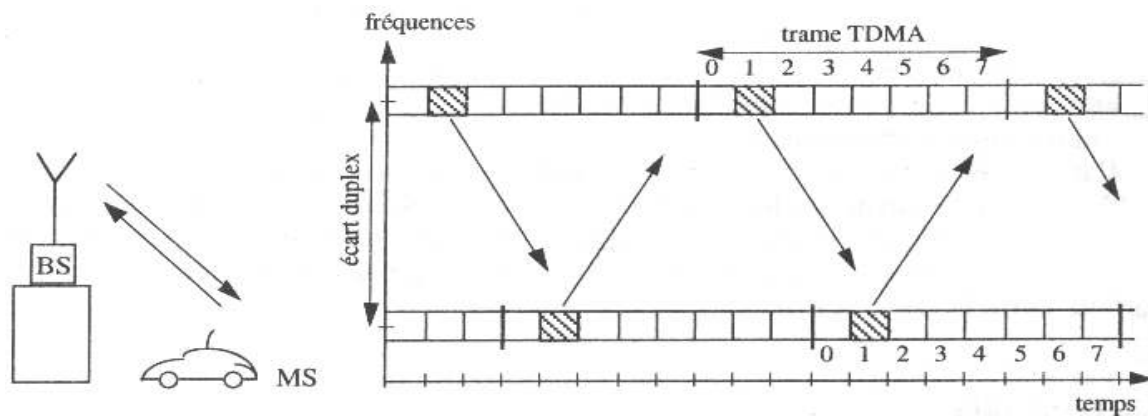


Figure 12. Emission-réception entre une MS et une BTS en duplex

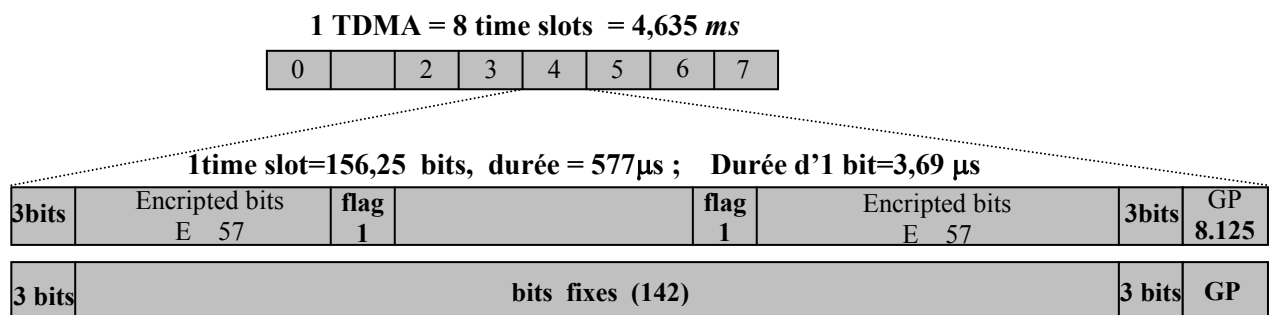


Figure 13. Structure d'un Burst

3.4. Chaîne de transmission

3.4.1. Cas de la parole

La chaîne de transmission qui correspond à la transmission d'un signal de la parole est décrite par la figure 14.

D'après la théorie des télécommunications, la transmission d'une source d'information sur un canal doit mettre en œuvre un codage de source (compressif) et un codage de canal (protecteur) efficaces. Les techniques cryptographiques permettent d'assurer un service de confidentialité sur un canal de transmission diffusant où des écoutes indiscretes peuvent être entreprises.

3.4.2. Transmission de la parole paquetées

On peut présenter d'une façon synoptique les différents traitements que subit une trame de 20 ms de parole :

Le signal analogique de la parole, dans le cas du signal téléphonique ordinaire, peut être vu comme une fonction du temps $x(t)$ avec un spectre limité à la bande $[300 \text{ Hz}, 3400 \text{ Hz}]$. Il est découpé en intervalles jointifs de durée 20 ms. Chaque intervalle est numérisé, comprimé (par le codec de parole), protégé pour aboutir à une trame codée, appelée bloc, de 456 bits. Le codage s'effectue paquet par paquet et cette paquetage introduit un délai de 20 ms. En effet pour traiter un morceau de 20 ms il faut l'avoir reçu complètement.

Une fois obtenu le bloc de la parole numérisé, comprimé et protégé, il faut le transmettre. Pour cela on a recours à l'entrelacement. On peut prendre l'exemple des 456 bits de la trame codée de la parole : ces bits sont brassés et divisés en I groupes où I représente le degré d'entrelacement. Ici, I vaut 8 on va donc transmettre les 456 bits en 57×8 bits. Ces huit **demi-burst** sont numérotés de 0 à 7. Chaque sous-bloc est associé avec un sous-bloc de la trame de parole précédente (pour les sous-blocs 0, 1, 2 et 3) ou de la trame suivante (pour les sous-blocs 4, 5, 6 et 7, voir figure 15).

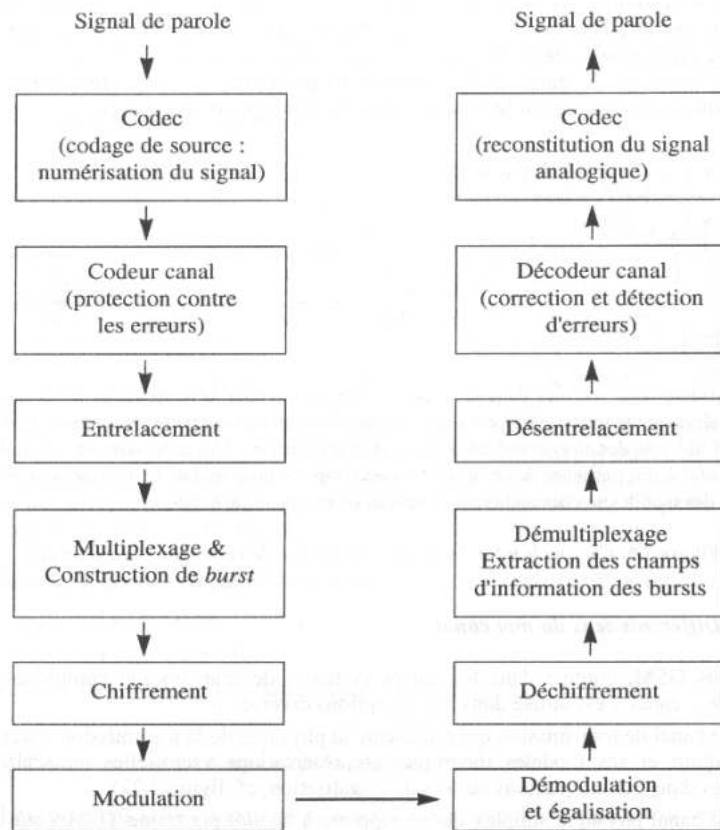


Figure 14. Chaîne de transmission du signal de la parole

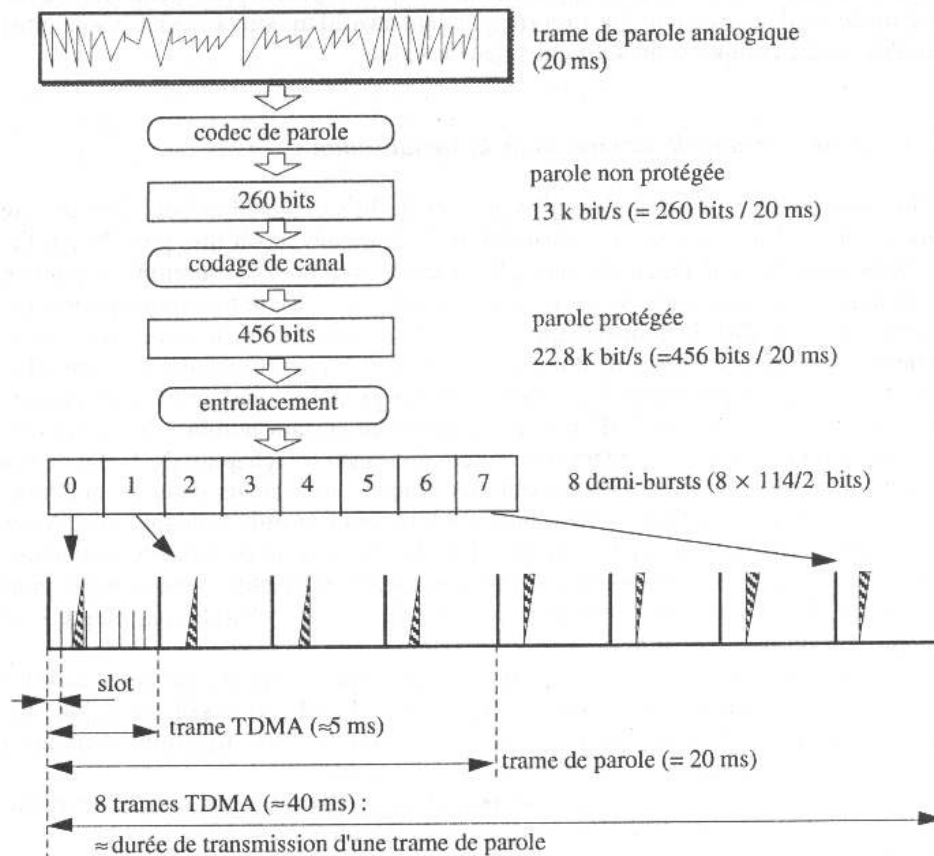


Figure 15. Paquetage d'un segment de parole

La carte SIM est le module ou entité fonctionnelle GSM contenant toutes les données concernant un abonné et notamment les processus d'authentification et les informations relatives à l'abonnement.

4.1. Caractéristiques générales

Format

Il existe deux types de carte SIM qui ne diffèrent que par leur taille. La carte SIM-IC (Integrated Circuit) a la taille d'une carte de crédit. Elle est conforme aux normes ISO et peut être insérée et retirée plus rapidement d'un mobile qu'une carte SIM-plug-in (figure 16). La carte SIM-plug-in (ou Mini SIM) est de petite taille. La particularité de cette carte est d'être utilisée de façon quasi permanente dans un terminal portatif donné. Son insertion/retrait dans un mobile est en effet moins immédiate que la première carte.

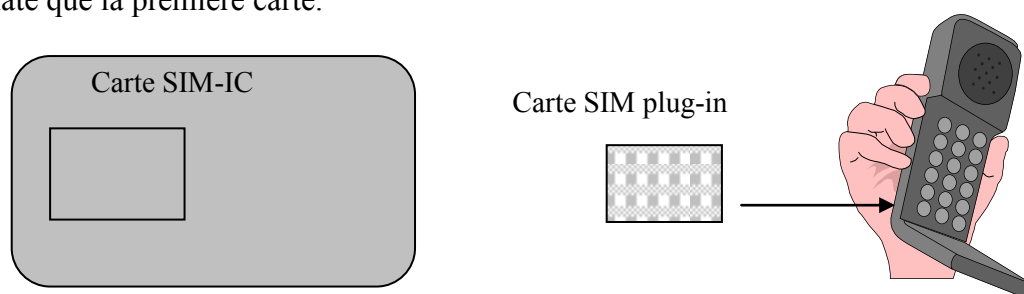


Figure 16. Formats des cartes SIM

4.2. Fonctions de sécurité

La carte SIM contient de nombreux paramètres de sécurité. Comme toute carte à puce, elle possède un ensemble de clés permettant de sécuriser les étapes de personnalisation par les différents intervenants (fabricants, opérateurs,...). La carte contient :

- un algorithme d'authentification A_3 .
- une clé d'authentification d'abonné K_i .
- un algorithme de génération de clé de chiffage A_8 .
- une clé de chiffage K_c .
- IMSI (International Mobile Subscriber Identity) Identification Internationale d'abonné mobile.
- informations de localisation.

Remarque :

Toutes les informations relatives à l'abonné transmises à l'équipement mobile lors de son fonctionnement doivent être effacées après extraction du SIM ou mise à l'arrêt du MS.

Parmi ces informations on trouve les codes PIN (**Personal Identification Number**) ou Numéro Personnel d'identification et PUK (**Personal Unlock Key**) ou clé personnelle de verrouillage.

Le code PIN est utilisé pour identifier l'abonné. Il s'appelle aussi code CHV1 (**Card Holder Verification 1**). Il se compose de 4 à 8 chiffres. Un PIN initial est chargé à la mise en service initiale au stade de la souscription de l'abonnement. Ensuite le PIN et sa longueur peuvent être modifiés par l'utilisateur aussi souvent qu'il le souhaite. L'utilisateur peut décider d'utiliser ou non la fonction PIN au moyen de la fonction 'mise hors fonction du PIN'. Cette dernière reste valable jusqu'à ce que l'utilisateur remette explicitement en fonction le contrôle du PIN.

L'utilisateur reçoit une indication en cas d'introduction d'un code PIN erroné. Le SIM se bloque après trois tentatives erronées successives même si entre temps le SIM a été enlevé ou le MS mis à l'arrêt.

4.3. blocage, déblocage du SIM

Le blocage du SIM intervient lorsque l'utilisateur entre un code erroné un certain nombre de fois. Le blocage consiste à placer la carte SIM dans un état interdisant toutes les actions sur la station mobile. Le déblocage n'est possible que par utilisation d'une clé de déblocage. Les clés de déblocage appelées PUK (**unblocking key**) se composent de 8 chiffres. L'utilisateur reçoit une indication en cas d'introduction d'un chiffre erroné. Le SIM se bloque après 10 introductions erronées successives même si entre temps le SIM a été enlevé ou le MS mis à l'arrêt.

4.4. Informations stockées dans la carte SIM

Les informations à mémoriser peuvent être subdivisées en deux catégories : obligatoires et facultatives.

4.4.1. *Mémorisation obligatoire*

Le SIM doit permettre de mémoriser les informations suivantes :

- Informations administratives : ce paramètre permet d'autoriser plusieurs modes opératoires du mobile, par exemple l'opérateur peut configurer des cartes SIM pour le test du réseau.
- Identification de la carte à puce : numéro exclusif identifiant le SIM et l'émetteur de la carte.
- Table de service SIM : indique les fonctions optionnelles autorisées par l'abonnement et activées par l'utilisateur.
- Identification internationale d'abonné mobile IMSI, C'est un numéro qui identifie de façon exclusive un abonné d'un réseau public mobile GSM, elle est utilisée pour toute la signalisation dans le PLMN. Elle est mémorisée dans le module d'identification de l'abonné (SIM), dans le registre de localisation de rattachement HLR et dans le registre de localisation des visiteurs VLR.
- Information de localisation : Cet enregistrement comprend TMSI, LAI, valeur actuelle de la temporisation de mise à jour périodique de la localisation et état de la mise à jour. TMSI : Identité provisoire d'abonné mobile. Le TMSI est utilisé pour assurer la confidentialité de l'abonné. Le TMSI n'ayant qu'une signification locale (c.-à-d. à l'intérieur de la zone MSC/ VLR), sa structure peut être déterminée librement pour chaque opérateur. Le TMSI ne doit pas comporter plus de quatre octets. Le TMSI est attribué uniquement pour la zone gérée par le VLR courant du mobile.
- Liste des fréquences parmi lesquelles le mobile recherche préférentiellement une voie lorsqu'il doit sélectionner une cellule courante et permet de réduire le temps de recherche.
- Liste des quatre réseaux les plus récents sur lesquels l'inscription a été tentée et interdite.
- Clé de chiffrement Kc.
- Un dernier fichier permet de numéroté une liste de langues préférentielles que le terminal utilise pour l'interface homme machine. Ce fichier permet à un terminal de présenter automatiquement les écrans dans la langue de l'abonné. L'utilisateur a cependant la possibilité de changer la langue par défaut.

4.4.2. *Mémorisation facultative*

- Type de messages court que le mobile accepte.
- Nom du fournisseur et de service.
- Plusieurs fichiers sont liés aux services supplémentaires d'indication de facturation : compteurs d'unités, table du prix de l'unité.

4.4.3. *Données de sécurité*

- PIN : mot de passe personnel de l'abonné.
- Indicateur d'activation/ désactivation du PIN.
- Compteur d'erreurs d'introduction du PIN.

- Clé de déblocage (PUK).
- Compteurs d'erreurs d'introduction du PUK.
- Clé d'authentification.

4.5. Handover ou Hand-off

En termes GSM, le processus de changement de cellule pendant un appel s'appelle 'handover'. Le **MS** et le **BTS** effectuent des mesures visant à déterminer la meilleure cellule de destination. Le fait que **MS** participe à la décision de handover est appelé : 'Mobile Assisted Handover' (handover assisté par le mobile. Les mesures effectuées par le MS et le BTS sont traitées dans le BSC. Ce processus d'évaluation est appelé 'locating'.

4.6. Localisation (Locating)

Le MS mesure en permanence l'intensité et la qualité du signal reçu (BER : Bit Error Rate : taux d'erreur sur les bits) dans sa propre cellule ainsi que l'intensité du signal sur les porteuses BCCH des cellules voisines. Ceci est effectué lorsque le MS est occupé. Les résultats des mesures sont transmis au BTS sur le canal SACCH (canal de commande associé lent).

BCCH : Canal de commande de diffusion (Broadcast Control Channel). Les informations qui sont diffusées sur ce canal, sont des informations concernant la cellule et ce canal contient les informations suivantes :

- la puissance d'émission (Max et Min) pour le MS.
- minimum de puissance reçue.
- les fréquences (porteuses) des cellules adjacentes.
- numéro de la zone de localisation (LAI).

SACCH : Canal de commande lent associé (slow associated control Channel) Les canaux est un canal de contrôle associé à faible débit appelés. Cas uplink : Le MS envoie des mesures moyennes sur sa propre station de base (intensité et qualité du signal) et sur les stations de base adjacentes. Cas downlink : Le MS reçoit des informations concernant la puissance d'émission à utiliser ainsi que des instructions sur l'avance de synchronisation.

Le BTS desservant mesure l'intensité et la qualité du signal sur la liaison montante (uplink). Les mesures du BTS et celles du MS sont transmises aux BSC sous la forme de rapport de mesure toutes les 480 ms.

Sur la base de ces rapports, le BTS détermine si un handover est nécessaire et si oui vers quelle cellule ceci est appelé 'locating'. Une tentative de handover est entreprise dès que l'une des cellules voisines devient meilleure que la cellule courante.

Lorsque le MS a changé de cellule, le nouveau BTS informe le MS des nouvelles porteuses BCCH adjacentes pour lui permettre de continuer à effectuer des mesures. Si le MS a également changé de zone de localisation, une mise à jour de localisation, de type normal est effectuée après la fin de l'appel.

4.7. Types de Hand-off

4.7.1. Handover entre cellules commandées par le même BSC.

Le MSC/VLR n'est pas concerné par la procédure de handover entre deux cellules commandées par le même BSC, mais informe de l'exécution du handover. Si le handover a été

effectué entre des cellules appartenant à des LA différentes, une procédure de mise à jour normale de la localisation est effectuée mais seulement après la fin de l'appel.

4.7.2. Handover entre cellules commandées des BSC différents avec même MSC

Lorsque la procédure de handover fait appel à un autre BSC, il faut y faire participer le MSC/VLR pour établir la liaison entre les deux BSC.

4.7.3. Handover entre cellules commandées par des MSC/VLR différents

Le handover entre cellules commandées par des MSC/VLR différents peut être réalisé seulement dans un même pays et un même réseau public mobile (réseau d'un même opérateur). Les cellules étant commandées par des MSC/VLR différents, elles sont également commandées par des BSC différents.

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

2^{ème} LMD Télécommunication

S4

Chapitre 4 : Transmissions par Voies Hertziennes FH

Section I : Définitions et Caractéristiques Générales des Faisceaux Hertziens

Section II : Puissance Rayonnée par une Source Isotrope et Gain d'une Antenne

Section III : Atténuation en Espace Libre AEL

Section IV : Ellipsoïde de Fresnel

1^{ère} Section :

Définitions et Caractéristiques Générales des Faisceaux Hertziens

Un faisceau hertzien est une liaison haute fréquence "point à point" destinée à véhiculer sur une porteuse harmonique un signal analogique ou un signal numérique, enfermé dans un ellipsoïde de Fresnel (4^{ème} section) comme il est représenté sur la figure. 1.

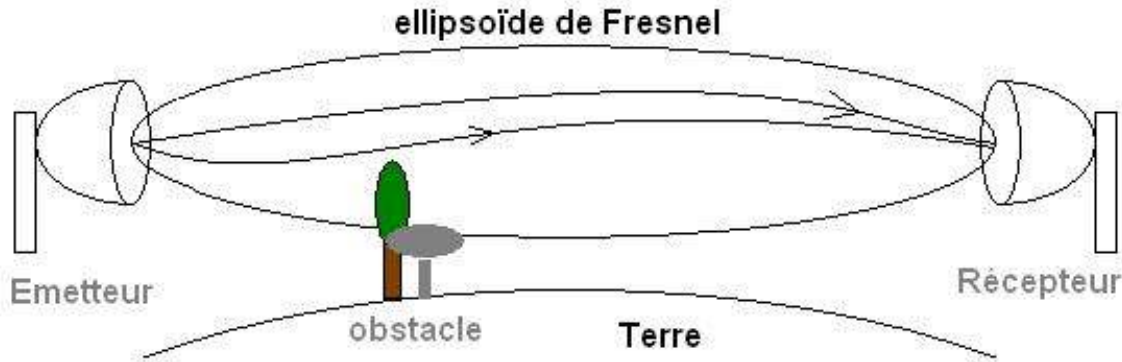


Figure 1: Liaison en visibilité (vue directe)

- **Hautes fréquences** : ce sont les fréquences allant approximativement de 300 kHz à 30 GHz.
- **point à point**: signifie que le tir du faisceau est dirigé de l'émetteur (fixe ou mobile) vers un récepteur bien ciblé, en général fixe, contrairement au broadcasting qui "arrose" l'espace pour atteindre une infinité de récepteurs (exemple : émetteur radio, TNT, WiFi).

Afin de concentrer ce tir, le dipôle émetteur est placé au foyer d'une parabole, de même pour augmenter sa sensibilité, le dipôle récepteur est lui aussi placé au foyer d'une parabole ainsi pour franchir certains obstacles naturels, arbres, reliefs, bâtiments, rotondité de la Terre sur les distances > 5 km. Les paraboles sont surélevées par rapport au sol à l'aide de mats métalliques (voir figure 2.), ou montées aux sommets de promontoires naturels. Voici ci-dessous un mât hertzien constitué de son pylône (poteau) et équipé de paraboles d'émission et/ou de réception, certaines sont équipées d'un radôme (radar-dôme¹) qui protège le dipôle des intempéries, la parabole en bas à droite présente un dipôle non protégé suspendu par des bracons (sustentes le liant à la parabole).

- **La porteuse**: c'est une onde électromagnétique entretenue le temps de l'émission c'est elle qui est caractérisée par la fréquence :
 - en VHF cette fréquence va de 30 à 300 MHz.
 - en UHF de 300 MHz à 3 GHz.
 - en SHF de 3 à 30GHz.
 - en EHF (ondes millimétriques) de 30 à 300 GHz (typiquement de 37,5 à 40 et de 50 à 60 GHz pour les FH militaires) et comme elle vibre selon une loi sinusoïdale $E = E_0.e^{j\omega t}$, on la nomme de porteuse harmonique le schéma de la figure.3 représente sa structure spatio-temporelle.

¹ **radôme**, nom masculin Grand dôme dans lequel est placé un radar

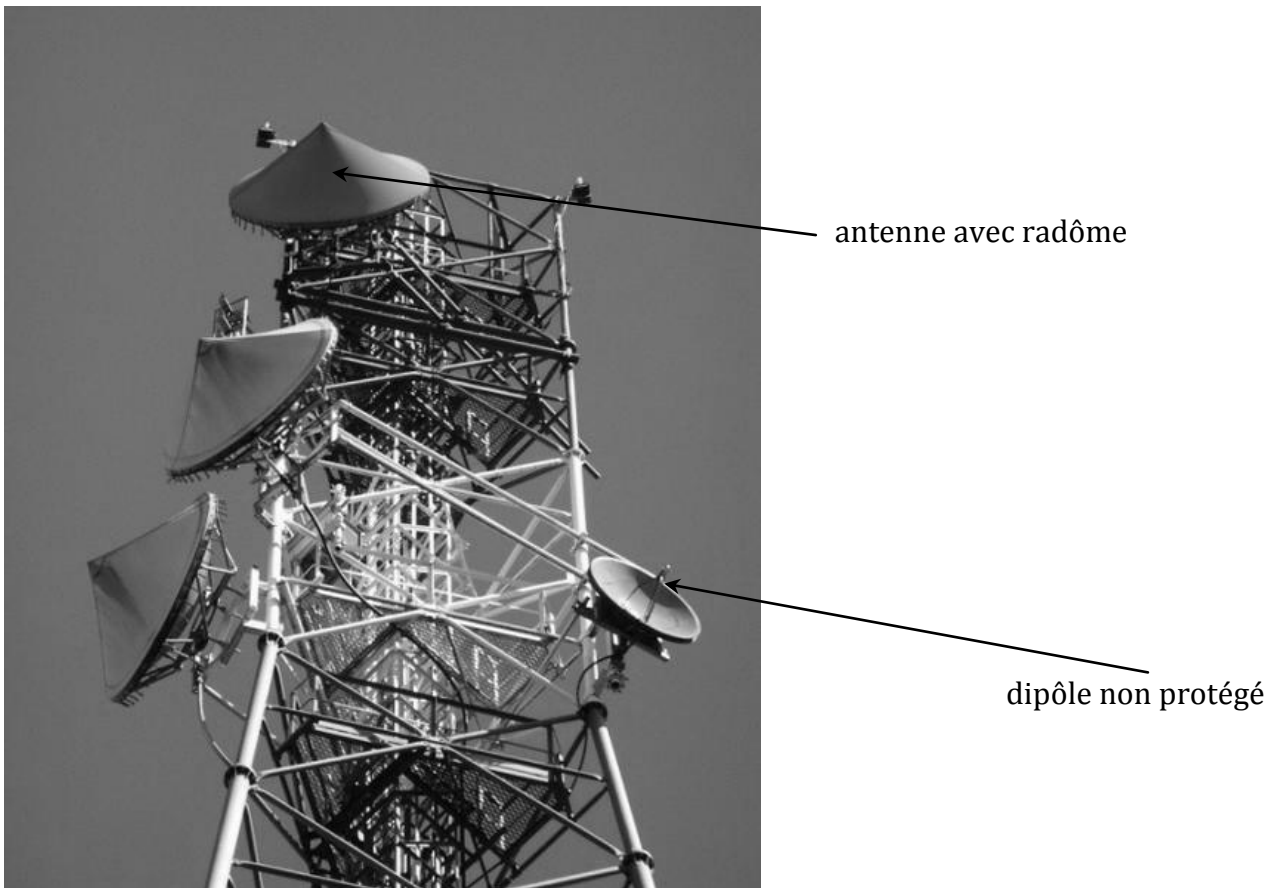


Figure 2: exemple de mât hertzien (origine : internet)

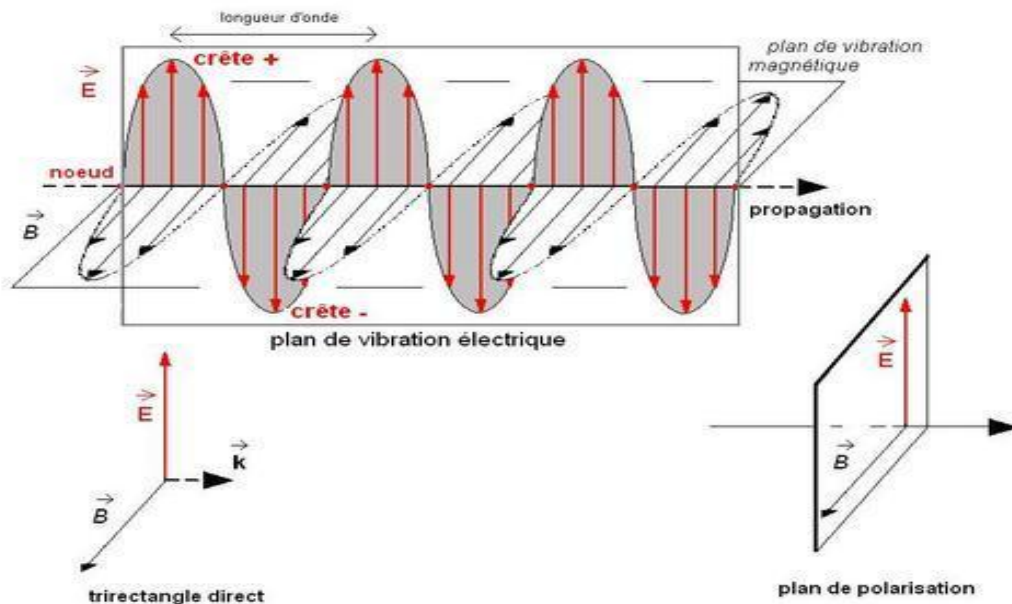


Figure 3: Structure spatio-temporelle d'une onde électromagnétique

- **Le signal** : c'est l'information qui va se superposer, se combiner à la porteuse il peut être analogique (modulation d'amplitude AM ou de modulation de fréquence FM), mais il est de plus en plus souvent numérique (modulation de type MDP ou modulation MAQ)

un signal numérique est bien plus facile à crypter (communications confidentielles ou classifiées) qu'un signal analogique, de plus sa qualité de réception est bien meilleure à faible puissance émise.

- **Ellipsoïde de Fresnel** : zone de l'espace rejoignant le centre de l'émetteur au centre du récepteur caractérisé par le fait que l'ensemble des rayons qui se propagent à l'intérieur de son enveloppe (en forme d'ellipsoïde) ne se détruisent pas mutuellement par interférence; le rendement en puissance transmise y est optimal.

2^{ème} Section :

Puissance Rayonnée par une Source Isotrope et Gain d'une Antenne

1. Puissance Emise et Reçue en FH

La technique du Faisceau Hertzien repose sur deux puissances:

- la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) d'une antenne rayonnante de gain connu.
- les puissances reçues par les antennes de réception de gain connu.

Afin de comprendre les définitions du gain et les calculs correspondant, une approche physique est préalablement nécessaire: **le modèle de la propagation isotrope**. Nous allons placer un capteur à une distance " d " d'une source isotrope et nous nous préoccupons de connaître le nombre de photons que ce capteur reçoit par unité de temps.

Nous serons ainsi à même de pouvoir utiliser un "mesureur de puissance " fort utile pour caractériser les rayonnements reçus. Afin de simplifier le phénomène, nous utiliserons de plus le modèle "photonique" de la lumière transformant ainsi les mesures de puissances en simple opération de comptage. A cet égard, rappelons que le photon transporte une énergie proportionnelle à la fréquence du rayonnement considéré $E = h \cdot f$ (loi de Planck-Einstein) avec: f = fréquence en Hz et $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s (constante de Planck).

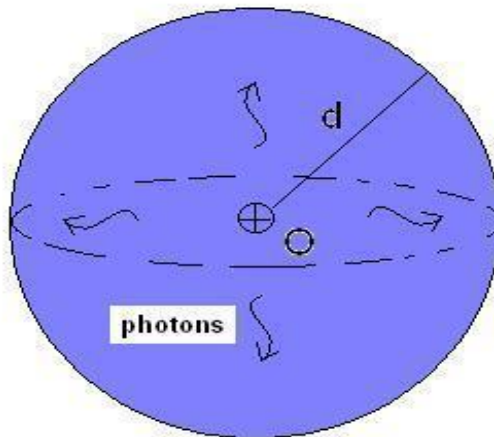
1.1. Les lois du rayonnement isotrope

Figure 4: la sphère photométrique.

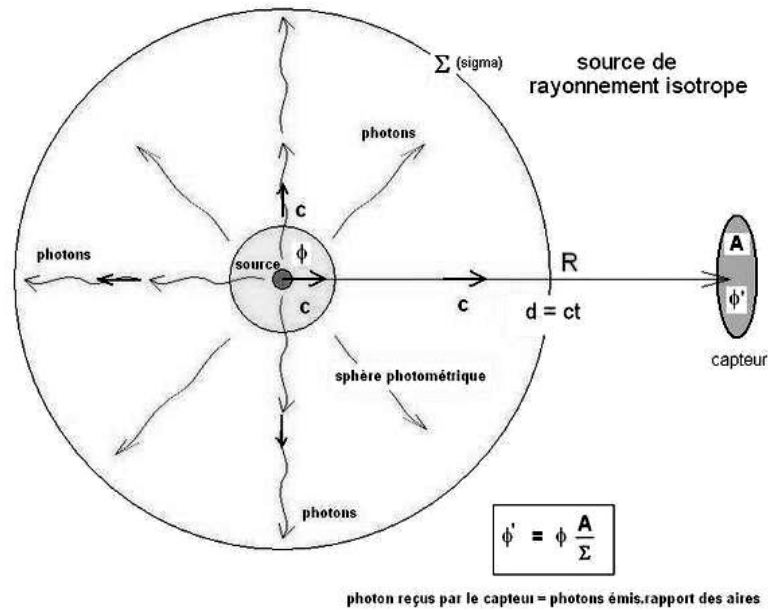
1.1.a. Puissance rayonnée par la source :

Lorsqu'une source de rayonnement distribue uniformément dans l'espace ses photons, ceux-ci occupent, au fur et à mesure de leur propagation une sphère de rayon d croissant avec le temps : **la sphère photométrique**.

Soit une source ponctuelle S qui émet chaque seconde un nombre de photons constant et nommons ce nombre: " Φ " (unité: s^{-1}). La puissance émise par cette source sera donc $P = \Phi \cdot E$.

1.1.b. Puissance reçue par le capteur d'aire " A " placé à une distance " d " de la source :

Abordons maintenant le calcul de la puissance reçue par le capteur, et explorons en premier lieu la figure suivante :



Les photons émis par la source couvrent la totalité de la sphère photométrique (distribution isotrope). Définissons une nouvelle grandeur caractérisant la densité du rayonnement, la densité surfacique de photons η traversant chaque seconde la sphère photométrique avec :

$$\Sigma = 4.\pi.d^2 \text{ (aire de la sphère), écrivons: } \eta = \Phi/\Sigma, \text{ on obtient: } \eta = \Phi/4.\pi.d^2 \text{ } ^2\text{unité. s}^{-1}.\text{m}^{-2}$$

Voyons maintenant ce qui se passe au niveau du capteur, celui ci a une aire de réception A traversée par la densité η de photons cela signifie qu'il reçoit à chaque instant la quantité " Φ' " de photons suivante:

$$\Phi' = \eta.A \text{ soit } \Phi' = \Phi.A/4.\pi.d^2$$

Notre capteur reçoit donc, une puissance : $P_r = \Phi'.E$, soit en utilisant la relation $P = \Phi.E$, on obtient alors :

$$P_r = P.A/4.\pi.d^2$$

Exemple :

une source délivre une puissance $P = 1 \text{ kW}$, un capteur est placé à une distance $d = 1 \text{ km}$ et a une surface équivalente $A = 1 \text{ dm}^2 = (0,01 \text{ m}^2)$. La puissance reçue par le capteur est :

$$P_r = 10^3.0,01/[4.3,14.(10^3)^2] = 8.10^{-7} \text{ W} = 0,8 \text{ } \mu\text{W}$$

Comme on le voit, cette valeur est extrêmement faible par rapport à la puissance émise! C'est pour cette raison, qu'en terme de communication hertzienne grande portée et à niveau de puissance suffisant, nous allons être amenés à concentrer dans l'espace la puissance émise, et donc à abandonner la propagation isotrope.

1.2. Généralités sur les Antennes

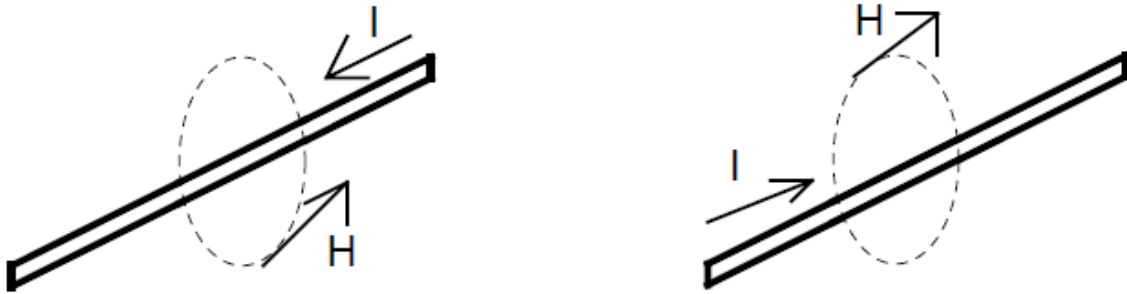
1.2.1. Introduction

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

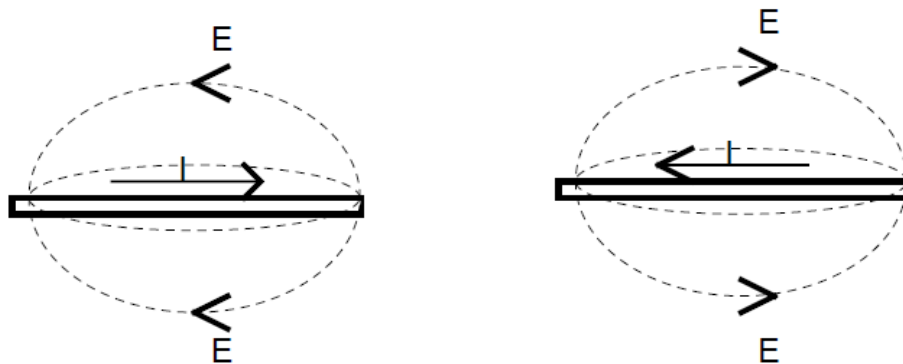
² comme on le remarque η diminue avec la distance d (loi de décroissance photométrique); Lorsque la distance double, η se divise par 4, ce qui explique que l'éloignement d'une source entraîne la décroissance très rapide de la densité des photons reçus.

électromagnétique en courant électrique induit. La même antenne peut souvent servir à émettre ou capter selon qu'elle est alimentée ou non en courant.

Un conducteur dans lequel passe un courant I produit dans son entourage un champ magnétique dont l'intensité décroît en fonction de la distance du conducteur et, compte tenu de la direction, perpendiculaire à celle du conducteur. La figure ci-dessous illustre ce propos :



D'autre part, un courant circulant dans un conducteur correspond à un déplacement de charges à l'intérieur de ce conducteur. On peut considérer que l'effet provoqué par le courant est d'accumuler des charges positives à une des extrémités du conducteur et des charges négatives à l'autre extrémité. Celles-ci donnent alors naissance à un champ électrique. (voir figure ci-dessous).



Il existe donc des champs électriques et magnétiques perpendiculaires l'un à l'autre dans l'entourage du conducteur. Si ces champs varient dans le temps, cas où le conducteur est alimenté par une source alternative nous aurons une onde électromagnétique se propageant perpendiculairement aux champs.

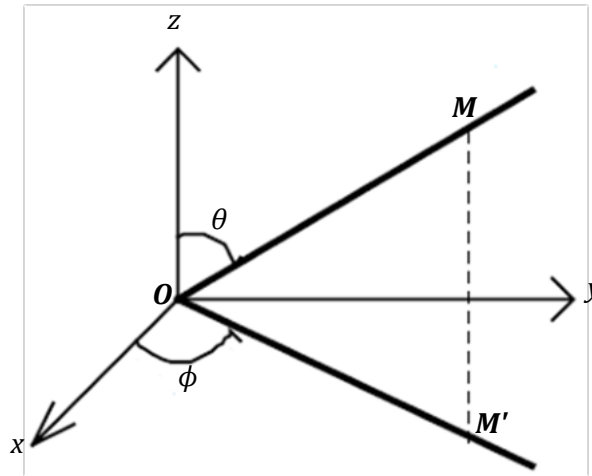
Tout fil électrique dans lequel passe un courant est une antenne d'émission et tout fil électrique peut servir d'antenne de réception. La portée de la radiation émise par un fil électrique dépendra de la puissance électrique mise en jeu. La qualité d'une antenne dépendra non seulement de la puissance mise en jeu mais de sa résistance, de sa longueur et d'autres paramètres.

Une antenne maintenue horizontalement propagera une onde électromagnétique à polarisation horizontale, tandis qu'une antenne maintenue verticalement propagera une onde électromagnétique à polarisation verticale.

Du fait que la terre est conductrice, on évite la polarisation horizontale dans les fréquences VLF, LF, MF et, quelquefois HF. Pour les plus hautes fréquences, on utilise la polarisation horizontale car la majorité des bruits électromagnétiques d'origine industrielle sont polarisés verticalement.

1.2.2. Antenne de référence

L'antenne de référence est une source isotrope. Elle est constituée par un point rayonnant de l'énergie dans toutes les directions de façon identique. Elle est utilisée comme source de référence.



Soit P_t la puissance rayonnée. Si l'amplitude en O est A , au point M , on retrouvera une amplitude A_M à l'instant, $t + R/C$ (C est la vitesse de propagation de l'onde) et un déphasage $\varphi = \frac{2\pi.R}{\lambda_0} = k.R$, avec $R = OM$ et k le **nombre d'ondes**, est le rayon de la sphère de centre O . Dans la direction OM , la densité de puissance rayonnée par unité d'angle solide est : $P_1 = \frac{P_t}{4\pi}$ en w/stéradian (angle solide en stéradian, 4π pour la totalité de l'espace). Pour cette raison la source ponctuelle sera également appelée **source isotrope**. sur une sphère de rayon R , si $R \gg \lambda_0$, la densité surfacique de puissance rayonnée sera : $P_2 = \frac{P_t}{4\pi.R^2}$ en w/m², si E est l'amplitude du champ en un point quelconque de la sphère de rayon R , le théorème de Poyting donne la relation entre le champ électrique et puissance rayonnée : $P_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{E^2}{120.\pi}$.

Donc, on peut déduire le champ E :

$$E = \frac{\sqrt{60.P_t}}{R} \text{ en V/m} \quad (1)$$

La phase retardée de $\frac{2\pi.R}{\lambda_0}$ par rapport à la phase à l'origine O , l'expression du champ E en M est donc :

$$E = \left(\frac{\sqrt{60.P_t}}{R} \right) \cdot e^{-jkR} \quad (2)$$

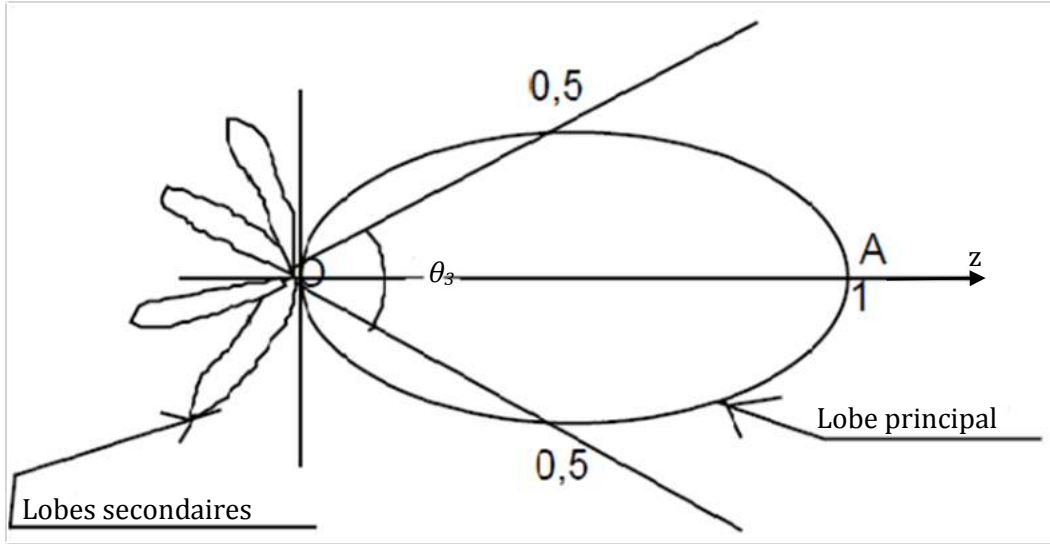
Ce champ est le même en amplitude et en phase sur toute la sphère de rayon R (surface équiphasé).

1.2.3. Antenne réelle

Une antenne réelle ne rayonne pas de façon isotrope. Soit une antenne dont le centre de phase est en O (voir figure précédente) et soit une direction OM définie par les angles θ et ϕ . Dans cette direction la puissance rayonnée par unité d'angle solide est $P(\theta, \phi)$. Il existe quelque part une direction où cette fonction présente un maximum, soit : $P_{max} = P(\theta_0, \phi_0)$. Considérons le rapport :

$$r(\theta, \phi) = P(\theta, \phi) / P_{max} \quad (3)$$

dont la valeur maximale est l'unité. Par définition, la variation de $r(\theta, \phi)$ en fonction de θ et de ϕ est appelée le **diagramme de rayonnement** de l'antenne. Le diagramme de rayonnement ci-dessous, dans le plan θ représente l'allure générale de la distribution de puissance rayonnée normalisée à l'unité (souvent on cherche à concentrer l'énergie dans une direction déterminée).



Le lobe se trouvant autour de Oz , direction du maximum de rayonnement, est appelé le **lobe principal** et contient la quasi-totalité de la puissance rayonnée. De part et d'autre de celui-ci apparaissent des **lobes secondaires** ou **latéraux**, que l'on s'efforce de réduire au mieux et qui sont séparés par des minima très marqués.

1.2.4. Caractéristiques d'une antenne

Parmi les caractéristiques les plus connues d'une antenne, on peut citer :

A. Directivité et gain :

La directivité d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport de la densité de puissance rayonnée dans cette direction soit $P(\theta, \phi)$ à la densité de puissance qui serait rayonnée par une source isotrope rayonnant la même puissance totale P_t que l'antenne considérée. La directivité est donnée donc :

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_1} = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_t}{4\pi}} = 4\pi \cdot \frac{P(\theta, \phi)}{P_t} \quad (4)$$

En appelant $d\Omega$ l'élément d'angle solide, on a :

$$P_t = \int_0^{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega \quad (5)$$

ce qui donne avec l'équation (4) :

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \cdot \frac{P(\theta, \phi)}{\int_0^{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega} \quad (6)$$

Ce qui est intéressant de connaître en télécommunications et radar, c'est la directivité D dans la direction du maximum de rayonnement. l'équation (6) devient alors :

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \cdot \frac{P_{max}}{\int_0^{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega} \quad (7)$$

$$\text{ou encore : } D(\theta, \phi) = 4\pi \cdot \frac{P_{max}}{\int_0^{4\pi} P_{max} \cdot r(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} r(\theta, \phi) d\Omega} \quad (8)$$

On voit donc que la directivité ne dépend que du diagramme de rayonnement.

On connaît la puissance d'alimentation de l'antenne P_a , $P_a = P_t + \text{Pertes}$, le rendement de l'antenne ou coefficient d'efficacité est donnée par :

$$\eta = P_t/P_a \leq 1 \quad (9)$$

Si on remplace P_t par P_a dans l'équation (4) on obtiendra au lieu de $D(\theta, \phi)$ une quantité $G(\theta, \phi)$ appelée gain dans la direction (θ, ϕ) soit,

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \cdot \frac{P(\theta, \phi)}{P_a} = 4\pi \cdot \frac{P(\theta, \phi)}{P_t} \cdot \eta = \eta \cdot D(\theta, \phi) \quad (10)$$

on aussi écrire :

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \cdot \frac{\eta}{\int_0^{4\pi} P(\theta, \phi) d\Omega} \quad (11)$$

B. Réciprocité :

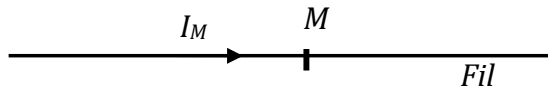
Un signal , d'amplitude V_A appliqué au point A d'une antenne 1, donne un signal V_B au point B d'une antenne 2, et réciproquement le fait d'appliquer V_A au point B donnera V_B au point A.



Conséquence: si l'antenne fonctionne en émission et présente alors un gain G_e et une impédance Z_e , la même antenne, fonctionnant en réception présentera un gain $G_r = G_e$ et une impédance $Z_r = Z_e$. En particulier, **une antenne de réception doit être adaptée en émission**, car sinon une partie de la puissance reçue est ré-rayonnée dans l'espace.

C. Résistance de rayonnement :

Soit le fil d'antenne,



En un point M du fil, il existe un courant I_M tandis que la puissance rayonnée est P_t . Comme il s'agit de puissance réelle, tout se passe comme s'il apparaissait en M une résistance fictive R_M telle que:

$$P_t = R_M \cdot I_M^2$$

Dans la direction privilégiée $r(\theta, \phi) = 1$, du diagramme de rayonnement: $R_M = P_t/I_o^2$, le coefficient d'efficacité d'une antenne est aussi donné par la formule: $\eta = R_M / (R_M + r)$.

R_M : résistance de rayonnement et r : résistance ohmique.

En pratique, l'efficacité peut atteindre 75 à 95%. Dans le cas d'une antenne dont la longueur $l \ll \lambda/4$: $R_M = 80 \cdot \pi^2 \cdot l^2 / \lambda^2$, dans le cas d'un doublet, $R_M = 160 \cdot \pi^2 \cdot l^2 / \lambda^2$.

La résistance de rayonnement d'un dipôle demie-longueur d'onde est de 73,2 ohms (fil très fin). Cette résistance varie avec la hauteur de l'antenne par rapport au sol.

D. Longueur effective :

En pratique, l'antenne se conduit différemment de sa longueur physique. Sa longueur effective est légèrement plus grande que sa longueur physique. L'antenne opposant toujours une certaine

résistance au passage du courant, la longueur d'onde dans l'antenne est plus courte que celle dans l'espace.

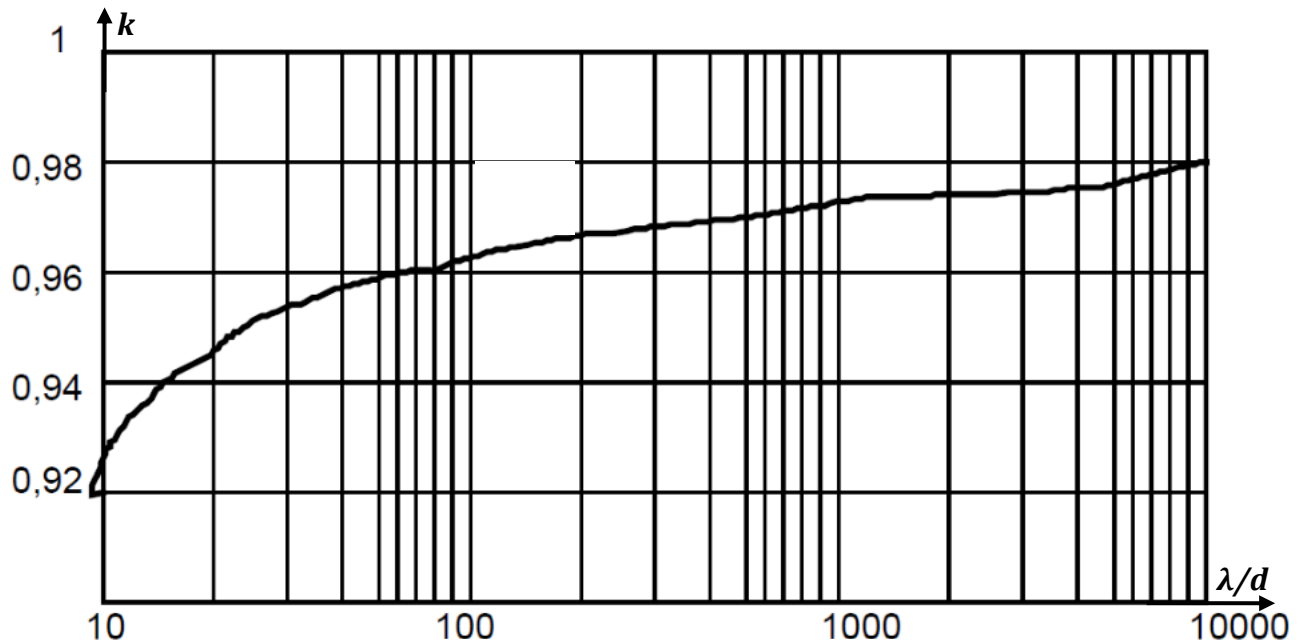


Figure 5: Courbe de variations de k en fonction du diamètre du fil

Pour $f < 30 \text{ MHz}$, $\lambda_e = (C/f) \cdot 0,94$. Au dessus de 30 MHz $\lambda_e = (C/f) \cdot k$ dépendant du ϕ , " d " est le diamètre du fil.

E. Hauteur effective :

C'est la caractéristique propre de l'antenne, non reliée à la longueur du **mât** qui la porte, antenne demi-longueur d'onde: $h_e = \lambda \pi$. La hauteur effective détermine la tension V induite dans une antenne par un champ électromagnétique E : $V = E \times h_e$.

F. Surface équivalente de réception :

La puissance captée par l'antenne peut s'écrire: $P_r = P_1 \times S_R$ où S_R = surface et P_1 est la densité puissance. S_R est un paramètre de l'antenne = surface équivalente de réception.

G. Bande passante d'une antenne :

La bande passante d'une antenne est la différence des fréquences f_1 et f_2 pour lesquelles la tension V_r reçue descend à 0,7 (-3dB) de sa valeur maximale, $BP = \Delta f = f_2 - f_1$ en Hz

H. Température équivalente de bruit :

La Température de bruit d'une antenne a une grande importance pour les antennes utilisées en réception, notamment lorsqu'elles captent un signal provenant d'un satellite. On la définit comme :

$$T_a = P_B / (\Delta f \cdot K) \quad (12)$$

où P_B est la puissance de bruit disponible à l'entrée du récepteur en Watt, K la constante de Boltzmann soit $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{C}$ et Δf la largeur de bande du récepteur en Hz. Afin d'avoir une température de bruit très faible, il faut que la directivité de l'antenne soit quasiment nulle dans la direction des sources concernées.

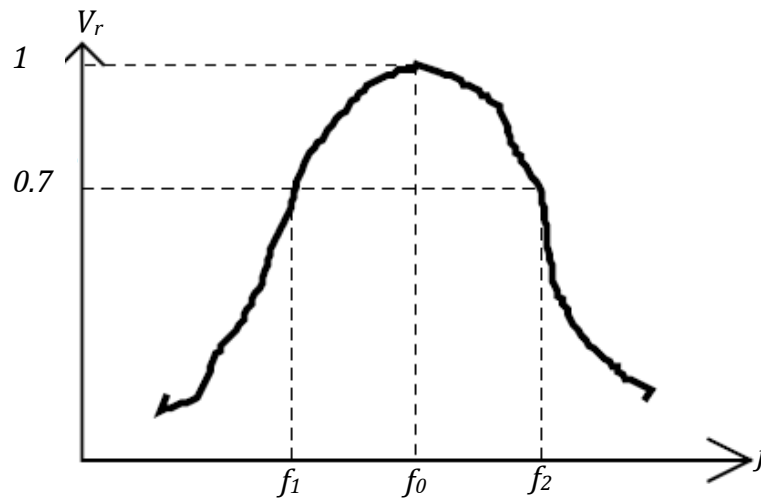
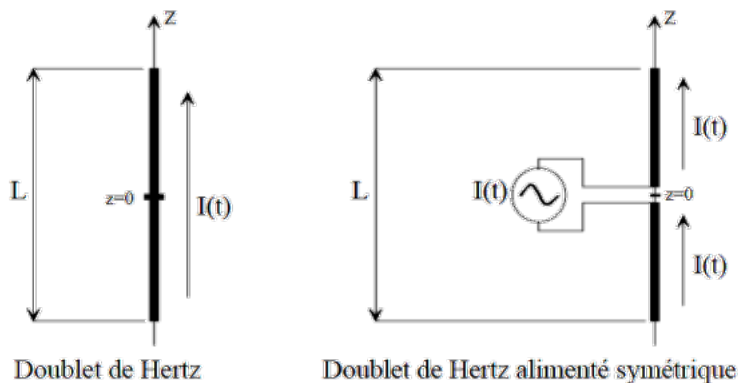


Figure 6: Bande passante d'une antenne.

1.2.5. Types d'Antennes

A. Antennes à onde stationnaire – le dipôle:

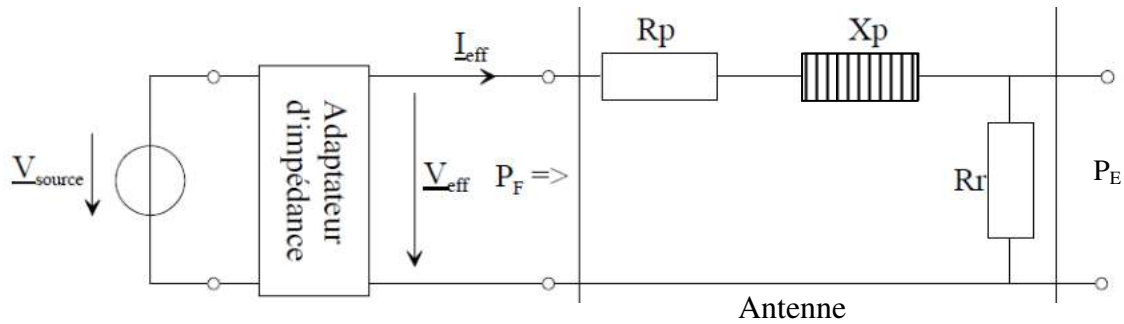
On appelle **dipôle élémentaire**, **dipôle infinitésimal** ou encore **doublet de Hertz** une antenne dont la longueur L est petite par rapport à la longueur d'onde λ . Comme $L \ll \lambda$ (en principe, $L < 50\lambda$), on admet que le courant I est uniforme (l'amplitude et la phase sont indépendantes de z).



On détermine un axe des z de telle manière que l'origine $z=0$ soit au centre du dipôle. Les dipôles sont des **antennes à onde stationnaire**. En effet, comme l'extrémité du dipôle est ouverte, l'onde électromagnétique émise est réfléchiée avec un coefficient de réflexion $\rho = 1$. L'addition des deux ondes progressive et réfléchiée génère une onde stationnaire.

– Impédance du dipôle

Toute antenne filaire est vue de la source comme une impédance par la source. Le schéma de branchement est illustré par la figure suivante :



Les paramètres sont les suivants :

R_r Résistance de rayonnement; R_p Résistance de pertes de l'antenne (pertes ohmiques, isolement imparfait des isolateurs supportant les éléments de l'antenne...etc); X_p Réactance de l'antenne; P_F Puissance fournie; P_E Puissance émise. L'adaptateur d'impédance peut être un transformateur ou un filtre, il sert à adapter l'impédance de l'antenne à l'impédance de ligne Z_0 .

– Réactance de l'antenne

La réactance X_p de l'antenne est non désirée. La première manière de l'éliminer est de réaliser une antenne qui n'en a pas. C'est le cas des antennes résonantes. La Figure 7, illustre le parcours de l'impédance du dipôle pour différentes valeurs de L .

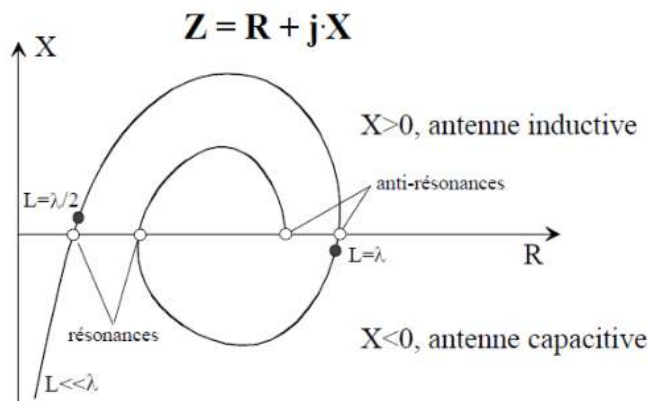


Figure 7: Parcours de l'impédance du dipôle pour différentes valeurs de L .

- Lorsque L est proche de $\lambda/2$, $3\lambda/2$, etc. on a des situations de **résonance**. L'impédance Z est purement réelle et de l'ordre de la centaine d'Ohms ($R_r = 73 \Omega$ pour une antenne demi-ondes). A noter que les caractéristiques de l'antenne en résonance dépendent relativement peu de l'épaisseur du dipôle.
- Lorsque L est proche de λ , 2λ , etc. on a des situations d'**antirésonance**. L'impédance Z est purement réelle et peut prendre des valeurs de plusieurs milliers d'ohms. A noter que les caractéristiques de l'antenne en antirésonance dépendent **énormément** de l'épaisseur du dipôle.
- Les valeurs de L pour les quelles on a résonance (ou antirésonance) ne sont pas des multiples exacts de $\lambda/2$. Par exemple, pour le dipôle demi-onde, on a $L = 0.95 \times \lambda/2$.
- Les antennes résonantes sont assez sensibles au rapport L/λ . En conséquence, la bande passante de ce type d'antennes est limitée.

Une seconde manière d'éliminer la réactance X_p est d'ajouter en série à l'antenne une seconde réactance $X_p' = -X_p$

B. Dipôles résonants :

On appelle dipôle résonnant un dipôle dont la réactance X_p est nulle. Ces situations sont obtenues lorsque $L \approx n \times \lambda/2$. Lorsque n est impair, on a résonance; lorsque n est pair on a antirésonance. La Figure 1.8 illustre la répartition de la valeur efficace du courant pour une antenne demi onde et une antenne λ .

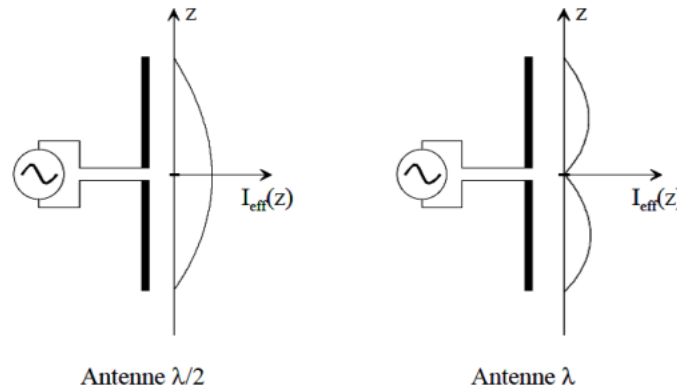


Figure 8: répartition de la valeur efficace du courant le long du dipôle.

C. Dipôle replié :

Le dipôle replié est représenté par la Figure 1.9, son impédance de rayonnement vaut à peu près 300Ω . Le diagramme de rayonnement est semblable à celui du dipôle demi-onde, mais la bande passante est plus large.

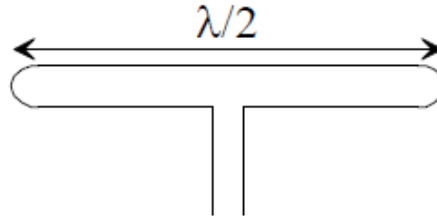


Figure 9: dipôle replié.

D. Dipôle raccourci :

Lorsque la longueur d'onde L est très inférieure à la longueur d'onde (cas des ondes longues), l'impédance de l'antenne présente une partie imaginaire négative (capacitive – voir Figure 7). Pour accorder cette antenne, il est nécessaire d'ajouter à la base une inductance (voir Figure 10). L'inductance doit avoir une résistance série très faible. Par rapport à une antenne résonante pure, le rendement n'est pas aussi bon et la bande passante est plus réduite.

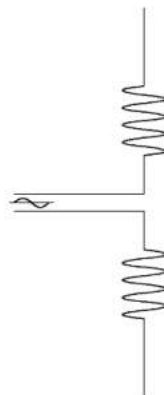


Figure 10: Dipôle raccourci.

E. Antenne Yagi :

L'antenne Yagi est constituée d'un dipôle replié (radiateur), auquel on a associé un ou plusieurs éléments passifs, appelés directeur(s) et réflecteur (voir Figure 11). Lorsque le dipôle actif est alimenté, il émet des ondes EM; les dipôles passifs vont être excités par des courants et ils vont rayonner à leur tour. Le champ rayonné est la somme des champs émis par tous les éléments rayonnants. Ce type d'antenne est très difficile à calculer, dans la mesure où tous les éléments interagissent les uns avec les autres.

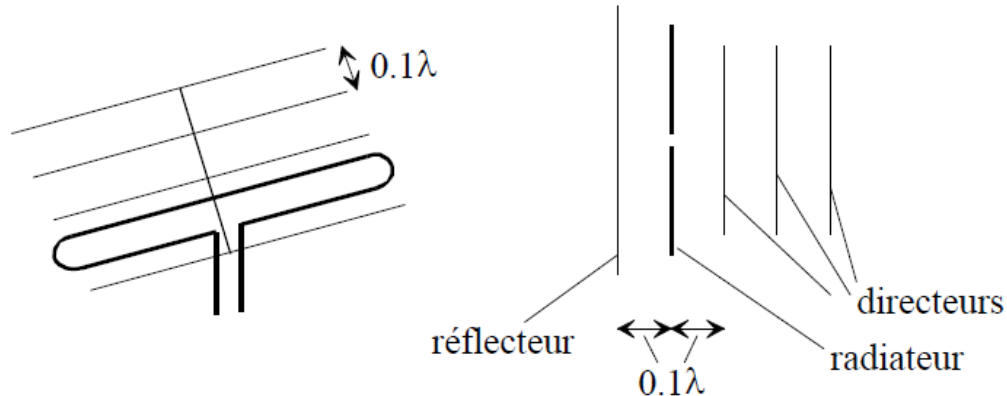


Figure 11: Principaux éléments constituant d'une antenne Yagi.

La présence d'éléments passifs diminue la résistance de rayonnement de l'antenne, qui se situe généralement vers 75Ω . Les antennes Yagi sont les fameuses antennes de télévision que l'on voit de moins en moins sur nos toits.

F. Antennes cadres :

Pour les ondes longues et moyennes, les antennes filaires sont difficiles d'emploi. On leur préfère souvent les antennes cadres. Comme son nom l'indique, l'antenne cadre est constituée d'une ou plusieurs spires enroulées sur un cadre de dimensions relativement grandes (quelques cm à quelques dizaines de cm). L'antenne cadre fonctionne comme la partie secondaire d'un transformateur, un champ d'induction magnétique variable $\mathbf{B}(t)$ génère une tension induite aux bornes du bobinage.

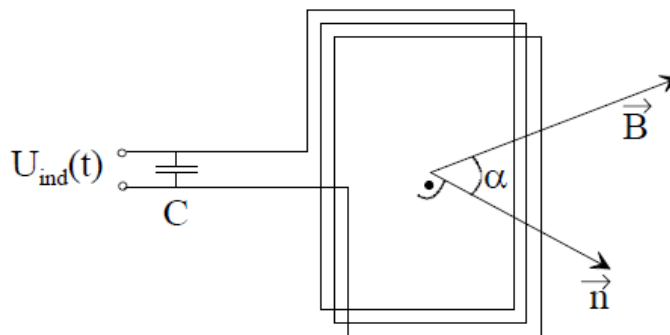


Figure 12: Structure d'une antenne cadre.

Les paramètres sont les suivants :

S : Surface d'une spire [m^2]

n : Vecteur normal au plan

N : Nombre de spires [-]

E : Champ électrique [V/m]

H : Champ magnétique [A/m]

B : induction magnétique [Tesla]

α : Angle d'incidence de B par rapport à n

ϕ : Flux magnétique [Tesla×m²]

c : Vitesse de la lumière [3×10^8 m/s]

$$\text{On a : } \phi(t) = N.S. \cdot \|\vec{B}(t)\| \cdot \cos(\alpha) = N.S. \cdot \mu_0 \cdot \|\vec{H}(t)\| \cdot \cos(\alpha) = \frac{N.S.}{c} \cdot \|\vec{E}(t)\| \cdot \cos(\alpha) \quad (13)$$

$$\text{et } U_{ind}(t) = -\frac{\partial \phi(t)}{\partial t} \quad (14)$$

Remarques :

- Il faut orienter le cadre perpendiculairement au vecteur B pour obtenir la tension maximale.
- L'antenne cadre est une des rares antennes à être sensible au champ magnétique H .
- On ajoute très souvent une capacité d'adaptation en parallèle au bobinage de manière à filtrer les fréquences indésirables. La bande passante de l'antenne cadre accordée est assez mince.

L'antenne ferrite, est la version moderne de l'antenne cadre, possède un noyau en ferrite qui augmente le flux magnétique ϕ d'un facteur μ_r . Cette antenne est intéressante lorsqu'on doit réaliser un récepteur de petite taille.

G. Antennes paraboliques :

Les antennes paraboliques se caractérisent par une directivité très forte. On les utilise en général pour des fréquences plus hautes que 1GHz. En dessous de 400 MHz, leur taille devient problématique.

L'antenne parabolique est constituée d'un cornet (antenne de type ouverture) et d'un réflecteur parabolique (voir Figure 13).

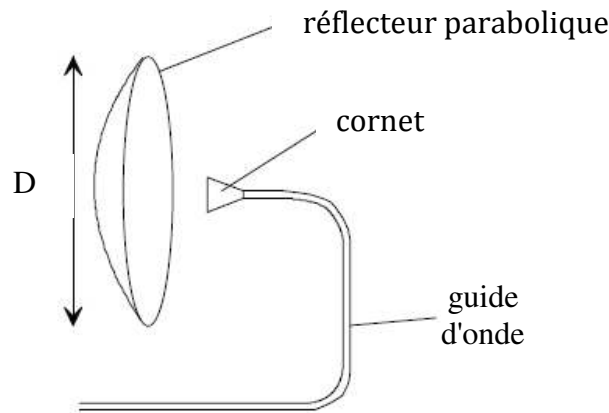
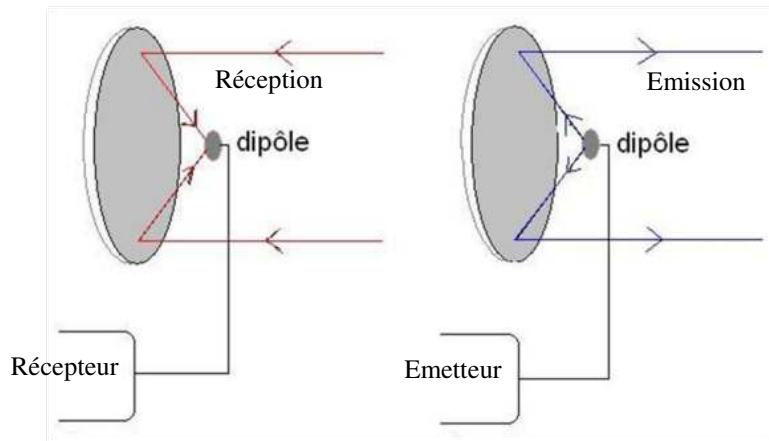


Figure 13: Antenne parabolique.

Une antenne parabolique pour faisceau hertzien est un ensemble constitué d'un dipôle rayonnant et d'un réflecteur parabolique. Le dipôle est fixé au cornet, c'est la partie sensible de l'antenne, capable d'émettre et/ou de recevoir des signaux électriques. Il occupe le foyer de la parabole. La parabole a pour fonction de rassembler sur ce dipôle les ondes reçues dans le cas d'une antenne de réception et de disperser les ondes émises par le dipôle dans le cas de l'émission (voir figure suivante).



Les communications hertziennes étant en général bidirectionnelles (aller et retour en half ou en full-duplex) la même antenne est à la fois émettrice et réceptrice. Cette antenne étant destinée à communiquer avec un autre émetteur-récepteur elle doit être fixée dans l'espace. Elle est donc réglable autour de deux axes afin de diriger l'antenne dans la direction de réception maximale. Cette direction est repérée par deux angles :

- le gisement, angle horizontal (azimut) gradué de 0 à 360° à partir d'une direction dite ligne de foi.
- le site, angle vertical (hauteur) gradué de 0 à 90°.

La connaissance et le réglage de ces deux angles assurent le pointage de l'antenne vers sa cible (une autre antenne, un satellite, un avion...etc.).

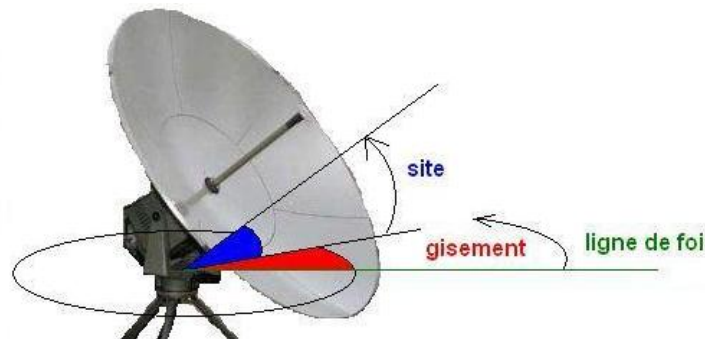


Figure 14: Direction de pointage d'une antenne parabolique.

G.1. Amplification des puissances émises et reçues

G.1.a. Réception des ondes par l'antenne :

L'antenne parabolique est essentiellement caractérisée par son aire de réception A en (m²) qu'on note aussi sous la désignation d'**aire effective** A_{eff} , plus cette aire est importante plus la puissance électromagnétique capturée le sera.

avec:

P_r = puissance reçue par l'antenne parabolique.

P_e = puissance émise au centre émetteur de la sphère photométrique.

d = distance émetteur antenne parabolique.

on écrira:

$$P_r = P_e \cdot A_{eff} / 4 \cdot \pi \cdot d^2 \quad (15)$$

G.1.b. Emission des ondes par le dipôle :

Supposons que le dipôle émette la puissance P au centre de la parabole. La puissance capturée est rassemblée et concentrée dans une seule direction parallèle sur une surface d'aire A_{eff} . Celle-ci constitue ce que les opticiens nomment une "**ouverture**". Elle va donc diffracter le rayonnement selon le principe de Huyghens(1690)-Fresnel(1815)³. La puissance renvoyée par la parabole va se confiner dans une figure spatiale caractéristique de l'ouverture désignée par le terme de "**lobes de diffraction**".

La figure15 montre clairement la présence de zones angulaires où la puissance est maximale, d'autres où elle est nulle. Parmi ces lobes, l'un contient plus de 90% de la puissance à lui seul, c'est le lobe central (en gris foncé). Il est convenu que la largeur angulaire du lobe central d'une antenne se mesure à la demi-puissance maximale (celle mesurée dans l'axe angulaire 0°).

Cette normalisation est dite efficace: $P = 0,5.P_{max}$ ²

Une étude de la fonction de diffraction (ici la fonction de Bessel J_1) montre que l'ouverture angulaire efficace (angle d'ouverture -3dB) dépend de la longueur d'onde λ et du diamètre D de l'ouverture.

Elle atteint pratiquement en degré la valeur suivante :

$$\theta_{eff} = 70.\lambda/D \quad (16)$$

Où la largeur angulaire du lobe est double :

$$\theta_{max} = 140. \lambda/D \quad (17)$$

soit le double de la largeur angulaire efficace.

Ramenons ces deux mesures d'angles en radian, on a donc :

$$\theta_{eff} = 1,22.\lambda/D \text{ en [rad]} \quad (18)$$

$$\theta_{max} = 2,44. \lambda/D \text{ en [rad]} \quad (19)$$

³ Selon Huygens, chaque point "P" d'une surface d'onde se comporte comme une source (fictive) ponctuelle de même fréquence que la source mère et dont la phase est celle de l'onde arrivant en ce point "P". De plus, Fresnel affirme que les ondelettes sphériques émises par ces sources fictives se propagent jusqu'au point "M" où elles vont interférer.

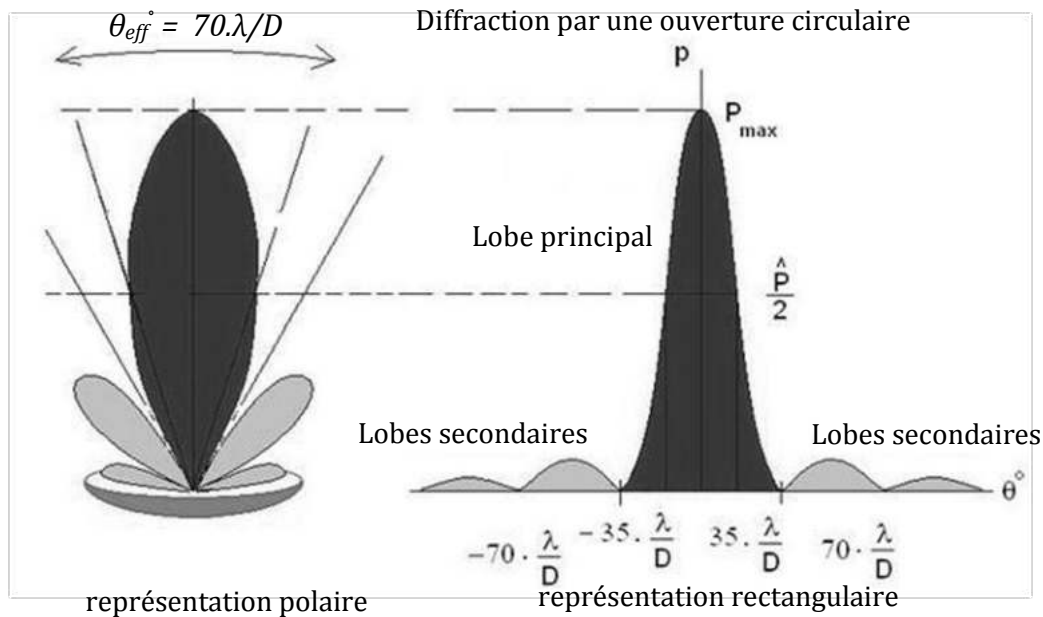


Figure 15: Représentations de diffraction par une ouverture circulaire.

Exemple :

soit une parabole de 50 cm de diamètre émettant à 300 MHz

on aura: $\lambda = c/f = 3.10^8 / 300.10^6 = 1 \text{ m}$

$$\theta_{eff} = 1,22 \cdot 1 / 0,5 = 2,44 \text{ rad}$$

soit aussi $\theta_{eff} = 70. 1 / 0,5 = 140^\circ$

Maintenant la même parabole fonctionne à $f = 3 \text{ GHz}$, la longueur d'onde λ devient 0,1 m et par conséquent $\theta_{eff} = 0,244 \text{ rad}$ ou 14° .

Maintenant cherchons à comprendre ce qui se passe à la suite de ce phénomène, en fait le dipôle émet une puissance P qui, s'il n'y avait pas de parabole serait distribuée dans l'espace de façon quasi-isotrope. La présence de la surface de réflexion parabolique et l'existence de son lobe principal font que cette puissance va se trouver "ramassée" dans le lobe. C'est comme s'il se produisait une concentration de la puissance, disons une augmentation de la "densité de puissance".

Pour exprimer cette concentration, il faut utiliser la notion d'angle solide (voir figure 16).

Un angle solide est en fait l'aire d'une portion de sphère de rayon unité, que l'on exprime en stéradian(sr).

- pour la sphère complète cet angle solide vaut $4.\pi$ [sr].
- pour un cône dont l'angle au sommet vaut θ on calcule que cet angle vaut environ $\Omega = 2. \theta.\sin(\theta/2)$ et si θ est peu ouvert (ce qui est le cas des antennes de faisceaux hertziens qui sont très directionnelles) Ω vaut pratiquement θ^2 .
- Ecrivons donc $\Omega = \theta^2 = (\lambda/D)^2$ pour l'angle solide du lobe principal à demi-puissance.

G.1.c. Notion de gain :

Le **gain de l'antenne** se définit naturellement comme le rapport :

$$\text{gain} = \text{puissance concentrée} / \text{puissance isotrope}$$

La densité de puissance augmentant comme le rapport inverse des angles solides, on écrira aussi :

$$G = 4\pi / \Omega$$

par exemple: si $\theta_{\text{eff}} = 0,05 \text{ rad}$ $\Omega = 0,05^2 = 25 \cdot 10^{-4} \text{ sr}$

$$G = 4\pi / 25 \cdot 10^{-4} = 5000 \text{ environ}$$

Reliant les expressions de θ_{eff} et celle du gain G on obtient pour toute antenne :

$$G = 4\pi D^2 / \lambda^2$$

(20)

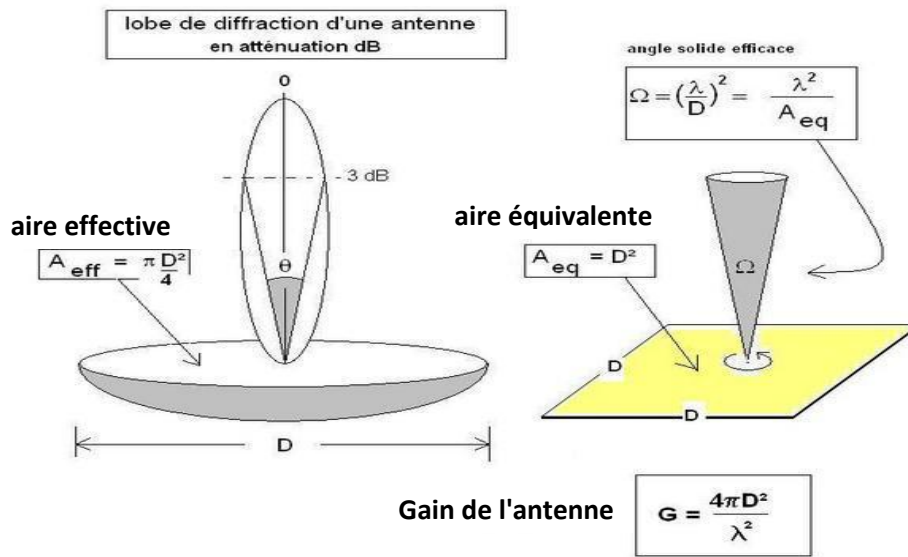


Figure 16: Gain, aire équivalente et aire effective d'une antenne parabolique.

Enfin, pour terminer ce paragraphe, notons qu'il est coutume dans le métier des FH de noter et de désigner par le terme "aire équivalente" la grandeur D^2 , ce qui fait qu'une antenne est caractérisée par deux aires:

- l'aire effective : $A_{\text{eff}} = \pi D^2 / 4$.
- l'aire équivalente $A_{\text{eq}} = D^2$ présente dans le gain qu'on écrira aussi :

$$G = 4\pi A_{\text{eq}} / \lambda^2$$

3^{ème} Section

Atténuation en Espace Libre

1. Introduction

Cette section s'applique particulièrement aux liaisons à visibilité directe (propagations troposphériques, faisceaux hertziens, liaisons par satellite, etc.). On néglige l'influence du sol et les pertes atmosphériques.

– *Espace libre*

c'est l'espace proposé à la propagation du faisceau entre l'émetteur et le récepteur, dénué de tout obstacle cachant (masque) réfléchissant (miroir) diffractant (objet à bord ou semi cachant) ou absorbant (feuillage, hydrométéores), bref un espace vide de tout obstacle.

– *Atténuation (Affaiblissement)*

l'atténuation en électronique, est le rapport entre grandeur de sortie sur grandeur d'entrée.
exemple :

tension d'entrée 10V tension de sortie 2V.

atténuation : $A = 2/10 = 0,2$ sans unité.

puissance d'entrée 100 W puissance de sortie 50 W.

atténuation : $A = 50/100 = 0,5$ toujours sans unité.

en faite, l'atténuation est une amplification < 1 , Cette atténuation, peut aussi s'exprimer en niveau d'atténuation:

$$A_{dB} = 10. \log_{10} (A)$$

pour les 2 exemple ci-dessus cela donnerait : $A_{dB} = 20 \log (0,2) = -14 \text{ dB}$ et $A_{dB} = 10 \log (0,5) = -3 \text{ dB}$

Soit P_e la puissance de l'émetteur au niveau du dipôle émetteur et G_e le gain de l'antenne, cherchons la puissance reçue par l'antenne de gain G_r (et d'aire équivalente A_r), soit f la fréquence d'émission de la porteuse et c la célérité du FH (vitesse de propagation des ondes EM du faisceau hertzien) et donc, $\lambda = c/f$ sa longueur d'onde. Soit d la distance émetteur-récepteur.

Dans la direction optimale du lobe principal, le gain directif $G(\theta, \phi)$ est égal à G_o . On définit alors, la **Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente** de la manière suivante :

$$PIRE = G_o.P_F \quad \text{en [w]} \quad (21)$$

Dans cette direction privilégiée, on a donc la densité de puissance suivante :

$$P = PIRE/4.\pi.d^2 \quad \text{en [W/m}^2\text{]} \quad (22)$$

La PIRE de l'émetteur sera donc $PIRE = P_e.G_e$.

Si on note S par l'éclairement reçue par l'antenne du récepteur : $S = PIRE/4.\pi.d^2$ en propagation isotrope équivalente.

La puissance (à demi hauteur) reçue par l'antenne et concentrée sur le dipôle récepteur sera :

$$P_r = S.A_r = PIRE.A_r/4.\pi.d^2$$

On rappelle que le gain est donné par (voir section précédente) : $G = 4.\pi.A_{eq}/\lambda^2$ où A_{eq} est toujours l'aire équivalente à demi puissance.

Donc, $P_r = PIRE \cdot G_r \lambda^2 / 4\pi \cdot 4\pi \cdot d^2 = PIRE \cdot G_r \lambda^2 / (4\pi \cdot d)^2$ et comme $\lambda = c/f$, on aboutit à la relation :

$$P_r = PIRE \cdot G_r \cdot c^2 / (4\pi \cdot f \cdot d)^2$$

Enfin, à partir de l'expression de la *PIRE*, on obtient :

$$P_r = P_e \cdot G_e \cdot G_r \cdot c^2 / (4\pi \cdot f \cdot d)^2 \quad (23)$$

par définition le terme $c^2 / (4\pi \cdot f \cdot d)^2$ est l'**AEL (Atténuation en Espace Libre)**. son niveau *dB* est donné par :

$$AEL_{dB} = 20 \log(c) - 20 \log(4\pi) - 20 \log(f) - 20 \log(d) \quad (24)$$

Avec $c = 3 \cdot 10^8$ m/s dans l'air sec, $4\pi = 12,56$, on obtient le développement suivant :

$$AEL_{dB} = 169,5 - 21,98 - 20 \log(f) - 20 \log(d) = 147,5 - 20 \log(f) - 20 \log(d) \quad (25)$$

les unités pratiques pour le calcul de l' AEL_{dB} : f en [GHz] et d en [km].

avec $f_{GHz} = f / 10^9$ et $d_{km} = d / 10^3$ on obtient :

$$AEL_{dB} = 147,5 - 20 \log(f_{GHz} \cdot 10^9) - 20 \log(d_{km} \cdot 10^3)$$

avec $20 \log 10^9 = 180$ et $20 \log 10^3 = 60$ d'où :

$$AEL_{dB} = -92,5 - 20 \log(f_{GHz}) - 20 \log(d_{km}) \quad (26)$$

Remarque : l'**AEL** est en niveau négatif et sa valeur absolue augmente avec :

- la **fréquence** : les fréquences élevées sont plus atténuées que les fréquences basses.
- la **distance** qui en augmentant atténue la puissance reçue.

2. Bilan hertzien en espace libre (antenne à antenne)

la puissance reçue $P_r = P_e \cdot G_e \cdot G_r \cdot AEL$, devient en niveau de puissance en *dB* :

$10 \log(P_r) = 10 \log(P_e) + 10 \log(G_e) + 10 \log(G_r) + 10 \log(AEL)$, avec P_e en *mW* et P_r en *mW* le bilan devient :

$$P_{rdBm} = P_{edBm} + G_{edB} + G_{rdB} - (92,5 + 20 \log(f_{GHz}) + 20 \log(d_{km})) \quad (27)$$

Exemple :

Emetteur :

- niveau de puissance émetteur: 40 *dBm* ($1 \text{ W} = 1000 \text{ mW}$).
- gain $G_{edB} = 30 \text{ dBm}$.
- fréquence $f = 2 \text{ GHz}$.
- distance $d = 50 \text{ km}$.

Récepteur :

gain $G_{rdB} = 30 \text{ dBm}$

$$AEL_{dB} = -92,5 - 20 \log(2 \cdot 10^{-3}) - 20 \log(50 \cdot 10^{-3}) = -252,5 \text{ dBm}$$

$$P_{rdBm} = 40 + 30 + 30 - 252,5 = -152,5 \text{ dBm}$$

4^{ème} Section

Ellipsoïde de Fresnel

1. Introduction

Lorsqu'un faisceau d'ondes est émis par une antenne de gain élevé, on a vu précédemment que l'énergie électromagnétique se répartissait essentiellement dans le lobe de diffraction central de cette antenne.

Lors de leur parcours spatial, ces ondes parcourent théoriquement un chemin rectiligne (droit), le rayon central, qui est aussi axe de symétrie du lobe. Cependant, pour des raisons liées aux différents milieux effectivement rencontrés, qui ne sont pas toujours homogènes, ou qui contiennent des particules déviant le trajet théorique, ces ondes peuvent être soumises à une variété de trajets aléatoires (ondes secondaires) créant des retards à la propagation.

L'énergie reçue par l'antenne de réception est donc majoritairement portée par le rayon central, à laquelle s'ajoute l'énergie des rayons secondaires.

Il peut arriver que selon la longueur l des trajets suivis, ces ondes secondaires se somment ou au contraire se neutralisent avec l'onde centrale, ceci est du au phénomène d'interférence.

Lorsque deux ondes de même fréquence et émises en même temps d'un point E suivent des trajets de chemins optiques différents, elles interfèrent, leurs énergies peuvent soit se superposer soit se neutraliser, deux cas se présentent :

1^{er} cas: le retard entre elles est faible, leur somme est pratiquement maximale, cette situation correspond à une différence de trajet optique $[ER]_1 - [ER]_2$ voisin d'un nombre entier de longueurs d'onde (retard équivalent à une période temporelle de vibration).

2^{ème} cas: si cette différence est proche d'un nombre impair de demi longueurs d'onde (retard équivalent à une demi période) , alors la superposition des champs donne une résultante quasiment nulle.

Il est donc crucial de tenir compte de ce phénomène d'interférence pour faire le bilan exact de l'énergie reçue par une antenne de réception FH (Faisceau Hertzien).

2. Existence de l'ellipsoïde

Fresnel a montré qu'il existe une zone de l'espace où l'onde centrale et les ondes secondaires sont en état d'interférence constructive, cette zone est un ellipsoïde. dans ce qui suit on va voir pourquoi :

L'ellipsoïde possède deux axes orthogonaux, grand axe et petit axe (voir figure 17) , et elle est douée de symétrie centrale par rapport à l'intersection de ces axes et de symétrie axiale par rapport à chacun d'eux.

Sur le grand axe sont disposés les deux foyers F_1 et F_2 dont la distance F_1F_2 est une constante caractéristique de l'ellipse.

La propriété caractéristique d'une ellipse est :

$$F_1MF_2 = \text{constante} \quad (1)$$

Les extrémités de l'axe E et R sont bien-sûr à distance constante

$$ER = d \quad (2)$$

à partir de (1) et (2) on peut écrire que $F_1MF_2 - ER = \text{constante}$.

Au cours de la propagation, F_1MF_2 correspond au trajet d'une onde secondaire, ER est la longueur du trajet direct.

Fresnel définit le premier ellipsoïde par la propriété :

$$F_1MF_2 - F_1F_2 = cste < \lambda/2 \quad (28)$$

où λ est la longueur d'onde d'émission.

Toutes les ondes qui suivent leur parcours moyen dans cet ellipsoïde ne sont donc jamais en interférence destructive avec le rayon central.

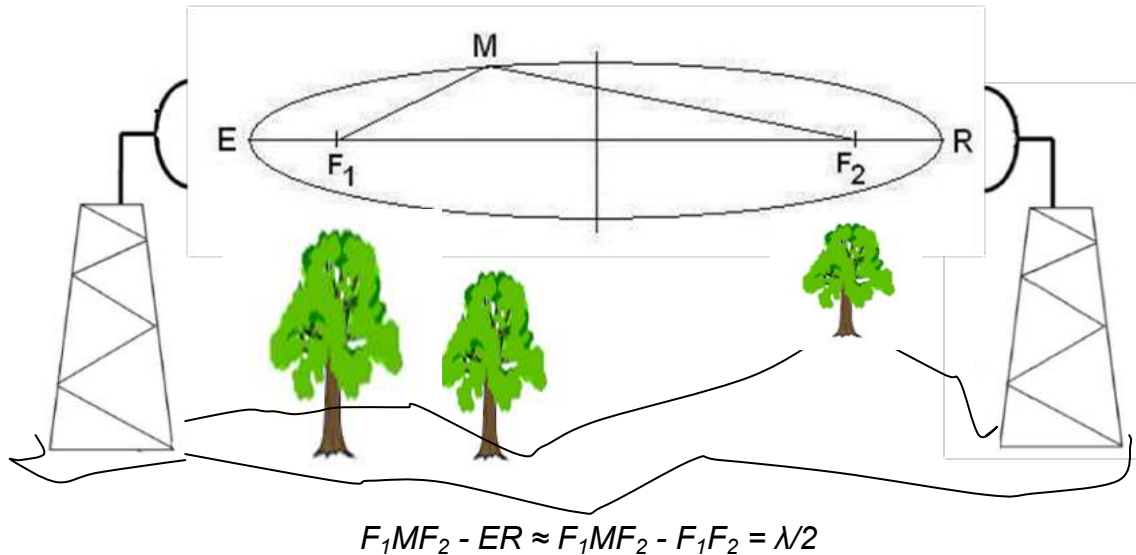


Figure 17: Ellipsoïde de Fresnel.

3. Dimensions de l'ellipsoïde

Les fréquences Faisceau Hertzien sont de l'ordre du GHz environ (300MHz à 3GHz en UHF par exemple) ce qui correspond à des longueurs d'ondes décimétriques (30 cm à 1 GHz par exemple). Les distances $d = ER$ sont de l'ordre du km.

Sur l'axe de l'ellipse on peut écrire, $F_1R + F_2R = F_1F_2 + 2F_2R$. Considérant la propriété caractéristique (1) appliquée en R on a aussi :

$$F_1R + F_2R - F_1F_2 = \lambda/2$$

On en conclut que :

$$F_2R = \lambda/4$$

Cela signifie que :

$$ER = F_1F_2 + 2F_2R = d + \lambda/2$$

Autant dire, en regard des dimensions précisées plus haut (d en km et λ en dm), que l'ellipsoïde de Fresnel présente les propriétés suivantes :

Les foyers sont pratiquement confondus avec les antennes E et R.

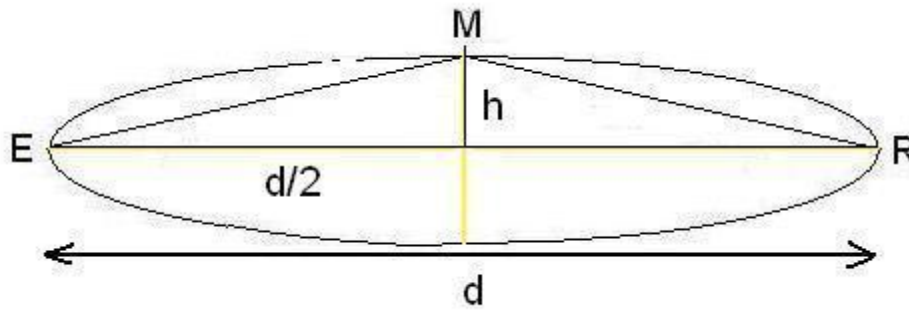
L'équation caractéristique devient : $EMR - ER = \lambda/2$, soit encore

$$EMR - d = \lambda/2$$

Les dimensions de l'ellipsoïde de Fresnel deviennent alors assez simples à calculer :

grand axe ER : fixé par la distance d entre les antennes $ER = d$.

En plaçant M sur le petit axe (voir figure suivante) et on calcule la dimension de celui-ci:



semi-petit axe h , fourni par le théorème de Pythagore $h^2 = (EMR/2)^2 - (d/2)^2$.

avec, $EMR = d + \lambda/2$ on obtient alors :

$$EMR^2 = d^2 + \lambda.d + \lambda^2/4$$

Soit encore en négligeant $\lambda^2/4$ devant $\lambda.d$ ($\lambda^2/4 \ll \lambda.d$) :

$$EMR^2 = d^2 + \lambda.d \text{ et donc } h^2 = 1/4(\lambda.d)$$

Finalement on obtient :

$$h = \frac{1}{2}\sqrt{\lambda.d} \quad (29)$$

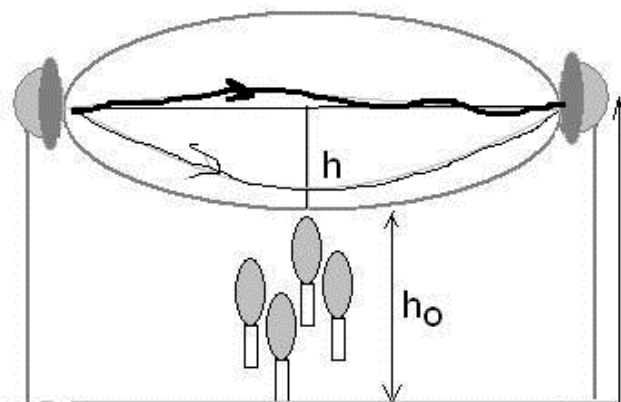
Règle : pour minimiser l'effet des diffractions, on évite d'avoir des obstacles dans le premier ellipsoïde de Fresnel.

4. Utilité du calcul de les dimensions de l'ellipsoïde

Si le FH est tiré au dessus d'une zone d'obstacles (végétation, constructions ...etc.) il est préférable de "dégager" l'ellipsoïde de Fresnel en surélevant les antennes ainsi l'antenne de réception recevra un maximum d'énergie.

Exemple :

On tire un FH de 6 GHz sur une distance de 5 km, sur le trajet est située une forêt d'arbres de hauteur moyenne $h_o = 20m$. On cherche à calculer la hauteur H des antennes permettant le passage du premier ellipsoïde de Fresnel.



calcul de λ : $\lambda_{cm} = c/f = 3.10^8/6.10^9 = 0,05$ donc $\lambda = 5.10^{-2} m = 5 cm$

la distance ER : $ER = d = 5 km = 5.10^3 m$

calcul de h : $h = 1/2(5.10^{-2} \cdot 5.10^3)^{1/2} = 7,9 m$.

Il faudra donc au minimum fixer la hauteur H à $H = h + h_o$ soit :

$$H = 20 + 7,9 = 28 m$$

Définition et utilisation des dB et dBm

L'intensité acoustique : mesure le niveau sonore d'un son en décibel acoustique en dBa (ou dB_{SPL})
(Sound Pressure Level)

Le décibel utilisé comme mesure de pression acoustique se détermine par :

$$N_{dBa} = 20 \cdot \log(P/P_0) \quad \text{avec } P_0 = 20 \mu Pa$$

P₀ est le niveau de référence c-a-d-niveau à partir duquel l'oreille commence à percevoir un son pur de 1 kHz

Par exemple, la pression acoustique maximale admise par le tympan est de 200 Pa, soit un niveau :

$$N_{dBa \text{ max oreille}} = 20 \log 200/2 \cdot 10^{-5} = 20 \log 10^7 = \mathbf{140 \text{ dBa}}$$

Gain en puissance : mesure le rapport de puissances exprimé en dB

Le décibel, unité de rapport de deux puissances P₁ et P₂, est défini par :

$$G_{dB} = 10 \cdot \log(P_1/P_2)$$

Rapport des puissances	Gain
1	0 dB
2	3 dB
4	6 dB
10	10 dB
50	17 dB
100	20 dB
500	27 dB
1000	30 dB
10 000	40 dB
100 000	50 dB
1 000 000	60 dB

Le tableau ci-contre indique la correspondance entre quelques rapports de puissances et leur valeur exprimée en décibels.

Ce rapport de puissance correspond à un **gain** ou à une **atténuation**.

Par exemple, un amplificateur qui fournit un signal de 100 watts en sortie lorsqu'on lui applique un signal de 100mW en entrée a un gain de :

$$G = 10 \log (100/0,1) = \mathbf{30 \text{ dB}}$$

Gain en tension : mesure le rapport de tensions exprimé en dB

Si deux puissances électriques P₁ et P₂ sont fournies successivement à une résistance R, on mesure aux bornes de cette résistance les tensions U₁ et U₂.

Le gain s'exprime alors par : $G_{dB} = 10 \cdot \log(P_1/P_2) = 10 \cdot \log(U_1^2/U_2^2) = 20 \cdot \log(U_1/U_2)$

Rapport de tension	Gain	Rapport de tension	Gain
1	0 dB		
2	6 dB	1/2	-6 dB
5	14 dB	1/5	-14 dB
10	20 dB	1/10	-20 dB
20	26 dB	1/20	-26 dB
100	40 dB	1/100	-40 dB
1000	60 dB	1/1000	-60 dB
10 000	80 dB	1/10 000	-80 dB

Tension : le niveau de tension peut s'exprimer en décibel (dBm, dBW, dBu ...)

Si l'on se fixe une tension de référence U_0 (ou une puissance de référence P_0 sur une résistance R_0), une tension U peut s'exprimer par rapport à cette tension de référence.

On parle alors de niveau qui se calcule par : $N = 20 \log (U/U_0)$

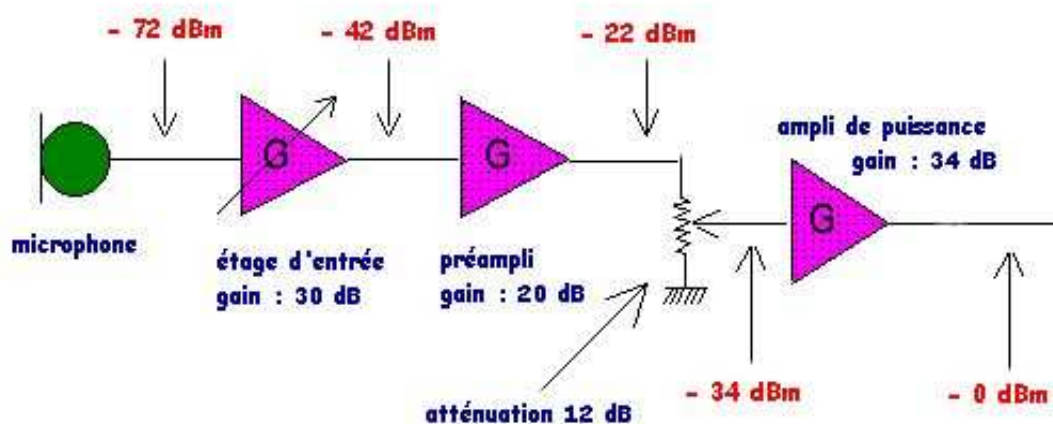
L'unité dans laquelle s'exprime le niveau dépend de la grandeur de référence :

unité	référence		relation de définition
dBV	décibels mesurant la tension par rapport à une référence de 1 Volt RMS.		
	tension	$U_0 = 1 \text{ V efficace}$	$N = 20 \log (U/U_0)$
dBmV	décibels mesurant la tension par rapport à une référence de 1 mVolt RMS		
	tension	$U_0 = 1 \text{ mV efficace}$	$N = 20 \log (U/U_0)$
dB μ V	décibels mesurant la tension par rapport à une référence de 1 μ Volt RMS		
	tension	$U_0 = 1 \text{ } \mu\text{V efficace}$	$N = 20 \log (U/U_0)$
dBW	décibels au dessus d'un watt. La puissance de référence est 1 W		
	Puissance	$P_0 = 1 \text{ W sur } 50 \text{ ohms}$	$N = 10 \log U^2/50.1 = 20.\log(U) - 17$
dBm	décibels au dessus d'un milliwatt. La puissance de référence est 1 mW		
	Puissance	$P_0 = 1 \text{ mW sur } 50 \text{ ohms}$	$N = 10 \log U^2/50.0,001 = 20.\log(U) + 13$
dBu	décibels mesurant la tension par rapport à une référence de 0,775 Volts RMS. Cette valeur de référence correspond à la tension d'une charge de 600 Ohms soumise à 1mW		
	Puissance	$P_0 = 1 \text{ mW sur } 600 \text{ ohms}$	$N = 10 \log U^2/600.0,001 = 20.\log(U) + 2,2$

Application

Une unité très utilisée dans les mesures radiofréquences est le **dBm** qui exprime un niveau par rapport à une puissance de :

$$P_0 = 1 \text{ mW sur } 50 \text{ ohms}$$



L'utilisation des gains et des niveaux en dBm (ou dBu) est très intéressante dans une chaîne, tous les calculs successifs se faisant par simple addition.