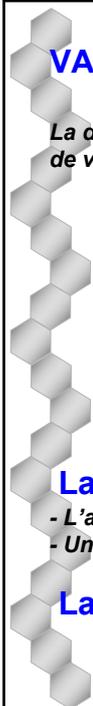


# RADIOCOMMUNICATIONS MOBILES

**Support de cours 5P / TEL5152**

**Enseignant : M. Pierre CARPENE**  
**Version Septembre 2005**



## VALIDATION DU MODULE ( 2 crédits )

**La dernière demi-journée est consacrée aux exposés de validation .**

- 20h de travail personnel ( environ )
- Sujet en rapport avec les transmissions radios
- En binôme, en temps partagé
- Durée : 10 mn + 2 mn de questions, sans notes écrites  
( modulable en fonction du nombre d'inscrits )
- Recherche documentaire ( biblio, internet ... )
- Présentation avec P.Point  
( fichiers à charger : prévoir disquette, CD, flash ... )
- Inscription des binômes sur la feuille prévue à cet effet .

**La validation du module est également liée**

- L'assiduité au cours ( respect des horaires, etc... )
- Une attitude conviviale et un comportement exemplaire

**La validation du module est INDIVIDUELLE**

## PLAN DU COURS

I) GENERALITES	p. 4
II) LE GSM ( aspect réglementation )	p. 16
III) LES AUTRES SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION	p. 23
IV) LES SYSTEMES SATELLITES	p. 56
V) LES SERVICES DU GSM	p. 68
VI) LES BASES DES TRANSMISSIONS RADIOELECTRIQUES	p. 78
VII) LE CONCEPT CELLULAIRE	p. 123
VIII) INFRASTRUCTURE D'UN RÉSEAU GSM	p. 130
IX) LA TRANSMISSION RADIO	p. 164
X) LE GPRS & L'UMTS	p. 206
XI) LES EFFETS BIOLOGIQUES DES RADIOFREQUENCES	p. 217

## I) GENERALITES

### • Définitions

Nous avons à transmettre des informations entre deux personnes ( ou deux systèmes ) principalement :

- Des informations sonores
- Des informations visuelles



Nous ne nous intéressons qu'à **la forme** de ces informations ( et non à son contenu ) .

## •Paramètres de la transmission des informations

- La vitesse de transmission
- L'éloignement
- Le support de l'information ( **radio**, filaire, fibre optique ...)
- Le type d'information ( son et / ou images - fixes ou mobiles - )
- La quantité

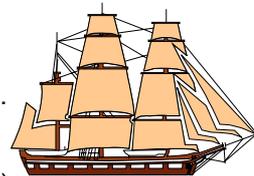
## •Communication entre 2 personnes éloignées

Avant l'invention de l'électricité et de ses applications, les informations voyageaient à la vitesse des messagers . Elles pouvaient être écrites ou orales .



## •Les moyens de transmission longue distance des « temps anciens »

- Les systèmes optiques utilisés par les bateaux .
- Les nuages de fumée ( les indiens d'Amérique ) .
- Le tam-tam ( en Afrique ) .



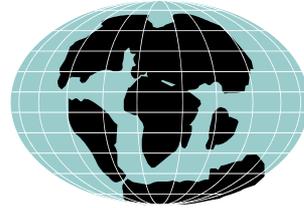
Ces moyens restent **lents** et dédiés aux informations « critiques » ( danger imminent, ect ...), et d'une portée de quelques Kms maxi .

## •L 'invention de l 'électricité

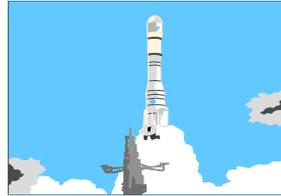
- Le XIXème siècle a permis la transmission des informations ( statiques et dynamiques ) sur un support " électrique " .



- L' électricité a permis également l'envoi d'informations à **très grande distance** .



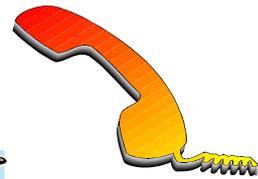
- Enfin, elle a pu transmettre des informations de **télécommande** ( notion de **paramètres physiques** à transmettre ) .



## •Historique

- 1876, Graham BELL ( 1847-1922 )  
invente le téléphone ( une paire de fils )

- 1887, Heinrich HERTZ ( 1857-1894 ),  
découvre les ondes radio



- En 1896, Guglielmo MARCONI ( 1874-1937 ), réalise une liaison " hertzienne " **courte distance**, dans son grenier ( ou son jardin : télécommande d'une sonnette ), qu'il brevète sous le nom de télégraphe sans fil ( T. S. F. )

- En 1901, il réalise la première liaison radio entre la **Cornouaille et Terre-Neuve**, qui lui vaut le Prix Nobel en 1909

## •Contraintes de la mobilité

Les ondes radioélectriques permettent de **communiquer** avec des entités **mobiles** .

On s'aperçoit vite qu'il faut installer des **relais** à cause de la topographie ( obstacles ) .

Ainsi ont vu le jour **les satellites** qui permettent de s'affranchir de la courbure de la terre .



Les institutions ( police, armée ), s'équipent de moyens radios dès le début du XXème siècle .

Ce n'est qu'au début des **années 1950**, aux Etats-Unis, que le radiotéléphone est accessible au **grand public** : La compagnie BELL TÉLÉPHONE propose le premier service radiotéléphone .

ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

9

## •Les ressources « Radio »

Les transmissions filaires ne sont théoriquement pas limitées en ressources ( on multiplie le nombre de fils, de fibres ... ) .

Les fréquences radios sont des **ressources rares** .

On définit alors :

- Les **BANDES DE FRÉQUENCES RADIO**, que l'on partage entre les différents utilisateurs .

**Exemple** : la bande FM définie entre 88 Mhz et 108 Mhz .

- les **CANAUX FREQUENCIAELS**, dans chaque **BANDE**, qui sont des intervalles de fréquences adjacents, éloignés d'une valeur définie .

**Exemple** : tous les 200 KHz dans la bande FM .



- La **COUVERTURE RADIO CORRESPONDANTE**

Les ondes radios s'affaiblissent en raison du carré de la distance parcourue .

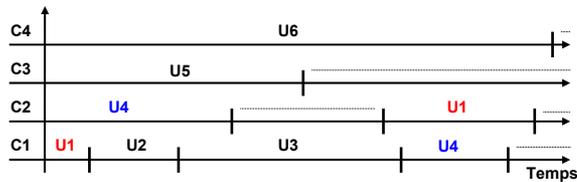
ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

10

## •Allocation dynamique des canaux fréquentiels

En 1964, la notion de **partage des ressources de fréquence** est introduit dans les réseaux radiotéléphones :

On alloue un canal à un utilisateur pour le **temps d'une communication** .

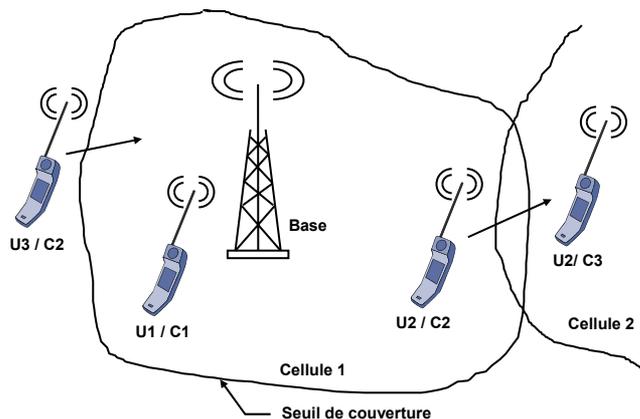


Il y a **plus** d'abonnés que de canaux par unité de temps (ici, 6 abonnés pour 4 canaux) .

C'est la naissance des premiers systèmes de " gestion radio " sur les réseaux .

## •Le concept de RÉSEAU CELLULAIRE

En 1971, la compagnie BELL TÉLÉPHONE propose " l'Advanced Mobile Phone Service " ( AMPS ), qu'elle met en œuvre à Chicago en 1978 .

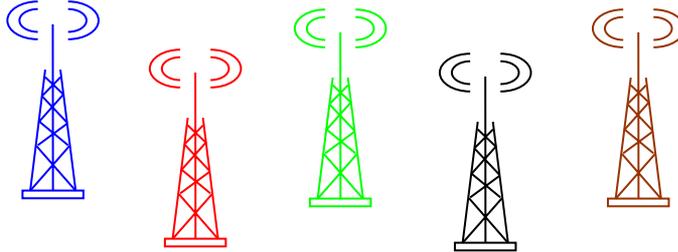


## •Principales caractéristiques d'un réseau cellulaire

- Les canaux peuvent être réutilisés dans **d'autres cellules** suffisamment éloignées .



- Le système gère l'**ensemble** des cellules .



- Le système gère le **changement de cellule** en cours de communication ( hand over ) .

ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

13

## •Les réseaux cellulaires analogiques

En 1982, la Federal Communication Commission normalise AMPS, aux États-Unis .

Mais chaque pays édicte sa **norme** .

En Europe :

- Total Access Cellular System ( TACS ) : Italie, Royaume-Uni .
- Nordic Mobile Telephone : France ( SFR ), Espagne, Danemark, Finlande, Norvège, Pays-Bas, Suède, Belgique .
- C-Net ( C 450 ) : Allemagne .
- Radiocom 2000 : France ( France Télécom ) .
- Mobilophone 2 : Belgique .



Les opérateurs ne peuvent plus répondre aux demandes d'abonnements .

De plus, un abonné ne peut pas utiliser son téléphone mobile avec des systèmes de normes différentes .

ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

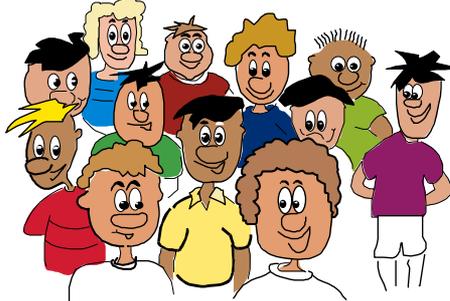
14

## •Le passage de l'analogique au numérique

Il faut passer de la transmission analogique à la **TRANSMISSION NUMÉRIQUE**, et au **MULTIPLEXAGE TEMPOREL** .

En Europe, on recherche une solution commune pour permettre :

- Un accès unique aux utilisateurs
- Une fabrication des produits en grande série



ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

15

## II ) LE GSM

### • Elaboration des normes

En 1982, la Conférence Européenne des Postes et Télécommunications ( **CEPT** ) crée :

- Le Groupe Spécial Mobile
- Elabore des normes dans la bande des 900 MHz ( réservée depuis 1978 ) .



**En 1987 ( seulement ! ) ces normes fixent les principales options :**

- La transmission numérique
- Le multiplexage temporel
- Le saut en fréquence
- Le cryptage des informations



ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

16

## Quelques dates clefs

- En **1990**, on élabore les spécification « Phase 1 »

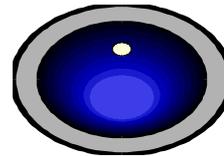


- En **1992**, on exploite les premiers réseaux GSM .



- En **1994**, on élabore les spécification « Phase 2 » .

## • Les objectifs du GSM



- Un **très grand nombre** d'abonnés .
- Un **coût raisonnable** pour ceux-ci .
- Un **coût d'exploitation gérable** pour l'opérateur .
- Une **gestion des ressources adaptée** à la densité du trafic .  
( taille des cellules, demi débit ... )
- Un **service téléphonique comparable** au réseau filaire .
- Des **services spéciaux** ( gestion de flotte, accès limités, transmission des données binaires, messages courts ... ) .
- La **confidentialité** des informations ( cryptage ) .
- Le **contrôle de la puissance** émise par le mobile ( autonomie ) et la station de base ( occupation du spectre radio ) .
- Des équipements **normalisés** ( fabricants différents ) .
- Des équipements à l'**échelle mondiale** . ???

## • Les organismes officiels

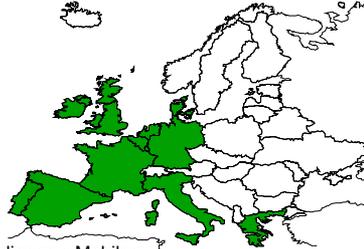
### Aux Etats Unis :

- Union Internationale des Télécommunications ( **UIT** )
- World Administrative Radio Conference ( **WARC** ) .
- American National Standard Institute ( **ANSI** ) .



### En Europe :

- Conférence Européenne des Postes et Télécommunications ( **CEPT** ) .
- European Telecommunications Standard Institute ( **ETSI** ) .
- Autorité de Réglementation des Télécommunications ( **ART** ) .
- **AFNOR**



### Au niveau mondial

- La Conférence Mondiale des Radiocommunications ( **CMR** ) .

## • Structure de l'ETSI

On peut distinguer 2 groupes principaux :

**RES**  
( Radio Equipements  
and Systems )

**SMG**  
( Special Mobile  
Group )



## • Sous comités SMG

**SMG 1**

Définition des services GSM  
( services support, téléservices... )

**SMG 2**

Aspect interface radio  
( mobiles<=> base )

**SMG 3**

Aspect réseau fixe  
( architecture / interface )

**SMG 4**

Services de données  
( banques spécifiques, transferts ... )

**SMG 5**

Évolution de la norme vers l'UMTS  
( orienté « multimédia » )

ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

21



## • Sous comités SMG ( suite )

**SMG 6**

Administration du réseau

**SMG 7**

Tests stations mobiles  
( maintenance, mobiles de trace ... )

**SMG 8**

Tests sous système radio  
( maintenance, alarmes ... )

**SMG 9**

Carte Sim et son évolution

ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

22

# III ) LES AUTRES SYSTEMES DE RADIOCOMMUNICATION

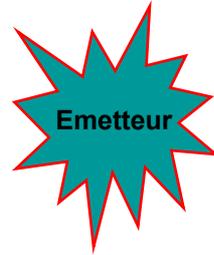
## • La radiodiffusion et télédiffusion

Ce sont des systèmes classiques

De nombreux abonnés possédant un **récepteur approprié**, peuvent recevoir du son ou de l'image ( point-multipoint ) .

Ils ont largement contribué au **développement** des différentes techniques de radiocommunication ( notion de couverture, liaison satellite ... ) .

Il évoluent largement vers le **numérique** et la transmission de données .



## • La radiomessagerie « unilatérale »

Il n'y a pas de possibilité d'acquittement ( sens descendant seulement ) .

### Caractéristiques principales

- Zone de couverture généralement urbaine ( Efficacité 99 % )
- Appels de groupe



- Chronologie des messages sur la plupart des systèmes

**Eurosignal, Alphapage, Tadoo, Bip, Operator, Textplus, Tam-tam ...**

## • Le téléphone sans fil

Il est à usage restreint ( quelques dizaines de mètres ) .

-Usage domestique  
( pas de licence ...)



- Raccordé à une prise téléphonique
- Encore quelquefois « analogique »
- Evolue largement vers le « numérique »
- Bandes de fréquences variables ( du MHz à plusieurs MHz )

## • Le Réseau Pointel ( bi-bop )

Il permet de s'affranchir de la recherche d'une cabine téléphonique, en zone urbaine .

### Caractéristiques principales :

- Communication avec le réseau filaire par l'intermédiaire d'une borne
- Faible rayon de couverture ( 200 m )
- Systèmes complémentaires à la maison



## • Les réseaux locaux sans fil

Il offrent des applications plus professionnelles .

- Gestion d'entrepôts, de magasins ...
- Mobilité au sein du réseau
- Véhiculent de la phonie ou/et des données

## • Les réseaux privés

Il sont à usage professionnel ( transport, sécurité, maintenance, santé ) et offrent une couverture géographique plus importante ( une ou plusieurs villes ) .



Ces systèmes sont peu normalisés, analogiques ou numériques .

Chaque réseau utilise un ( ou plusieurs ) **relais** et une **flotte** de mobiles .

## Les principaux systèmes

### Les Réseaux à Relais Partagés ( 2RP ) et les Réseaux à Relais Communs ( 2RC ) :

Chaque fréquence est allouée **en permanence** à un usager, sur une zone de couverture donnée .

### Les Réseaux à Ressources Radioélectriques Partagées ( 3RP )

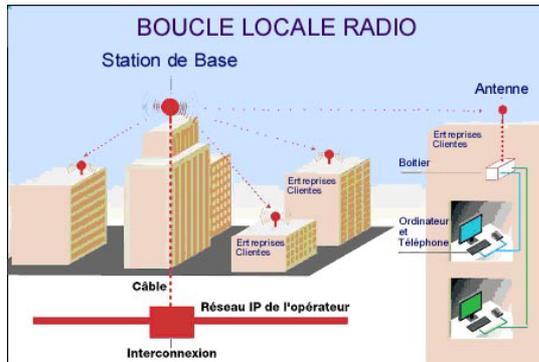
Une fréquence n'est allouée **que pour le temps** d'une communication .

### Les Réseaux Radioélectriques Réservés aux Données ( 3RD )

Idem 3RP, mais pour les **données** . Faible débit ( 4800 bauds ), mais très sécurisé ( applications bancaires, manifestations temporaires - salons - )  
Ils sont cellulaires ( comme le GSM ) mais pas toujours cryptés .

## • La boucle locale radio

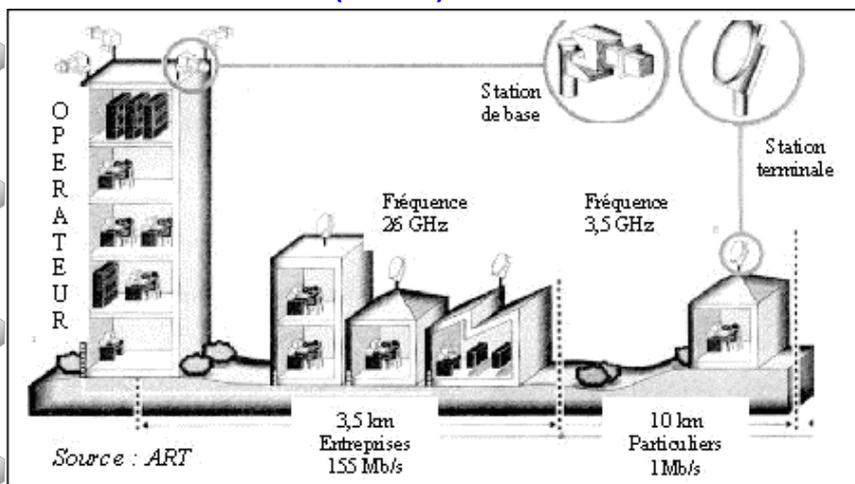
Elle permet l'accès au **réseau Internet** haut débit ( + téléphonie ) pour les zones « d'accès difficiles » .



### Caractéristiques :

- **Côté opérateur** : Passerelle pour la transformation des données du réseau de l'**opérateur** vers les **ondes radio** .
- **4 antennes** ( BTS ) aux **4 coins** d'un immeuble .

## • La boucle locale radio ( suite )



- **Côté client** : Une petite antenne orienté, et un boîtier jouant le rôle d'un MoDem .

## • La boucle locale radio : fonctionnement

- **Symétrie** des débits montant / descendants .

- Deux bandes de fréquences sont disponibles :

\* 26 GHz

**En mode « point à point »**, elle offre un service de liaison à ( très ) haut débit ( jusqu'à 155 Mbit/s ), dans un rayon de 3 à 5 km autour de la BTS .

**En mode « point-multipoint »**, le débit est partagé et couvre des besoins de 256 Kbit/s à 10 Mbit/s .

\* 3,5 GHz

**En mode « point-multipoint »**, le rayon d'action est plus large ( 10 à 20 km autour de BTS ) mais les débits offerts sont plus faibles ( 64Kbit/s à 2Mbit/s ) .

## • La boucle locale radio : Equipementiers



Antenne client



Antenne opérateur



Modem BLR

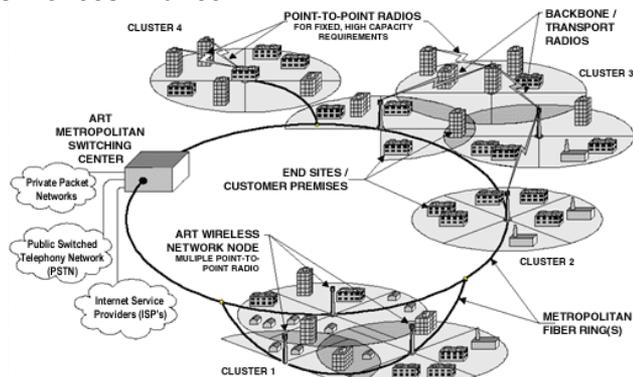
Alcatel, Thales e-Transactions SA, Sagem ...

## • La boucle locale radio : Réglementation

- Nombre d'opérateurs **limités** .
- 2 bandes de fréquence : 3,5 GHz et 26 GHz .
- Attribution de 54 licences aux opérateurs par l'**ART** .
  - \* 2 au niveau national : FirstMark et Fortel
  - \* 44 sur les régions ( Belgacom en tête ) .
  - \* 8 dans les DOM-TOM

## • La boucle locale radio : Projets pilotes

### Expériences menées France :



- **Lyon** : Bibliothèque ( débit 512 Ko/s ) .
- **Nancy** : Enseignement et recherche .

## • La boucle locale radio : Avantages / Inconvénients

### Avantages :

- **40 fois** plus rapide qu'un modem « classique » 56Ko/s
- Débit constant **garanti** .
- Connexion **permanente** .
- Baisse des prix: **20% moins cher** que l'ADSL.
- **Disponibilité** sur toute la France .
- Internet et Téléphone **simultanément** .

### Inconvénients :

- Chutes de débit en cas de mauvais temps pouvant aller jusqu'à 30%
- Nécessité d'un pare-feu en cas de connexion permanente .

## • Blue tooth

Il s'agit d'un « pico-réseau » développé par Ericsson en 1994, en hommage au Roi roi Viking, Harald II, du Danemark au Xe siècle.

### Caractéristiques principales :

- C'est une liaison radio ( voix, données) de courte distance ( quelques 15 mètres max ) .
- Le but est de supprimer les liaison filaires entre les différents appareils ( numériques ) .
- Fréquence de travail : 2,4 GHz .

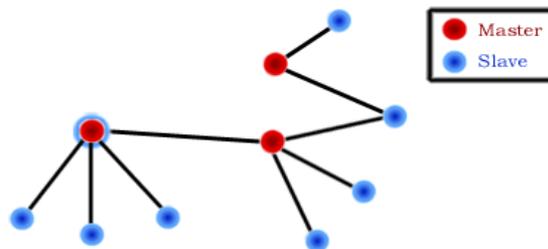


## • Blue tooth : caractéristiques principales ( suite )

- Intégration d'une puce blue-tooth dans chaque appareil .
- Sécurité de la communication : 1600 sauts de fréquence / s .
- Débit : 1Mb/s environ .
- Puissance adaptable en fonction de la distance entre les appareils .
- Pas de licence ...
- On peut connecter jusqu'à 80 appareils entre eux .

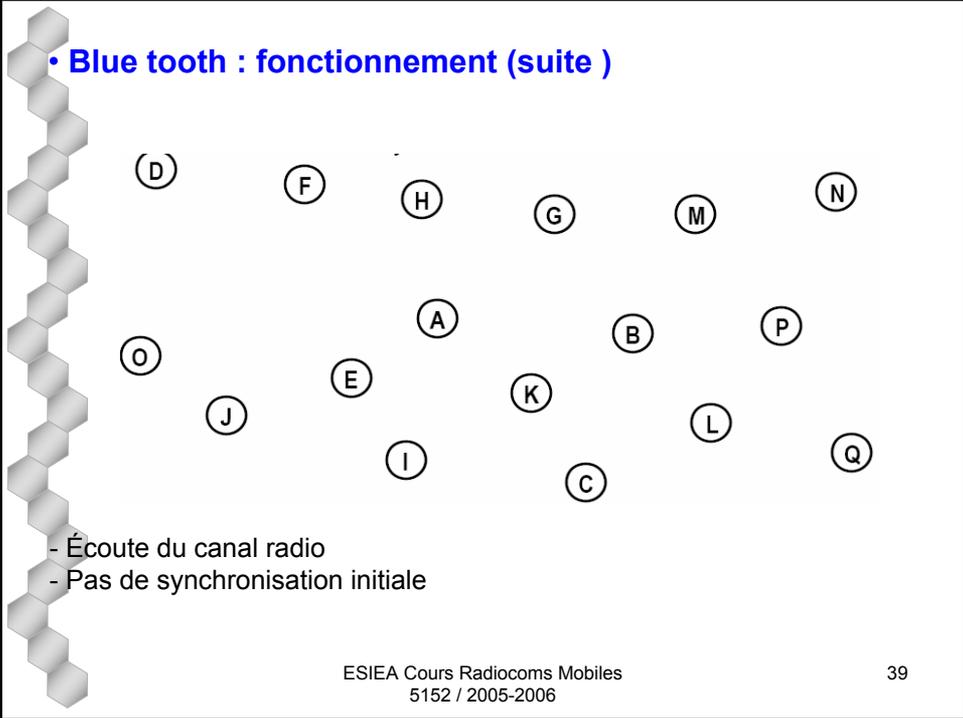


## • Blue tooth : caractéristiques principales ( suite )

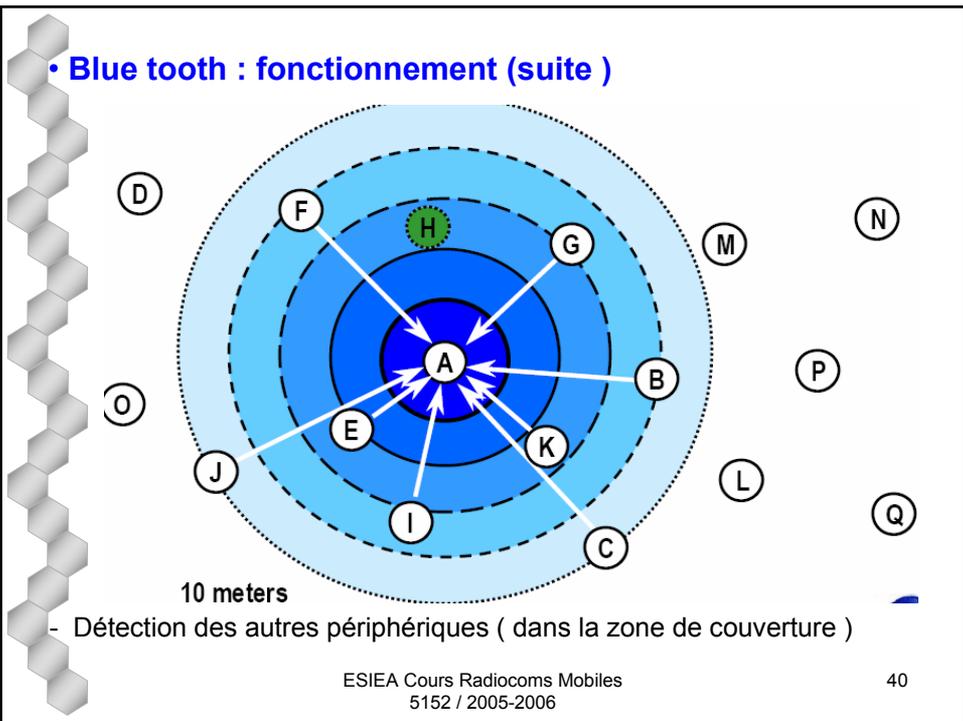


- Technologie dite « maître-esclave » .
- 1 maître et 7 esclaves .
- 1 maître peut être l'esclave d'un autre maître => 80 appareils .

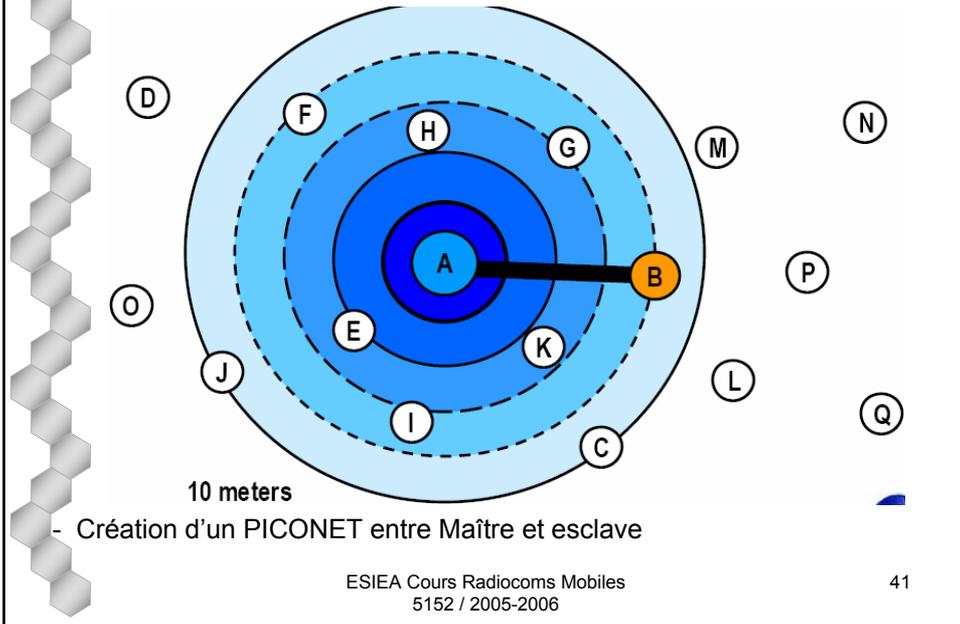
## • Blue tooth : fonctionnement (suite )



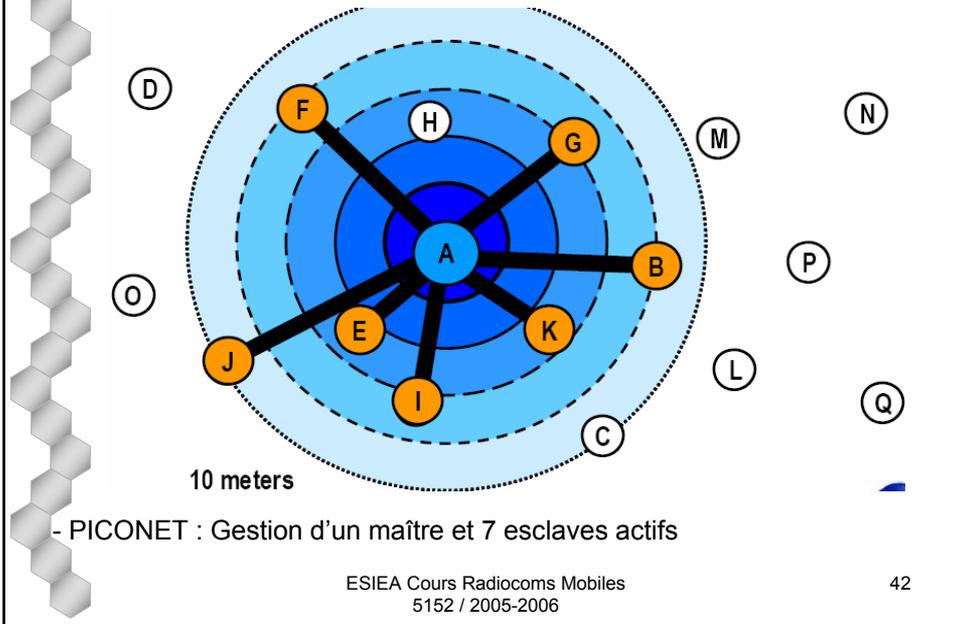
## • Blue tooth : fonctionnement (suite )



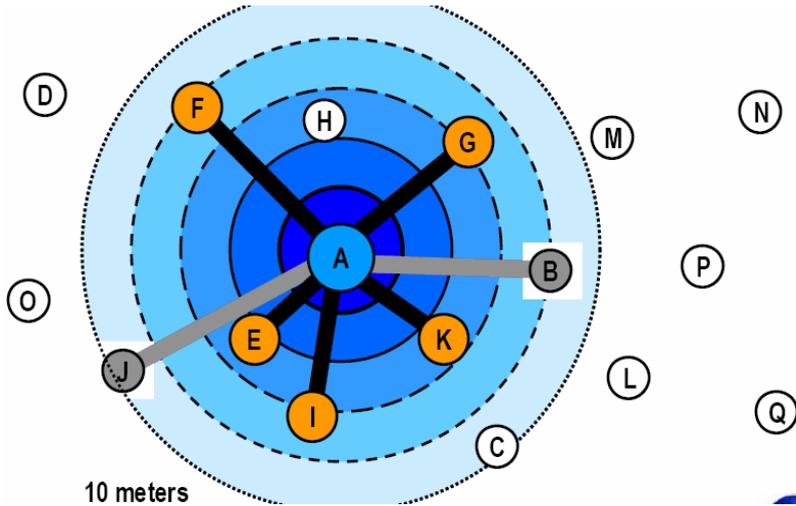
• Blue tooth : fonctionnement (suite )



• Blue tooth : fonctionnement (suite )

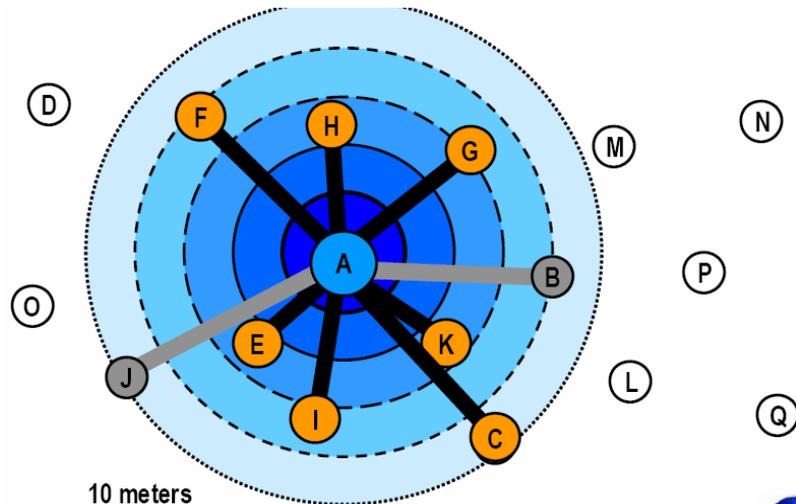


## • Blue tooth : fonctionnement (suite )



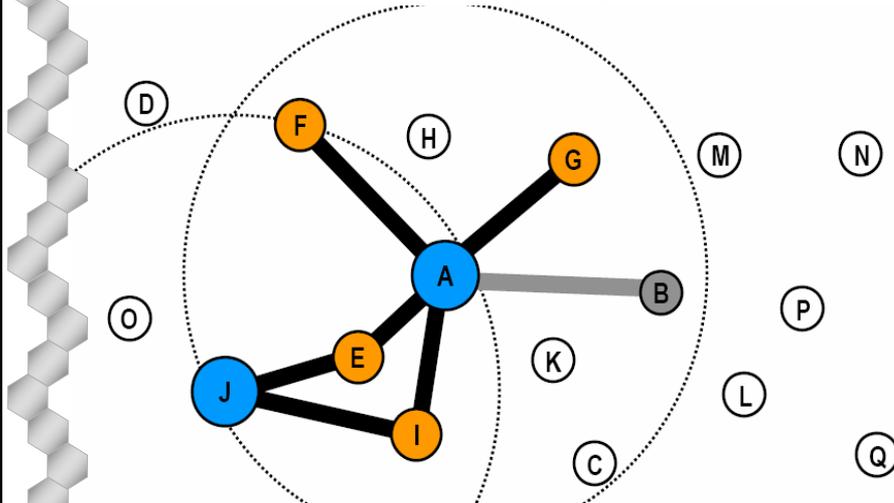
- « Parcage », pour économie d'énergie et/ou plus de périphériques

## • Blue tooth : fonctionnement (suite )



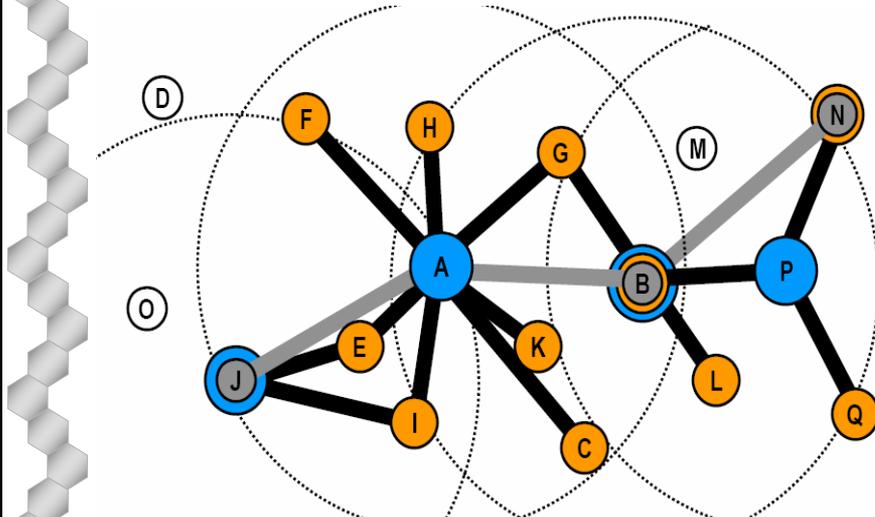
- « Parcage » => nouveaux esclaves, grâce aux adresses libérées

• Blue tooth : fonctionnement (suite )



- Plusieurs PICONETS créent un SCATTERNET

• Blue tooth : fonctionnement (suite )



- Les SCATTERNET peuvent créer des structures complexes

## • Blue tooth : Avenir



- Ce système est en cours de déploiement
- Actuellement, le coût de la puce est de 7 \$, il devrait être abaissé à 5 \$ .
- Les GSM BlueTooth se généralisent en Europe .
- La tendance actuelle est au sans fil .
- Soutenu par de nombreux partenaires (Nokia, Microsoft... ) .
- Arrivée de Bluetooth 2.0, avec un débit de l'ordre de 10 Mbit/s .

## • WiFi

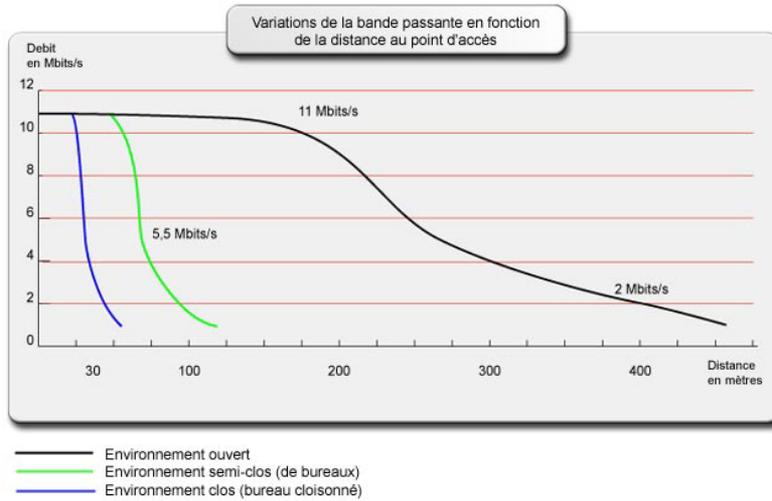
Il s'agit d'un « réseau sans fil », orienté IP haut débit .  
( Norme 802.11...)

### Caractéristiques principales :

- Portée : 100m maxi
- Débit théorique : 54 Mb/s ( en pratique : 11 Mb/s à 30 Mb/s )
- Fréquence de travail : 2,4 GHz .
- Étalement de spectre à saut de fréquence FHSS.
- Étalement de spectre à séquence directe DSSS .
- Technologie infrarouge .



## • WiFi : Portée



## • WiFi ( fonctionnement )

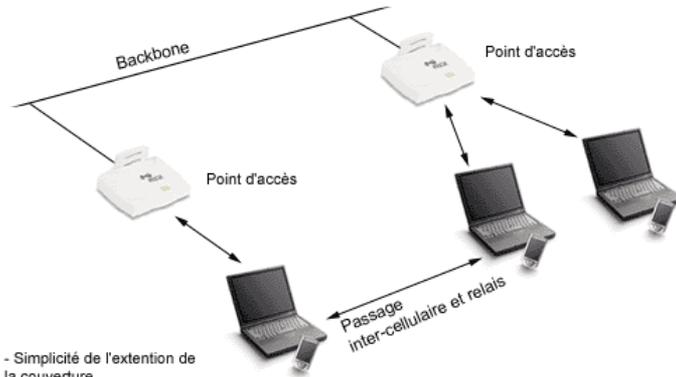


### Deux modes de fonctionnement

- Infrastructure : Les clients sont connectés à un point d'accès
- Had hoc : Les clients sont connectés en réseau

## • WiFi ( mode infrastructure )

Itinérance entre les points d'accès

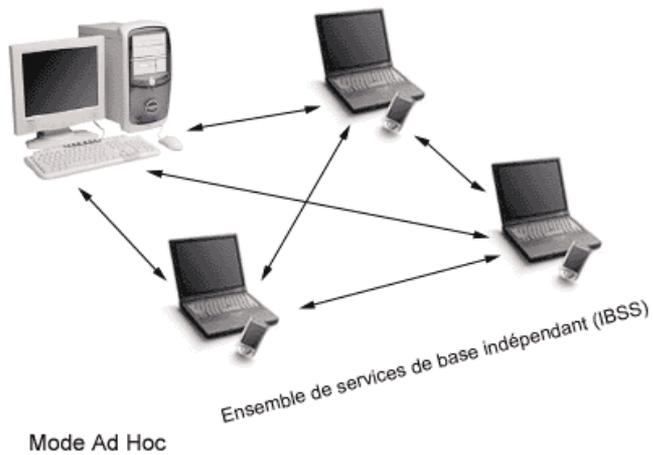


- Simplicité de l'extention de la couverture
- Equilibrage de la charge réseau
- Evolutivité et extension progressive
- Transparence pour l'utilisateur

ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

51

## • WiFi ( mode Had hoc )

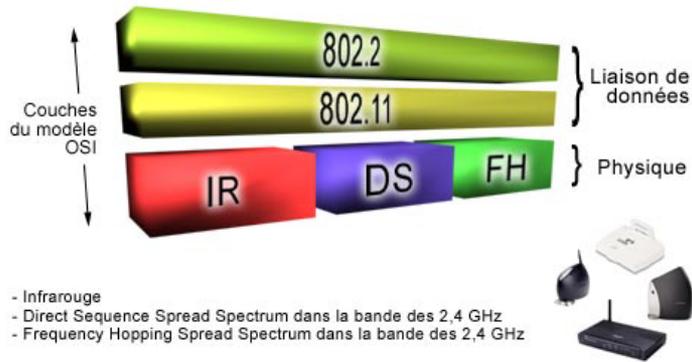


ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

52

## • WiFi ( couches physiques )

### Description des couches IEEE 802.11



## • WiFi ( sécurité )

Elle est basée sur le WEP : Wired Equivalent Privacy

### Caractéristiques principales :

- Clé partagée à 40 bits de RSA Data Security
- En cours d'évolution car il y a de nombreuses failles ...
- Il faut prévenir le piratage ( entrant et sortant )
- Bande de fréquence de 2,4 GHz « libre » en France .



## • Blue tooth et WiFi

	Bluetooth	WiFi
Rapidité	1Mbps	11Mbps
Application	Connexion point à point	Intégralité d'un réseau
Sécurité	Courte distance Indépendance des appareils	Risques de sécurité liés aux réseaux
Simplicité	Détection automatique	Configuration réseau
Puissance	Bluetooth < WiFi	
Compatibilité	Interférences possibles ( même bande de fréquence)	

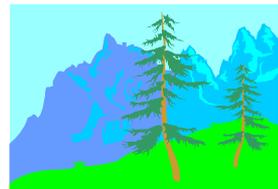
## LES SYSTEMES SATELLITES

Ils permettent une **couverture mondiale**, indépendante du relief .

Mer



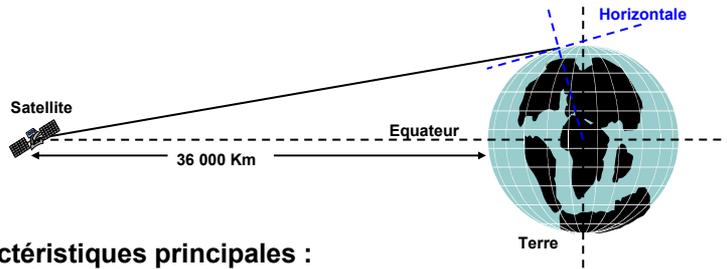
Désert



Montagne

## • Les satellites géostationnaires ( GEO )

Ils sont surtout dédiés aux systèmes de **diffusion** ( TV, radio ...)

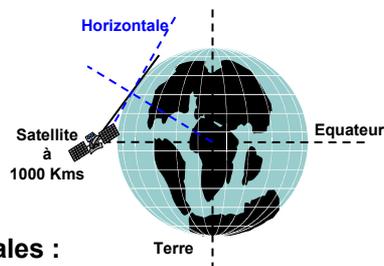


### Caractéristiques principales :

- Fixes par rapport à la terre
- Orbite haute : 36 000 Kms
- Délais de propagation important : 300 ms pour un bond
- Couverture mondiale avec 3 ou 4 satellites ( sauf les pôles )
- Durée de vie : 12 à 15 ans
- Antennes à terre de grand diamètre ( stations fixes )

## • Les satellites en orbite basse ( LEO )

Ils peuvent être combinés avec les systèmes terrestres ( UMTS par ex. ) .

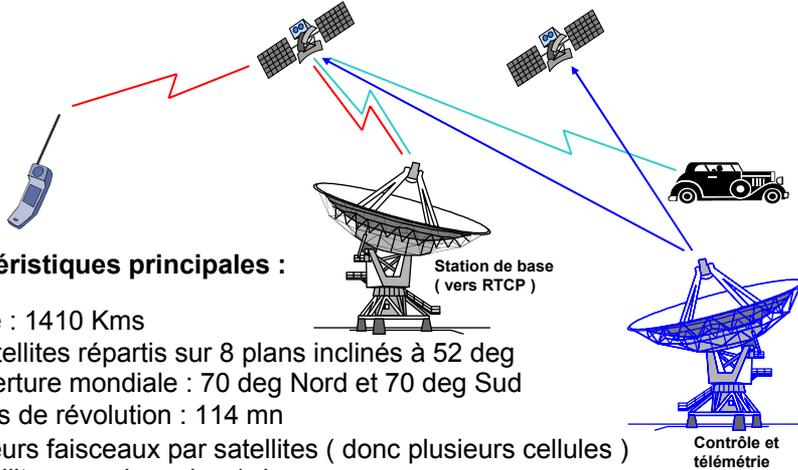


### Caractéristiques principales :

- Orbite : 700 à 1800 Kms
- Délais de propagation : 15 à 30 ms pour un bond
- Couverture mondiale : 20 à 70 satellites
- Temps de révolution : de l'ordre de 2 heures
- Durée de vie : 5 à 8 ans
- Antennes des mobiles compatibles
- Permettent la géolocalisation

## • Le système Globalstar ( LEO )

Se sont de simples relais entre un mobile et une station terrestre .



### Caractéristiques principales :

- Orbite : 1410 Kms
- 48 satellites répartis sur 8 plans inclinés à 52 deg
- Couverture mondiale : 70 deg Nord et 70 deg Sud
- Temps de révolution : 114 mn
- Plusieurs faisceaux par satellites ( donc plusieurs cellules )
- 6 satellites par plan, plus 1 de secours
- Deux liaisons radio duplex : vers le mobile et vers la station

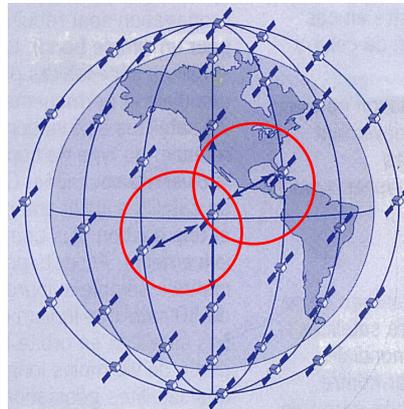
ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

59

## • Le système Iridium ( LEO )

Ils supportent des liaisons terrestres et intersatellites .

Source :  
France  
Telecom  
MT N°12



### Caractéristiques principales :

- Orbite : 780 Kms
- 66 satellites répartis sur 6 plans inclinés à 86,4 deg
- Couverture mondiale : quasi globale
- Constellation en quartiers
- Plusieurs faisceaux par satellites ( donc plusieurs cellules )
- 11 satellites par plan, plus 1 de secours
- 4 liaisons satellites adjacents ( intra et inter plans )

ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

60

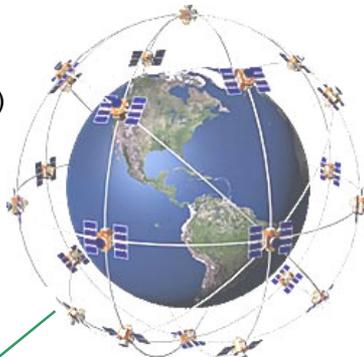
## • Le Système GPS

### Historique

- Le GPS a été créé dans le contexte de la guerre froide ( années 60 ) par les militaires américains .
- C'est le projet NAVSTAR
  - 1965 => Concept GPS
  - 1972 => Etude de faisabilité
  - 1978 => Lancer du 1er Satellite GPS, puis de 3 autres
  - 1983 => Accessibilité au civil ( SPS : dégradé )
  - 1989 => Deuxième vague de satellites
  - 1993 => Opérationnel pour l'aviation civile USA
  - 2000 => Suppression des restrictions d'accès

## • Le Système GPS – fonctionnement -

**Segment spatial**  
24 Satellites  
( dont 3 de secours )



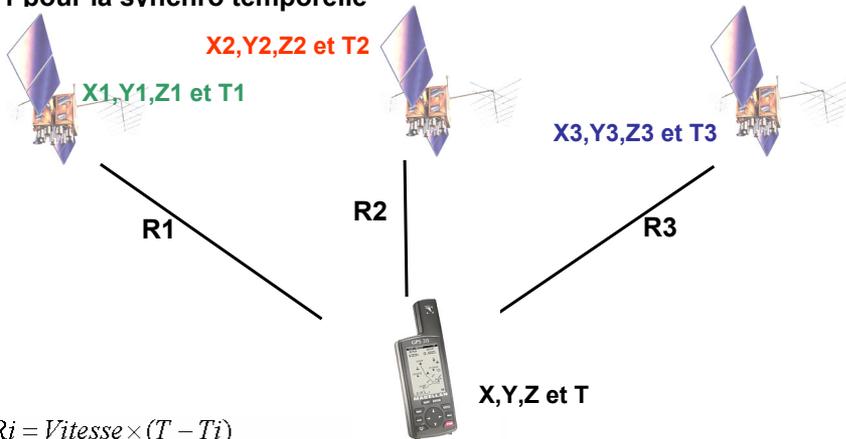
**Segment utilisateur(s)**  
Récepteur(s) GPS



**Segment de contrôle**  
Au sol

## • Le Système GPS – fonctionnement -

Il faut 3 satellites pour positionner un point sur le globe terrestre  
+ 1 pour la synchro temporelle



$$R_i = \text{Vitesse} \times (T - T_i)$$

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$$

ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

63

## • Le Système GPS – Trames -

### Transmission

- 5 trames de 30 caractères Ascii ( temps, position et état du satellite )
- Les trames sont codées par le code C/A et le code P

### Réception

- Les récepteurs civils connaissent tous les codes C/A des 24 satellites

**\$IDMSG, D1, D2, D3, ...Dn\*CS[CR] [LF]**

Début  
du msg

Message id  
Talker id  
(GP pour GPS)

delimiter  
Msg data  
fields

terminateur

Ckecksum  
2 hexa for 8 bits

Exemple de trame NMEA ( National Marine Electronic Association )

ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
5152 / 2005-2006

64

## • Le Système GPS – Fréquences et codage -

Fréquences de communication :

Segment de contrôle

2275 MHz

1783 MHz

Segment utilisateur

L2 1227 MHz en BPSK

L1 1575 MHz en PSK.

Codage de l'information (segment utilisateur) :

Code C/A

Données

Code P

Ou exclusif

Ou exclusif

Modulation BPSK / QPSK

Chaque satellite a son propre code C/A ( Coarse Acquisition ) et code P ( Protected ).

ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

65

## • GPS – caractéristiques du segment spatial -

- Orbite : 20 000 Kms
- 24 Satellites
- Temps de révolution : 12 h
- Poids : 1000 Kg
- Vitesse : 3 Km/S
- Envergure : 5,5 m ( antennes déployées )

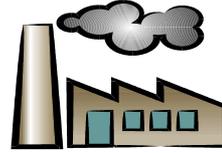


ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

66

## • Difficultés propres aux constellations de satellites

- Production en série
- Manœuvres pour conserver la configuration
- Gestion des risques de collision :



- \* Avec les autres satellites
- \* Avec les débris :
  - => 24 000 objets > 10 cm
  - => 110 000 de 1 à 10 cm
  - => 35 000 000 de 1 à 10 mm

- Gestion de la pollution spatiale ( destruction )
- Maintenance ( remplacement des satellites défectueux )
- Peu adaptés aux zones de trafic intense, comme les grandes villes

Citons aussi : **Celestri, Skybridge, Teledesic, Inmarsat, Euteltracs ...**

## V) LES SERVICES DU GSM

### • Définitions

Il en existe 3 :

Les Téléservices

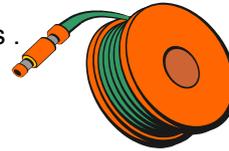
Les Services  
Supplémentaires

Les Services  
Supports

## • Les Services Support

C'est une liaison point à point, un « **tuyau** » au sens large du terme, qui assure une « transparence » du signal .

Il faut malgré tout préciser les paramètres techniques .



### Exemple : le réseau RTCP

Transmission d'un signal **audio** ( bande passante 300 Hz à 3000 Hz), en précisant :

- Les **niveaux** d'énergie
- Les **puissances** mises en œuvre
- Les **impédances** caractéristiques ( 600 ohms )

## Le GSM offre à ses abonnés :

- La transmission de données en mode asynchrone duplex ( 300-9600 bps )
- La transmission de données en mode synchrone duplex ( 1200-9600 bps )
- L'accès synchrone à un PAD ( assembleur / désassembleur de paquets 300-9600 bps )
- La transmission de paquets de données en mode synchrone duplex ( 2400-9600 bps )

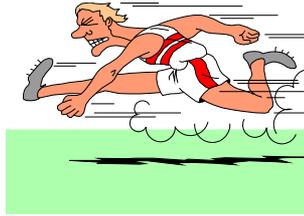


Le transfert peut être **numérique de bout en bout** ( Unrestricted Digital Information ) **OU** comporter une **conversion numérique / analogique** ( Terminal Adaptation Function et Inter Working Function ) .

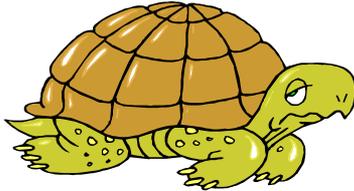
## Les transmissions peuvent se faire :

### En mode transparent

La liaison est « directe », donc plus rapide .



### En mode non transparent



On utilise le protocole Radio Link Protocol ( RLP ), qui fiabilise la transmission ( algorithmes, sommes de contrôle ...) mais qui occasionne des **retards** .

## Les principales normes utilisées par le GSM :

<b>V 21</b> 300 bps	<b>V 22</b> 1200 bps 2400 bps	<b>V 23</b> 1200 bps 75 bps	<b>V 26</b> 2400 bps	<b>V 32</b> 4800 bps 9600 bps
------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------	-------------------------------------

La vitesse de transmission maxi est de **9600 bps**, quel que soit le mode de transmission utilisé .

## • Les téléservices

- La transmission de **la voix** est le plus important des téléservices ( téléphonie : bande passante : 300 Hz - 3400 Hz ) . Elle inclue les appels classiques et les appels d 'urgence (112 ) .



- Les tonalités **DTMF**

<b>Fd</b>	1	2	3
<b>Fc</b>	4	$5(F_2 + F_c)$	$6(F_3 + F_c)$
<b>Fb</b>	7	8	9
<b>Fa</b>	$*(F_1 + F_a)$	0	#
	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>

Les fréquences sont « orthogonales », c 'est à dire sans harmoniques communes .

- La transmission de **messages courts** ( SMS : Short Message Service), éventuellement multipoint ( ou sans ) acquittement

Leur longueur est de 160 ( ou 93 ) caractères ASCII ou 140 octets .

Ils sont gérés par le **SMS Center**, qui les garde en mémoire pendant un temps paramétrable .



**Météo**



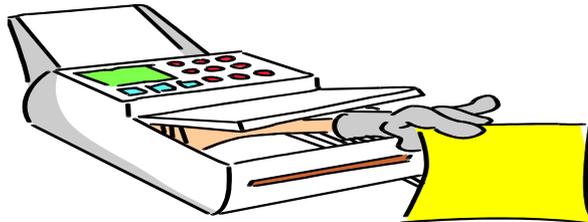
**Informations  
routière**

Les SMS font l 'objet d 'applications professionnelles spécifiques peu gourmands en ressources .

## Concaténation de plusieurs SMS

Il est possible de **concaténer plusieurs messages SMS** pour en transmettre de plus longs ( technique d 'encapsulation ) .

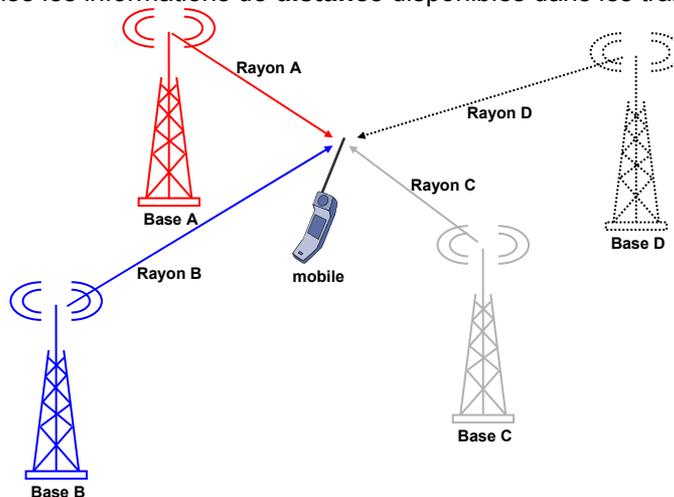
Identifiant	N°de mess.	N°de trame	Nb de trames	Data 156 octets
-------------	------------	------------	--------------	-----------------



- La transmission de **fax** en groupe 3 ( 9600 bps ), en mode manuel ( alternance fax / voix ) ou automatique . Celle-ci peut s 'effectuer en mode transparent ou non transparent .

- La géolocalisation ( triangulation : précision 120 m ) ( gestion d 'itinéraire, urgence ... )

Elle utilise les informations de **distance** disponibles dans les trames GSM .



## •Les services supplémentaires

- L'identification du numéro appelant
- Le renvoi d'appel ( paramétrable )
- Le double appel
- L'appel en conférence
- Le groupe fermé d'utilisateur  
( appels sortants et / ou entrants )
- La restriction d'appel  
( appels sortants et / ou entrants )
- La messagerie vocale  
( renvoi d'appel particulier )
- Les services de facturation  
( en temps réel utilisant les SMS )
- Les services supplémentaires non structurés  
( définis par l'opérateur : base de donnée particulière ...)



Ils sont tous activés ( ou désactivés ) par mot de passe, défini par l'utilisateur et géré par l'opérateur .

## VI) LES BASES DES TRANSMISSIONS RADIOELECTRIQUES

### •Le signal porteur

C'est d'un signal électrique sinusoïdal **élevé en fréquence** ( 900 Mhz pour le GSM ) .

Il n'y a en effet pas de rayonnement possible en dessous du MHz ( sauf à très forte énergie ) .

Ce signal va être modulé pour “ **transporter** ” une information utile, de caractère **aléatoire** .

L'harmonique la plus élevée du signal utile doit avoir une fréquence plus petite que le signal porteur ( 3,4 KHz pour la parole ) .

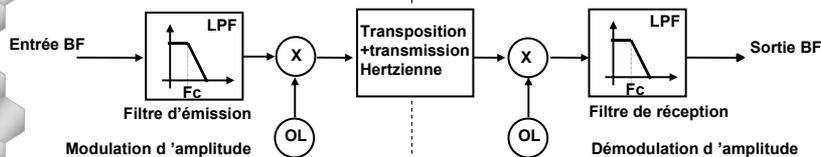
## •Les modulations

### LA MODULATION D'AMPLITUDE ( dite : AM )

L'information utile module l'**amplitude** du signal porteur .

La mise en oeuvre de cette technique reste **simple** et peu coûteuse .

- En émission : il s'agit d'un simple **multiplicateur** .
- En réception : on utilise un **détecteur d'enveloppe** ou un **multiplicateur** .



- L'inconvénient majeur de ce type de modulation est sa sensibilité aux parasites radio ( brouillage ) .

### Le signal en modulation d'amplitude ( aspect temporel ) :

$$y(t) = ( 1 + m.s(t) ). V. \cos(\omega.t)$$

$y(t)$  => signal modulé

$t$  => temps

$m$  => indice de modulation

$s(t)$  => signal modulant

$V$  => amplitude du signal porteur

$\cos(\omega.t)$  => signal porteur

$\omega$  => pulsation du signal porteur

Si  $s(t) = \cos(\Omega.t)$ , le signal modulé devient :

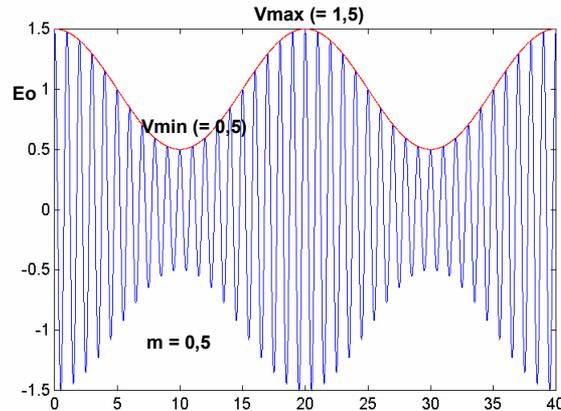
$$y(t) = ( 1 + m.\cos(\Omega.t) ). V. \cos(\omega.t) \quad (1)$$

$\Omega$  => pulsation du signal modulant

$m$  est en général compris entre 0 et 1 .

Si  $m > 1$  il y a " surmodulation " .

## Définition de l'indice de modulation m



L'indice de modulation m se définit comme :

$$m = (V_{max} - V_{min}) / (V_{max} + V_{min}) \text{ ou } m = (V_{max} - E_o) / E_o$$

$V_{max}$  => Crête de modulation                       $E_o$     => Valeur moyenne de la

$V_{min}$    => Creux de modulation,                      porteuse modulée ( offset )

ESIEA Cours Radiocommunications Mobiles  
5152 / 2005-2006

81

## Aspect spectral de la modulation d'amplitude

L'expression (1) peut se décomposer comme suit :

$$y(t) = V \cdot \cos(\omega \cdot t) + 1/2(m \cdot V \cdot \cos(\omega - \Omega) \cdot t) + 1/2(m \cdot V \cdot \cos(\omega + \Omega) \cdot t)$$

Il apparaît donc 3 raies dans le spectre :

- Une à  $\omega$
- Une à  $(\omega - \Omega)$
- Une à  $(\omega + \Omega)$

Si  $m = 1$  ( ou 100 % de modulation ), les 2 **bandes latérales** ont une amplitude de moitié par rapport à la porteuse .

Si  $P_o$  est la puissance de la porteuse et  $P_{tot}$  la puissance du signal modulé :

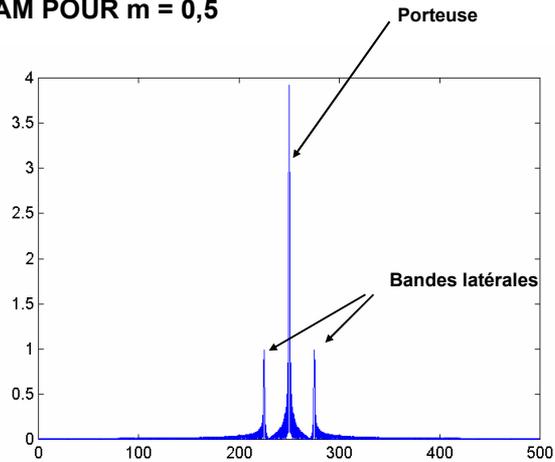
$$P_{tot} = P_o(1+m^2/2) \text{ soit } 1,5 P_o !... \text{ ( avec } m=1)$$

Cela veut dire que 1/3 de la puissance totale est réellement utile ( voire 1/6 car les 2 bandes latérales portent la même information ) .

ESIEA Cours Radiocommunications Mobiles  
5152 / 2005-2006

82

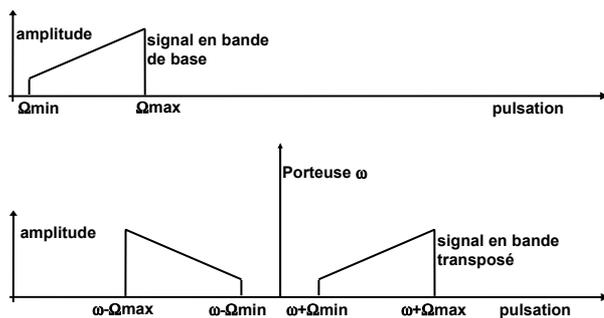
## SPECTRE AM POUR $m = 0,5$



En reprenant l'équation précédente, les bandes latérales valent  $1/4$  de la porteuse pour  $m = 0,5$

## Spectre réel d'un signal AM avec porteuse ( DBAP ) :

On ne travaille pas dans la réalité avec des signaux modulateurs sinusoïdaux, mais avec toute une bande de fréquence ( 300 Hz à 3400 Hz pour la téléphonie ) .



On remarque la symétrie du spectre par rapport à la porteuse ( ici une DBAP ) .

## LA MODULATION DE FREQUENCE ( dite FM )

L'information utile module **la fréquence** du signal porteur ( l'amplitude reste en principe constante ) .

La mise en oeuvre de cette technique est plus complexe qu'en AM .

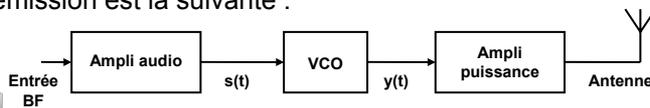
- **En émission** : on utilise un VCO .
- **En réception** : on utilise une PLL ou un filtre discriminateur ( convertisseur fréquence / tension ) .

Cette technique est beaucoup moins sensible aux parasites radio, et très utilisée en télécommunications .

Le spectre occupé est plus large .

## Le signal en modulation de fréquence ( aspect temporel ):

La chaîne de modulation angulaire, intégrée dans un système d'émission est la suivante :



VCO => Voltage Controlled Oscillator

La pulsation instantanée en sortie VCO :

$$\omega_{inst} = \omega_{vco} + \Delta\omega \cdot s(t)$$

Avec  $\omega_{vco}$  => pulsation VCO pour  $s(t) = 0$

$\Delta\omega$  => excursion de pulsation .

( $\Delta\omega > 0$ , constante VCO en radians par Volts\*s(t)max ) .

## Expression du signal modulé en fréquence ( aspect temporel ) :

Expression du signal modulé :

$$y(t) = V \cdot \cos(\omega_{vco} \cdot t + \Phi(\tau))$$

Sachant que  $\omega(t) = d\Phi(t)/dt$ , donc  $\Phi(\tau) = \int \omega(\tau) \cdot d\tau$

$\omega$  => Vitesse angulaire

$\Phi$  => Angle ( " distance " angulaire )

En transposant avec  $\Delta\omega \cdot s(t)$  :

$$y(t) = V \cdot \cos(\omega_{vco} \cdot t + \Delta\omega \int s(\tau) \cdot d\tau)$$

Si  $s(t) = \cos(\Omega \cdot t)$ , Alors :

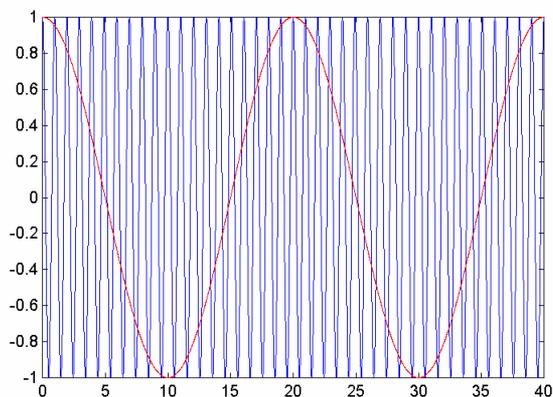
$$y(t) = V \cdot \cos(\omega_{vco} \cdot t + (\Delta\omega/\Omega) \cdot \sin(\Omega \cdot t))$$

$(\Delta\omega/\Omega)$  s'appelle l'indice de modulation  $\beta$  ou déviation crête de phase  $\Delta\phi$  .

$\Delta\omega$  dépend de l'**amplitude maximum** du signal modulant  $s(t)$  et d'une **constante propre au VCO** ( en radians par Volts ) .

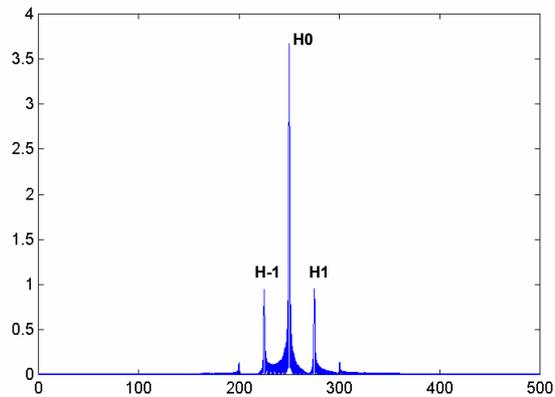
## INDICE DE MODULATION $\beta = 0,5$

Aspect temporel



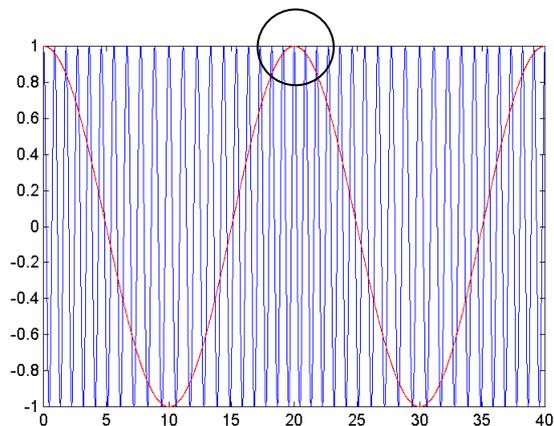
Il n'y a pas grand chose à observer...

**INDICE DE MODULATION  $\beta = 0,5$**   
**Aspect spectral ( symétrique par rapport à la porteuse  $H_0$  )**



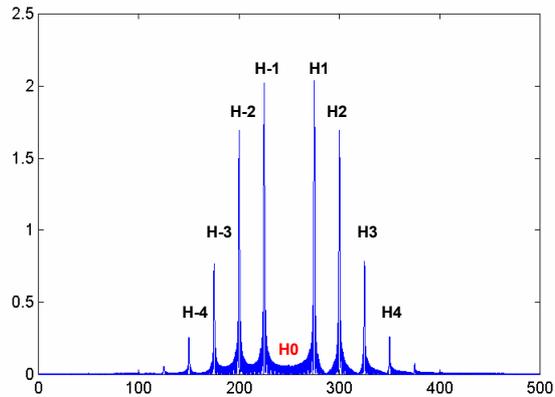
- Si  $\beta$  est petit devant 1, on ne trouve dans le spectre que la porteuse et 2 bandes latérales, d'amplitude  $H_0 * \beta/2$  .  
( modulation bande étroite ) .

**INDICE DE MODULATION  $\beta = 2,4$**   
**Aspect temporel**



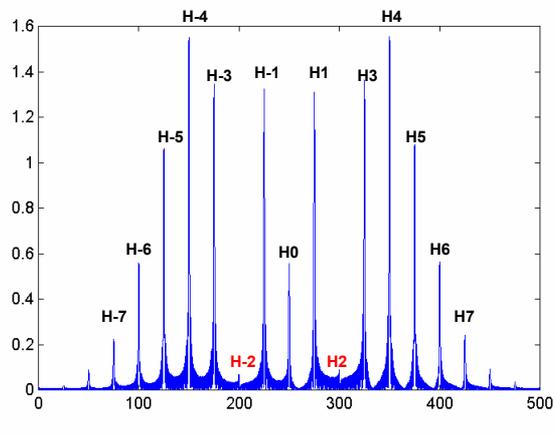
On **devine** une fréquence « plus élevée » du signal  $y(t)$  pour la valeur max de  $s(t)$  ( et inversement ) .

## INDICE DE MODULATION $\beta = 2,4$ Aspect spectral



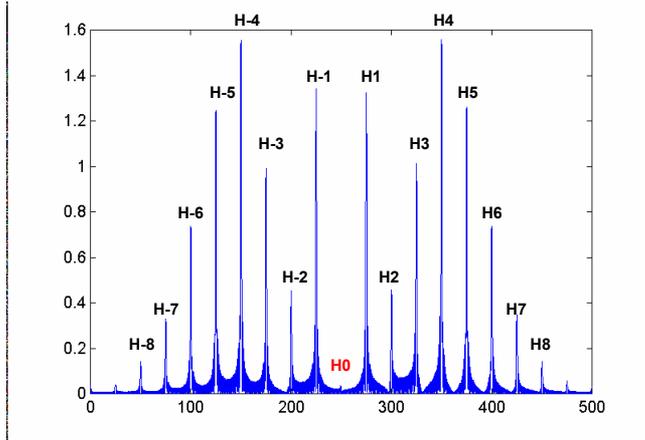
- Si  $\beta$  augmente, le spectre s'élargit . Pour certaines valeurs particulières, certaines raies s'annulent ( ici  $H_0 = 0$  pour  $\beta = 2,4 \Rightarrow$  plus de porteuse ) . Les raies sont espacées de  $\Omega$  .

## INDICE DE MODULATION $\beta = 5,1$ Aspect spectral



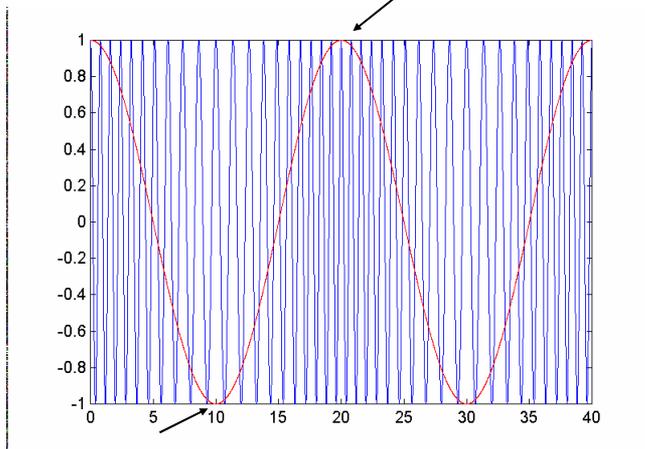
- Si  $\beta = 5,1$  ,  $H_2$  et  $H_{-2}$  s'annulent et le spectre s'élargit .

## INDICE DE MODULATION $\beta = 5,5$ Aspect spectral



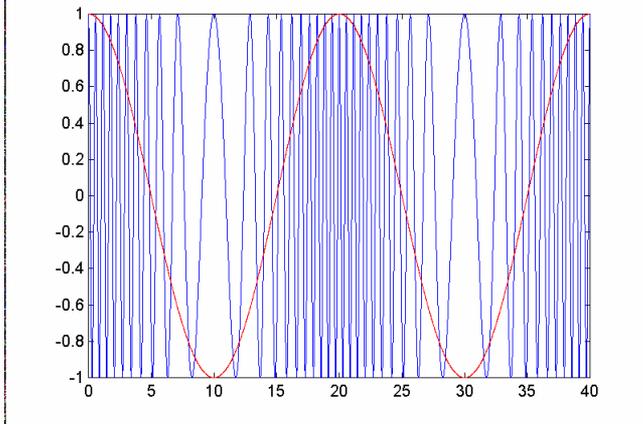
- Si  $\beta = 5,5$ , H0 s'annule de nouveau .

## INDICE DE MODULATION $\beta = 5,5$ Aspect temporel



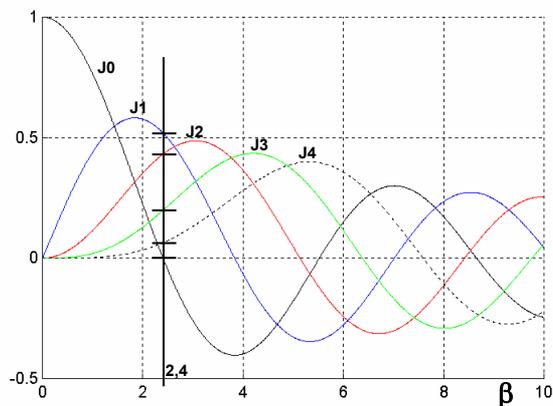
On voit nettement la différence sur  $y(t)$ , à  $s(t)$  min et  $s(t)$  max, pour  $\beta > 5$  (modulation bande large) .

## INDICE DE MODULATION $\beta = 10$ Aspect temporel



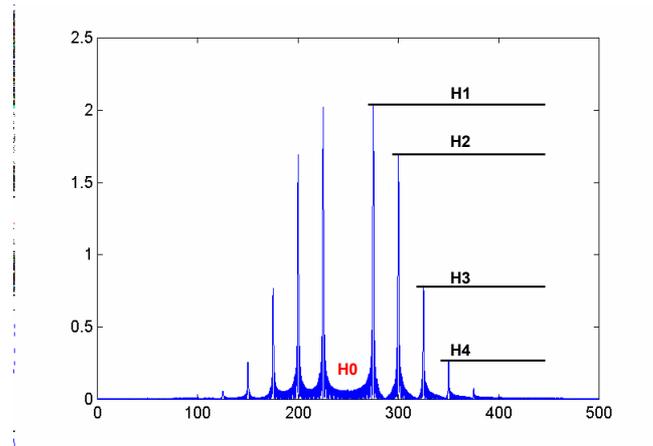
Cas d'étude mettant très nettement en évidence l'aspect temporel de la modulation de fréquence .

## Les fonctions de Bessel / Courbes



En traçant une verticale pour un  $\beta$  donné, on peut connaître l'amplitude de toutes les raies correspondantes ( ici, annulation de la porteuse ) .

## Les fonctions de Bessel / Application pour $\beta = 2,4$



A un facteur d'échelle près, on retrouve bien le point sélectionné sur les courbes de Bessel .

## Les fonctions de Bessel / Aspect mathématique

L'expression  $y(t) = V \cdot \cos(\omega_{vco} \cdot t + (\Delta\omega/\Omega) \cdot \sin(\Omega \cdot t))$  peut aussi s'écrire :

$$y(t) = V \cdot \cos(\omega_{vco} \cdot t) \cdot \cos(\beta \cdot \sin(\Omega \cdot t)) - V \cdot \sin(\omega_{vco} \cdot t) \cdot \sin(\beta \cdot \sin(\Omega \cdot t))$$

Les fonctions  $\cos(\beta \cdot \sin(\Omega \cdot t))$  et  $\sin(\beta \cdot \sin(\Omega \cdot t))$  sont décomposables en série de Fourier .

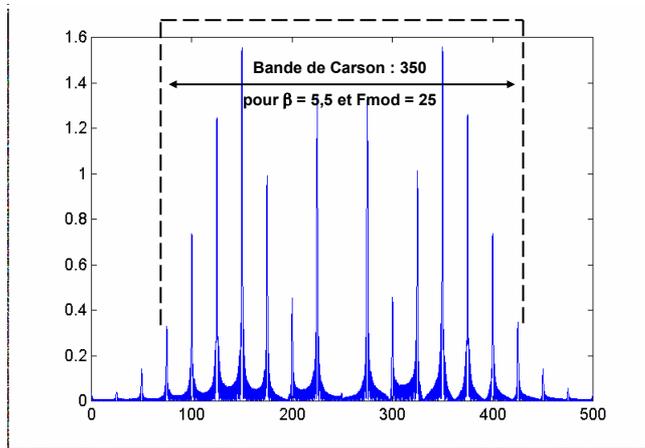
Leur développement fait apparaître les fonctions  $J_n(\beta)$  appelées **fonctions de Bessel** de première espèce .

Elles donnent l'**amplitude** de la raie **H** de rang **n**, **H(n)** sur le spectre FM, en fonction de l'indice de modulation  $\beta$  .

$$y(t) = +J_0(\beta) \cdot V \cdot \cos(\omega_{vco} \cdot t) \quad (H_0) \\ - J_1(\beta) \cdot V \cdot [\cos((\omega_{vco} - \Omega) \cdot t) - \cos((\omega_{vco} + \Omega) \cdot t)] \quad (H_1 \text{ et } H_{-1}) \\ + J_2(\beta) \cdot V \cdot [\cos((\omega_{vco} - 2\Omega) \cdot t) + \cos((\omega_{vco} + 2\Omega) \cdot t)] \quad (H_2 \text{ et } H_{-2}) \\ - \dots$$

## La bande de Carson

98 % de la puissance du signal modulé est compris dans la **bande de Carson** qui vaut  $2 \cdot (\Delta\omega + \Omega)/2\pi$  ou  $2 \cdot F_{\text{mod}} \cdot (\beta + 1)$ , avec  $F_{\text{mod}} = \Omega/2\pi$  ( précision toute relative !... )



ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

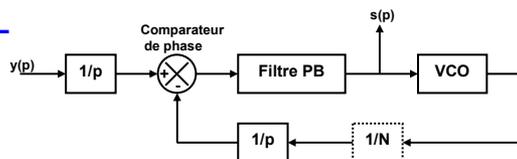
99

## Signal $s(t)$ non sinusoïdal

Si  $\beta$  est grand devant 1, l'allure globale du spectre n'est pas modifiée .

## LA DEMODULATION FM

### - La PLL



C'est un système asservi ( boucle verrouillée ) .

Le comparateur de phase et le filtre passe bas " corrigent " la fréquence instantanée du VCO .

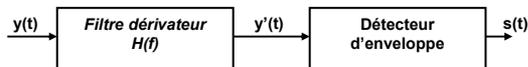
" L'erreur de phase " est intégrée par le filtre passe bas et produit un signal de " correction " pour le VCO .

ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

100

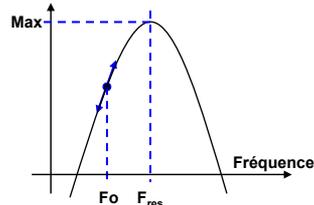
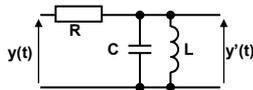
## LA DEMODULATION FM

### - Le discriminateur



On peut montrer que l'enveloppe du signal dérivé  $y'(t)$  est proportionnelle au signal à démoduler  $s(t)$ .

$$y'(t) = -V \cdot (\omega_{vco} + \Phi'(t)) \cdot \sin(\omega_{vco} \cdot t + \Phi(t)) \text{ avec } \Phi'(t) = \Delta\omega \cdot s(t)$$



Exemple de filtre dérivateur simple : on décale  $F_0$  (porteuse), de la fréquence de résonance du filtre.

## LA MODULATION DE PHASE

L'information utile module **la phase** du signal porteur (l'amplitude reste constante).

Elle est utilisée notamment dans le GSM.

On peut donc écrire directement :

$$y(t) = V \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \gamma \cdot s(t)), \text{ avec } \omega_0 \text{ Pulsation de la porteuse}$$

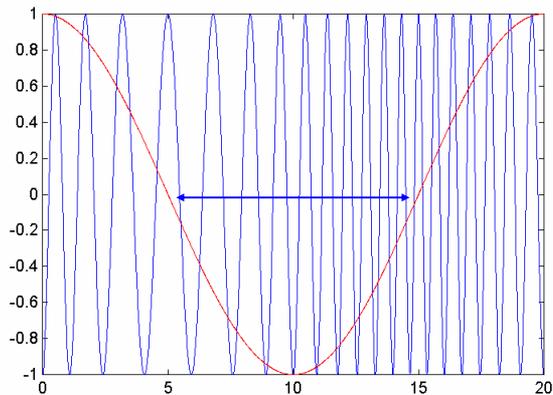
Si  $s(t) = \cos(\Omega \cdot t)$ , alors :

$$y(t) = V \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \gamma \cdot \cos(\Omega \cdot t))$$

L'indice de modulation de phase est  $\gamma$ , lié à une **constante** du modulateur de phase et à **l'amplitude maxi** du signal modulant  $s(t)$ , et vaut en général  $\pi/2$ .

$\gamma$  ne dépend pas de la pulsation du signal modulant.

L'aspect **spectral** est le même, mais l'aspect temporel diffère quelque peu .

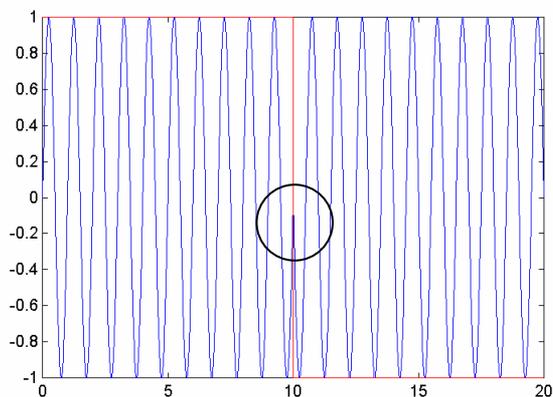


Cas d'étude pour  $\gamma = 3\pi$  et **s(t) sinusoïdal**

La phase de **y(t)** décroît tant que **s(t)** est négatif, et inversement .

### Modulation de phase .

**s(t) signal carré ( 1 période )**



Cas d'étude pour  $\gamma = 3\pi/2$

On observe une inversion de phase au front du signal carré .  
( étalement de spectre GSM => filtre gaussien ) .



## • La Modulation de phase « GMSK » ( suite )

On utilise, de plus, un filtre **gaussien**, pour encore minimiser l'étalement spectral .



Ce type de filtre possède d'excellentes performances en matière de **temps de propagation de groupe** .

## • La Modulation de phase « GMSK » ( suite ) / Aspect mathématique

Concernant le modulateur MSK, on peut écrire :

$$y(t) = V \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \Phi(t)) , \text{ avec } \Phi(t) = \pm \pi \cdot t / 2Th$$

En développant :

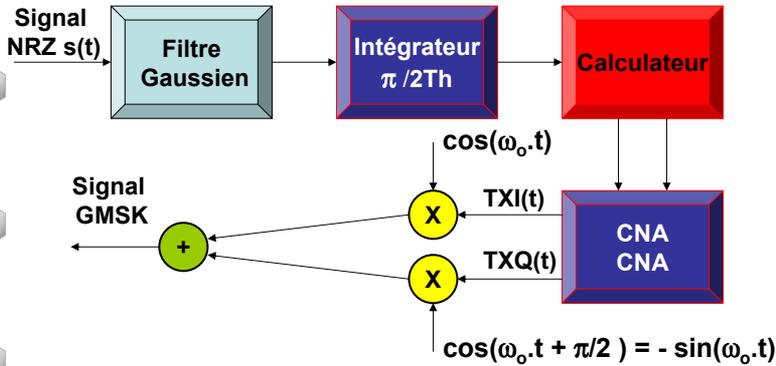
$$y(t) = TXI(t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + TXQ(t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \pi/2)$$

$$\text{Avec } TXI(t) = V \cdot \cos(\Phi(t)) \text{ et } TXQ(t) = V \cdot \sin(\Phi(t))$$

On utilisera un calculateur numérique pour générer **TXI(t) & TXQ(t)**  
Associé à 2 CNA, et un déphaseur de  $\pi/2$  pour la porteuse .

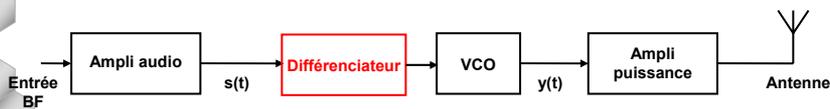
## • La Modulation de phase « GMSK » ( suite )

### Chaîne complète



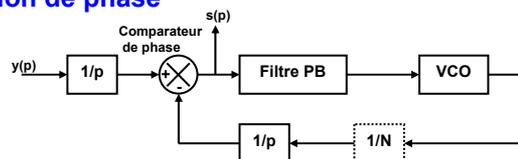
## Modulation de phase

### Exemple de chaîne de modulation de phase ( en analogique )



On reprend celle de la FM, en y ajoutant un **différenciateur** .

## Démodulation de phase

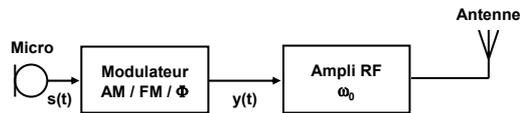


On utilise en principe une PLL, et on récupère **s(t)** à la sortie du comparateur de phase .

Celui-ci doit être « analogique » ( multiplicateur ) .

## • La chaîne de transmission analogique

### Chaîne d'émission :

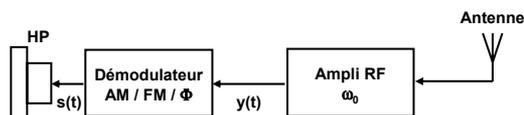


Le signal utile provient d'un microphone ( par ex. ) qui transforme l'énergie acoustique reçue en un signal électrique  $s(t)$  .

Le signal  $s(t)$  est transmis au modulateur ( on choisit le type ) et ainsi combiné au signal porteur ( RF ), ce qui produit  $y(t)$  .

## • La chaîne de transmission analogique

### Chaîne de réception :

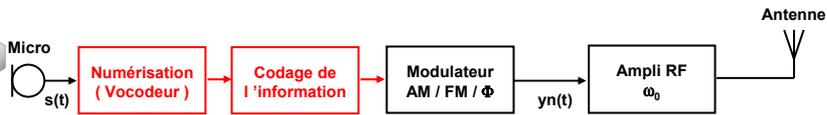


La chaîne synoptique de réception est le miroir de la chaîne émission .

La fréquence du signal porteur, ainsi que les paramètres de modulation doivent être identiques à ceux de la chaîne d'émission .

## • La chaîne de transmission numérique

Chaîne d'émission « numérique » :

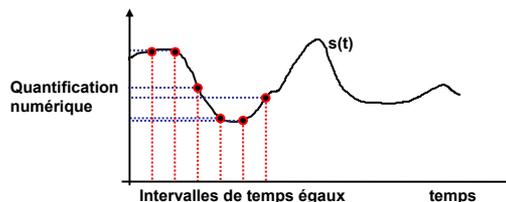


Nous rajoutons **deux éléments** dans la chaîne émission .

Il faut **numériser** le signal  $s(t)$  et le **coder** avant de le transmettre au modulateur (analogique) .

## La numérisation du signal $s(t)$

- Il faut d'abord l'**échantillonner** : « hachage » à des instants régulièrement espacés dans le temps .
- Vient ensuite la **quantification** : loi de correspondance (proportionnelle ou logarithmique) .

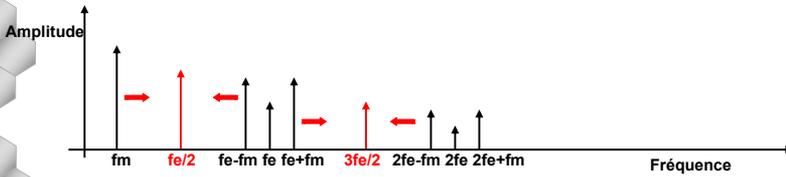


On transforme le signal analogique  $s(t)$  en une suite de nombres (format binaire) .

Il y a toujours **perte d'information**, par rapport au signal analogique .

## La loi de Shannon

Il faut toujours que la borne fréquentielle supérieure **fm** du spectre de **s(t)** soit inférieure **de moitié** à la fréquence d'échantillonnage **fe** .



### Spectre d'un signal échantillonné / bloqué :

si **fm** augmente, **fe-fm** diminue, et le recouvrement de spectre a lieu exactement à **fm=fe/2** .

Le vocodeur du GSM ne « respecte pas » la loi de Shannon, et ne transmet que les informations « utiles » .

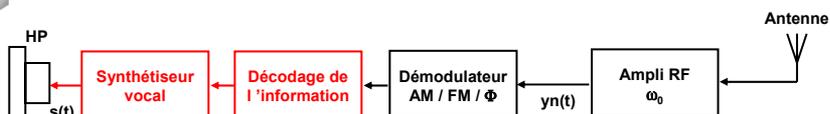
## Le codage de l'information

Le **codage de l'information** ( informations de redondance ) permet de corriger les erreurs de transmission .

L'information binaire est alors transmise au modulateur ( via un filtre gaussien pour le GSM ) .

Dans le cas de la modulation de phase, l'élément binaire « 0 » correspond en général à  $-\pi/2$ , et « 1 » à  $+\pi/2$  .

### La chaîne de réception « numérique » :



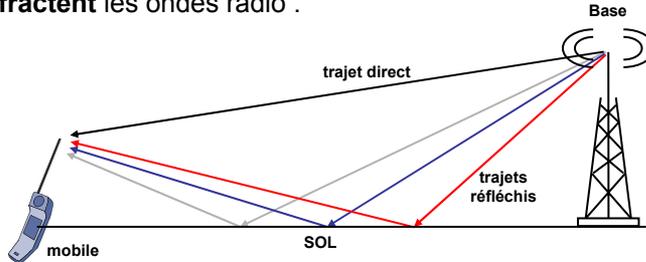
Elle intègre également **deux** nouveaux éléments .

## • Les défauts des radio-transmissions

Ils sont parfaitement connus, mais présentent un caractère **aléatoire** .

### L'INFLUENCE DU SOL ET DES OBSTACLES

Les obstacles de toute nature ( bâtiments, arbres, sol ...) **réfléchissent** ou **diffractent** les ondes radio .

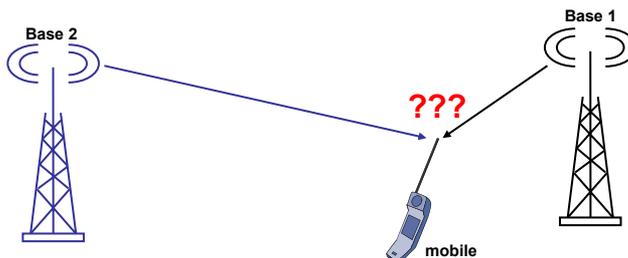


La somme des ondes directe et réfléchies, produisent une **atténuation** ou une **amplification** du signal modulé ( fading sur les systèmes AM ) .

## • Les défauts des radio-transmissions ( suite )

### LES INTERFÉRENCES CO-CANAL

Une liaison radio peut être perturbée par un autre émetteur diffusant sur un même **canal fréquentiel**, même s'il est éloigné .



Il faudra donc respecter une distance **minimum** pour pouvoir réutiliser un même canal fréquentiel .

## • Les défauts des radio-transmissions ( suite )

### LES INTERFÉRENCES D 'INTERMODULATION

Elles se produisent lorsque deux émetteurs diffusant sur deux fréquences différentes, sont trop **proches** ou trop **puissants** .

Ce phénomène est dû aux **distorsions** non linéaires des circuits **d'amplification** de la chaîne émission ( ou de réception ) .

Il génère de **nouvelles fréquences** dans le spectre radio ( IP3 dans la bande ), dont les puissances ne sont alors plus négligeables .

Des transmissions radio **complètement étrangères** à celle des émetteurs ci-dessus peuvent être aussi perturbées .

## • Les défauts des radio-transmissions ( suite )

### LE BRUIT DE FOND

La sensibilité du récepteur ( quelques  $\mu\text{V}$  ) est à l 'origine de ce défaut .

L 'antenne de réception et les premiers étages génèrent un **bruit thermique** ( bruit blanc ), amplifié par les étages suivants, qui se superpose au signal RF



Le « **souffle** » ainsi engendré à la démodulation doit être **filtré**, pour améliorer le rapport Signal/Bruit .

## • Les défauts des radio-transmissions ( suite )

### LE BRUIT ATMOSPHERIQUE

Les phénomènes atmosphériques ( orages ... ) génèrent des ondes électromagnétiques qui perturbent les transmissions radios .



Ils se traduisent par des impulsions de **haut niveau** pouvant provoquer la **destruction** des récepteurs .

## • Les défauts des radio-transmissions ( suite )

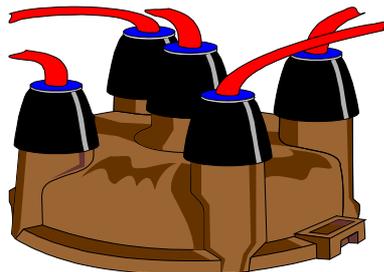
### LES BRUITS INDUSTRIELS

Les phénomènes électriques de **tout type** brouillent des ondes radio ( machines électriques de puissance, allumage des moteurs à essence ... ) .

Des normes **CEM** permettent un contrôle des puissances de brouillage du spectre radio .

Les **blindages** ( câbles coaxiaux, boîtiers métalliques ... ) sont systématiques dans les matériels radio .

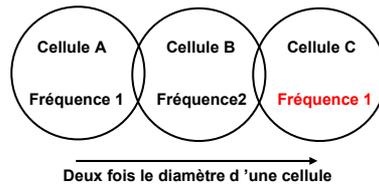
Mais les **antennes** ne peuvent **pas** être protégées .



## VII ) LE CONCEPT CELLULAIRE ( GSM )

### • La gestion des fréquences

Les fréquences ( canaux fréquentiels ) peuvent être **réutilisées** dans des cellules suffisamment **éloignées** .



Cela permet de **multiplier** le nombre d'abonnés d'un réseau cellulaire .

### • La gestion des fréquences ( suite )

Le réseau GSM peut gérer au maximum une **centaine** d'abonnés par cellule .

On ajuste la **taille** des cellules en fonction de la **densité** du trafic, plus important en ville ( micro-cellules, pico-cellules ) et plus faible en zone rurale ( macro-cellules ) .

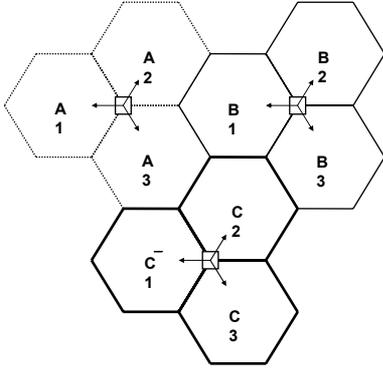
La taille des cellules d'un réseau GSM varie de quelques **dizaines** de mètres à **30 Km** .

Les zones de couverture ( les cellules ) sont contrôlées par des antennes **directives** ( zone urbaine ), et la **puissance** des émetteurs des « stations de base » ( BTS ) .

## • Le motif

Il s'agit d'un **groupe** de cellules ( 9 par ex. ) destiné à contrôler un espace géographique .

Il est modélisé à l'aide d' **hexagones**, les stations de base ( BTS ) se trouvant à l'intersection de 3 cellules ( optimisation ) .



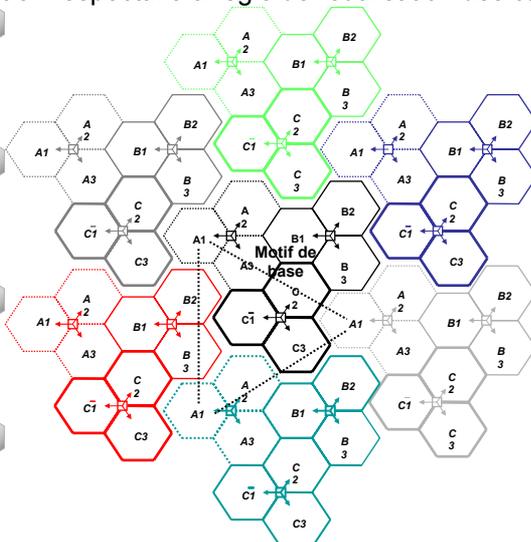
### Exercice :

On veut couvrir un territoire avec le motif de base ci-contre :

1) **Combien** de motifs similaires entourent ce motif de base ?

2) **Comment** sont disposés les motifs, en respectant la règle de réutilisation des fréquences ( A1,A2...B1,B2 ... ) ?

On peut « développer » le réseau en **reportant** le motif ( par translation), tout en respectant la règle de réutilisation des canaux fréquentiels .



La taille du motif varie **globalement** en fonction de la densité du trafic .

### **Motifs possibles :**

$$K = i^2 + i \cdot j + j^2$$

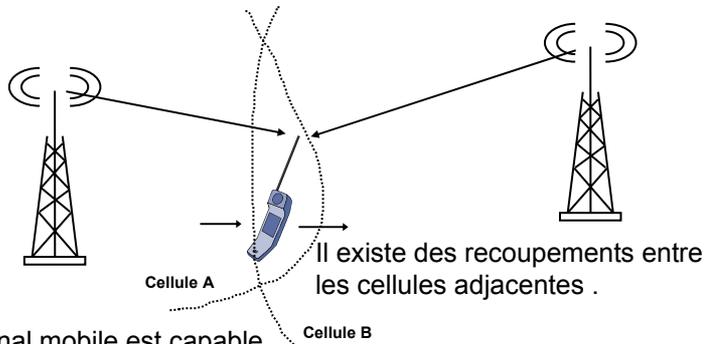
**K** : nombre de cellules du motif  
**i** et **j** entiers  $\geq 0$

Ex.  $K = 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13 \dots$

## • Gestion de la mobilité

La mobilité des abonnés d'un réseau cellulaire dicte 3 contraintes :

1 ) La liaison doit être **maintenue** pendant un changement de cellule .



Un terminal mobile est capable de communiquer avec deux ( max: 7 ) stations de base **simultanément** . C'est le **Hand Over** .

ESIEA Cours Radiocommunications Mobiles  
5152 / 2005-2006

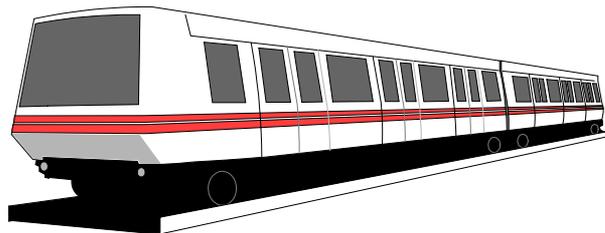
127

## • Gestion de la mobilité ( suite )

2 ) Les abonnés doivent pouvoir être **localisés** dans une cellule donnée .

Si le terminal est éteint, le réseau mémorise **la dernière localisation connue** .

3 ) Le réseau est capable d'estimer les **déplacements** d'un abonné dans une cellule .



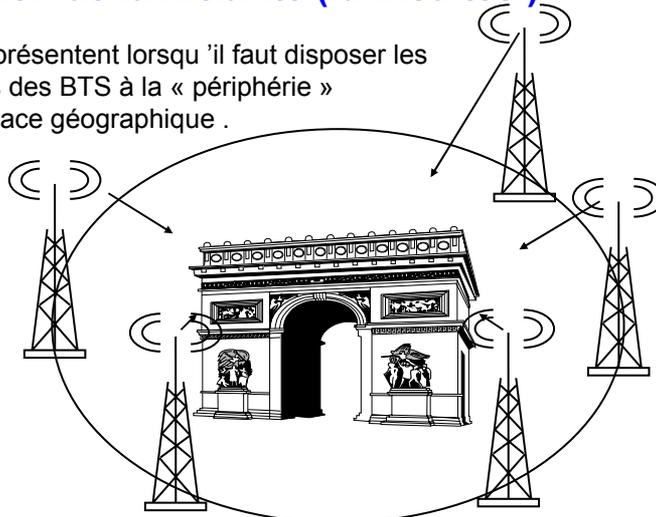
Ceci est important pour la **synchronisation** des terminaux avec la station de base ( BTS ) .

ESIEA Cours Radiocommunications Mobiles  
5152 / 2005-2006

128

## • Gestion de la mobilité ( difficultés )

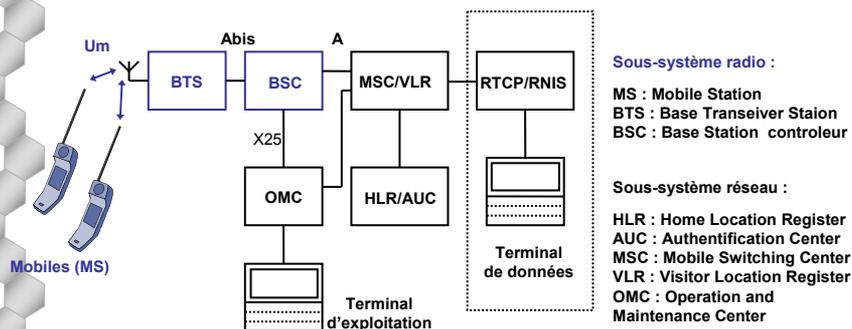
Elles se présentent lorsqu'il faut disposer les antennes des BTS à la « périphérie » d'un espace géographique .



Il peut se produire des « hand over » à quelques mètres près et des saturations de cellules .

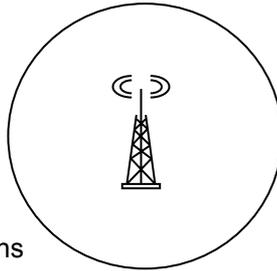
## VIII ) INFRASTRUCTURE D 'UN RESEAU GSM

### • Présentation



## • La station de base ( BTS )

La station de base assure la couverture d 'une **cellule** .



C 'est le point d '**entrée** pour les stations mobiles .

Elle est essentiellement constituée d 'un ensemble d '**émetteurs / récepteurs** ( reliés au reste du réseau ) .

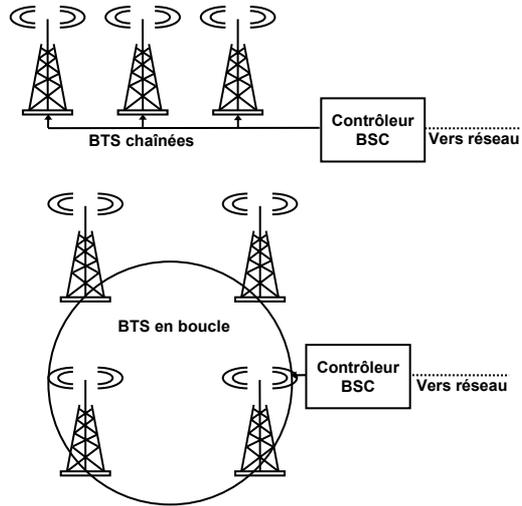
L 'exploitation d 'une BTS se fait **localement** ou par **télécommande**, à travers le contrôleur associé .

Elle gère **7 à 112** communications simultanées .

## • Fonctions de la station de base

- La transmission radio au format **GSM**
- Le **codage / décodage** des canaux radio
- Le **cryptage** des communications
- La mesure de la **puissance** des stations mobiles et de la **qualité** de la transmission
- L '**égalisation** du canal radio ( en temps réel )
- La transmission sur la « voie » de **signalisation**
- L '**exploitation** et la **maintenance** de ses équipements
- La **liaison** avec le contrôleur de station de base associé ( interface A bis )

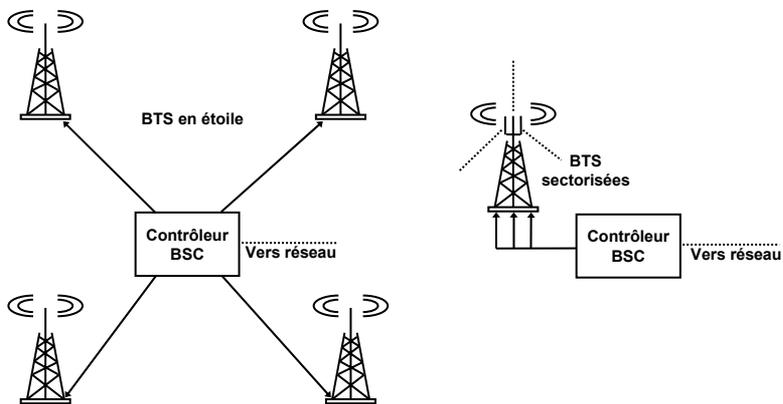
## • Liaisons avec le contrôleur associé



ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

133

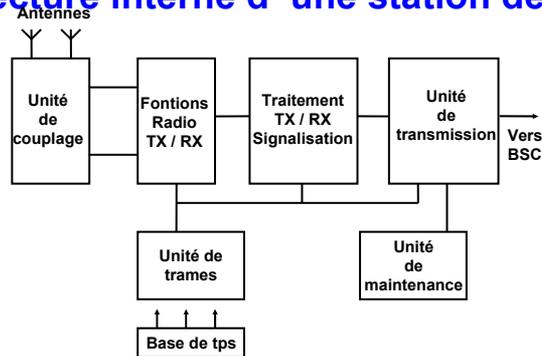
## • Liaisons avec le contrôleur associé ( suite )



ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

134

## • Architecture interne d'une station de base



### LA BASE DE TEMPS

Elle fournit les différents signaux d'horloges aux autres éléments :

- Quartz de **bit** ( 0,923 uS x 4 )
- Horloge de **slot** ( 576,92 uS )
- Horloge de **Trame TDMA** ( 4,615 mS - 8 slots ), **Multitrame, Supertrame et Hypertrame**

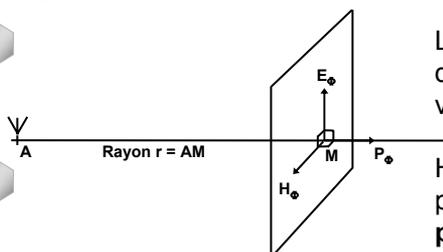
## LES ANTENNES

Une antenne produit un champ **électromagnétique** d'**induction** et de **rayonnement** .

A une distance suffisamment grande, il est composé d'un champ électrique **orthogonal** à un champ magnétique .

On se place à une distance  $r \gg$  **longueur d'onde** .

Ce rayon  $r$  définit une sphère et **A** ( antenne ) en est le **centre** .



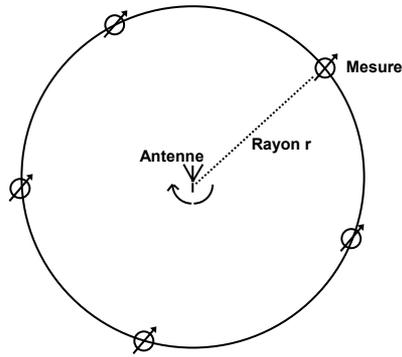
La densité de puissance par unité de surface est caractérisé par le vecteur de Poynting .

$H_\phi$  et  $E_\phi$  sont en **phase**, et la propagation s'effectue en **ondes planes**

## Caractérisation d'une antenne

Les antennes sont des dispositifs **réversibles** .

On l'alimente avec une **puissance définie** ( Générateur RF ) .



On mesure la puissance sur chaque point de la **sphère** de rayon **r** ( champ-mètre ) .

En fait, on fait **tourner** l'antenne dans le plan **horizontal** et un plan **vertical** particulier .

## Cas d'une antenne demi-onde

On mesure l'antenne dans un plan **vertical** .

Les mesures ( 1,2,3 ... ) donnent les **modules** des vecteurs (  $V_1, V_2, V_3 \dots$  ) en fonction de l'angle d'élévation  $\Phi$  .

Les vecteurs balayent une **surface**, limitée par une **courbe** . ( ici:2 cercles ) .

Dans le plan **horizontal**, cette antenne rayonne uniformément . La courbe sera un **cercle** .

Des plans vertical et horizontal, on déduit une **forme spatiale** ( ici:un tore ) .

## Gain d'une antenne

Une antenne est caractérisé par **comparaison** de son rayonnement par rapport à une **antenne de référence** ( antenne isotrope ) .

Le **rapport** entre la puissance **maxi rayonnée** ( dans la direction du plus grand rayonnement ) de l'antenne étudiée et de l'antenne isotrope placé au **même endroit** et alimentée par la **même énergie** se nomme **gain** de l'antenne .

Le gain s'exprime en **dB** .

$$G = 10.\log(P_x/P_i)$$

$P_i$  => Puissance antenne isotrope

$P_x$  => Puissance antenne à mesurer

Dans le cas précédant, la direction du plus grand rayonnement est un **axe quelconque** du plan **horizontal** .

## Diagramme de rayonnement

C'est l'**évolution** du rapport entre puissance rayonnée dans l'espace et puissance maximum de l'antenne ( ici antenne directive ) .

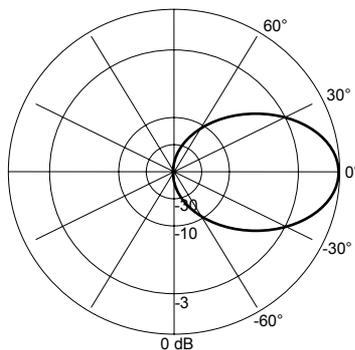


Diagramme horizontal

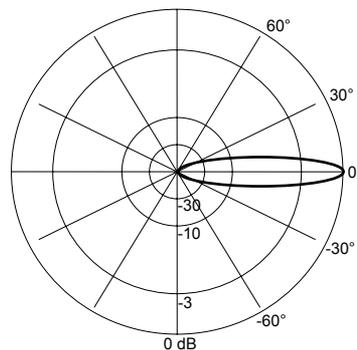


Diagramme vertical

## LES ANTENNES DU GSM

### Mobiles

Ce sont des **dipôles**  $\lambda / 4$  ( en quart d'onde ), quelquefois bi-bandes, qui tiennent compte de l'effet de sol .

La " longueur " de l'antenne est ainsi doublée .

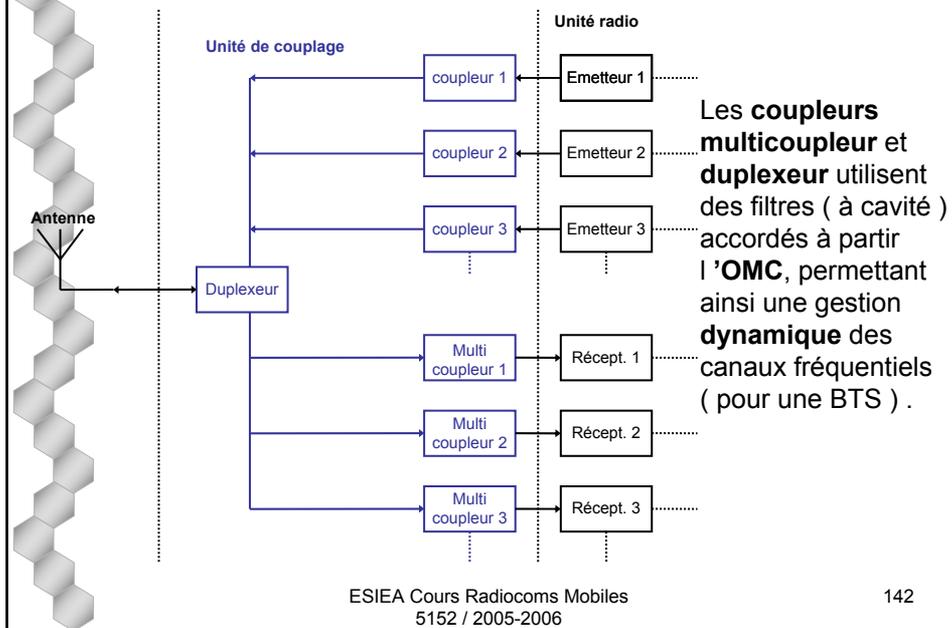
Ces antennes sont **omnidirectionnelles** dans le plan horizontal .

### Stations de base

Il en existe plusieurs types :

- Pour les **zones rurales**, les antennes sont **omnidirectionnelles**, montées sur un mat, dans une zone dégagée . Elles se trouvent au **centre** de la cellule .
- Pour les **zones urbaines**, elles sont **directives** (  $120^\circ$  ... ), en forme de panneaux ( extérieur ) ou de cylindres ( intérieur ), inclinées verticalement de quelques degrés ( down-tilt ) .

## L'UNITÉ DE COUPLAGE





## L'UNITE RADIO

Elle se compose de **plusieurs émetteurs** et de **plusieurs récepteurs**, reliés aux coupleurs et multicoupleur à l'aide de câbles coaxiaux .

L'**émetteur** est chargé la **modulation** ( modulation de phase " gaussienne " ), de la **génération de la fréquence porteuse** et de l'**amplification** .

Le **récepteur** effectue les **opérations inverses**, et délivre des informations de niveau pour les signaux reçus .

L'unité radio permet la **détection et la localisation des défauts** dans la chaîne de transmission " radio " ( tests de rebouclages ) .

Elle assure aussi la **commutation** des " sauts en fréquence " .



## L'UNITE DE TRAME

Les trames numériques GSM ( d'ordre 8 ) organisent les données binaires, montantes et descendantes .

L'unité de trame les constitue, gère les **canaux radios**, les **puissances d'émission** et la **qualité** ( en réception ) des transmission ( taux d'erreur ) .

Elle assure aussi le **codage / décodage** des canaux, l'**entrelacement** et le **cryptage** .

## L'UNITE DE TRAITEMENT / SIGNALISATION

Elle permet d'aiguiller les données de type " **normal** " ou " **signalisation** " vers l'unité de transmission .

## L'UNITÉ DE TRANSMISSION

C'est la partie qui gère la **liaison** avec le contrôleur de station de base ( BSC ) .

Elle permet de multiplexer jusqu'à **80 " canaux "** plein débits ( 13 Kbits ) , sur une liaison **MIC** à 2 Mbits/s.

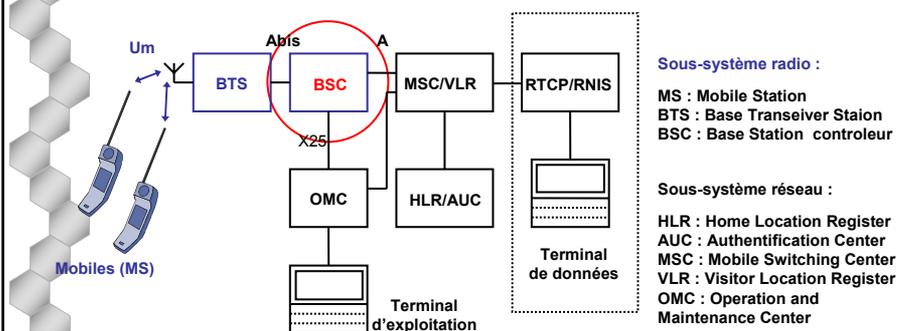
Cette unité permet de **télécharger** dans la BTS les différentes **versions de logiciel**, ce qui permet à l'opérateur d'exploiter son réseau de façon très souple .

## L'UNITÉ DE MAINTENANCE

Elle gère l'**interface homme / machine**, les **alarmes** de la BTS .

Elle se charge du **transfert des logiciels** et du **transfert des commandes** en provenance du contrôleur associé ( canaux, tilt des antennes... ) .

## • Le contrôleur de station de base ( BSC )





## • Le contrôleur de station de base ( BSC ) - suite -

C'est lui qui pilote les stations de base d'un motif .

Il est chargé :

- Du **dialogue** avec le commutateur MSC
- De la **sauvegarde** du logiciel et des **paramètres** des BTS
- De la gestion de la **puissance** des émissions radio
- De la gestion des **transferts intercellulaires** ( hand over )
- De la gestion des **communications** ( établissement, supervision, libération )
- De la gestion des **processus d'urgence**



## • Le contrôleur de station de base ( suite )

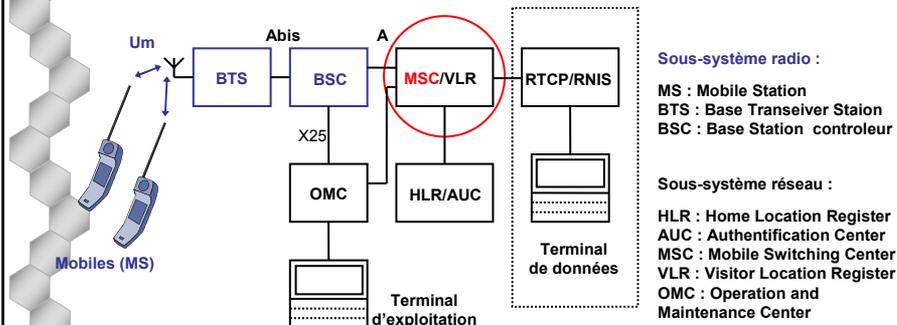
- De la gestion des **alarmes** et **supervision**  
des différents équipements

- De la gestion des **ressources radio**  
( canaux de trafic, canaux de signalisation )

Tous les organes « sensibles » sont **dupliqués**,  
afin d'offrir un maximum de **fiabilité** au système .

Le contrôleur de station de base s'organise autour d'une matrice de  
**commutation** ( 64 accès, entre BTS, l'OMC et le(s) MSC(s) ) .

## • Le commutateur de réseau GSM ( MSC )



## • Le commutateur de réseau GSM ( MSC ) - suite -

C'est un **système majeur** dans un réseau GSM . Il fait la liaison entre les utilisateurs de mobiles entre eux ou avec d'autres réseaux ( réseau public .... ).

Il est constitué sur la base des réseaux " **RNIS** ", avec des **fonctionnalités particulières** à un réseau radio .

Il donne accès aux **différentes bases de données** concernant chaque utilisateur du réseau :

- Les données de **l'enregistreur de localisation nominale** ( HLR ) .
- Les données de **localisation des visiteurs** ( VLR ) .
- Les données du **centre d'authentification** ( AUC ) .

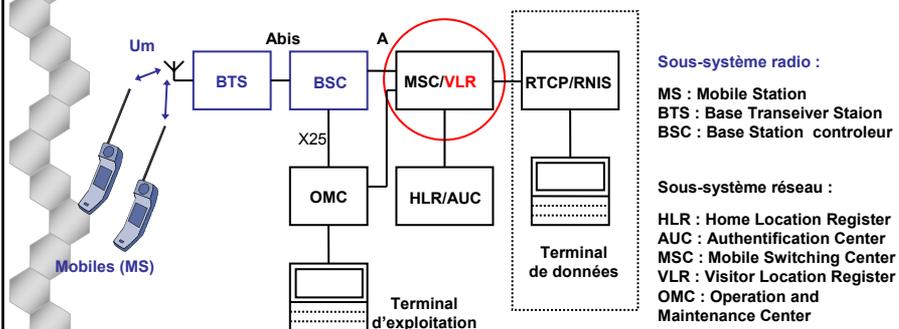
## • Le commutateur de réseau GSM ( suite )

Il communique avec ces autres unités par les canaux de " signalisation " .

Il fournit les différents **services** aux usager :

- **Services support** : bande audio de 3,1 KHz, transmission des données synchrones, assemblage et désassemblage des paquets de données (PAD) .
- **Téléservices** : Téléphonie, télécopie, appels d'urgence, SMS
- **Services supplémentaires** : renvoi d'appel, restriction d'appel, information de taxation ...

## • L'enregistreur de localisation des visiteurs (VLR)



## • L'enregistreur de localisation des visiteurs (VLR) - suite -

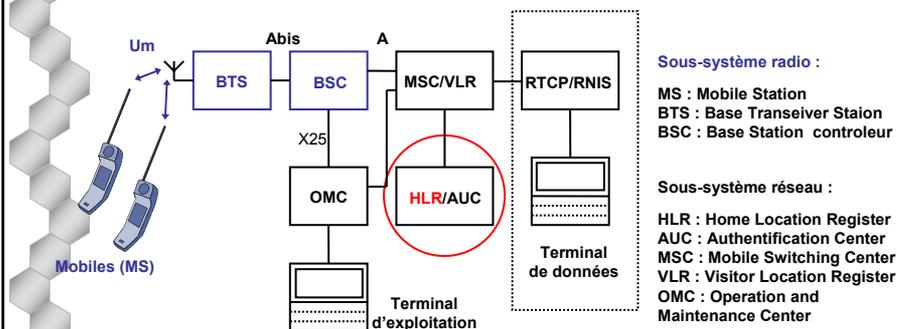
C'est une base de données " **dynamique** ", associée à un MSC.  
Elle contient principalement un **identifiant**  
et une **localisation** pour un abonné .

Ces informations sont primordiales pour le réseau qui doit connaître à **chaque instant** la position d'un abonné, afin de lui acheminer un appel .  
A chaque **changement de cellule**, le VLR est remis à jour  
pour la couverture d'un MSC .

Les informations sont transmises à un autre VLR, si l'abonné change de motif .

Toutes ces informations concernent aussi le **HLR**,  
qui dialogue avec tous les VLR du réseau .

## • L'enregistreur de localisation nominale ( HLR )





## • L 'enregistreur de localisation nominale ( HLR ) - suite -

C'est une base de donnée " **générale** " qui centralise les données des VLR .

Cette base de donnée est **protégée** ( par un cryptage ), et manipulée par un **seul opérateur habilité** .

Elle contient principalement, pour chaque abonné :

- Le type d'abonnement
- Les services souscrits
- La dernière zone de localisation connue
- L'état du terminal ( occupé, en veille, éteint ... )



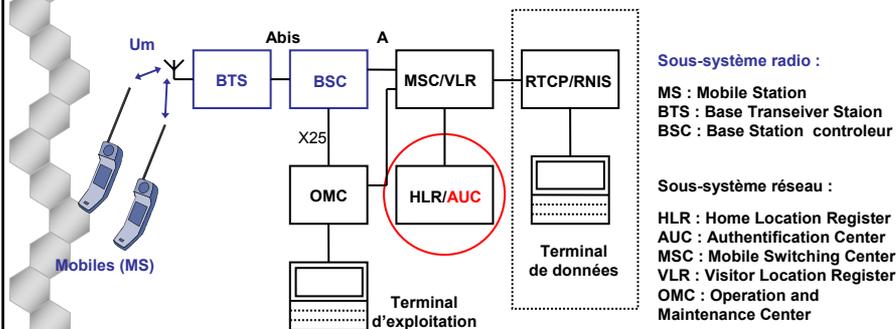
## • L 'enregistreur de localisation nominale ( suite )

Le HLR ( comme l'AUC ) est situé dans un local dont l'**accès est filtré** .

Pour un appel " **descendant** ", on interroge d'abord le HLR, afin de connaître la possibilité de liaison avec l'abonné concerné .

Pour un appel " **montant** ", le HLR autorise ou interdit l'utilisation d'un service suivant l'abonnement souscrit .

## • Le centre d'authentification ( AUC )



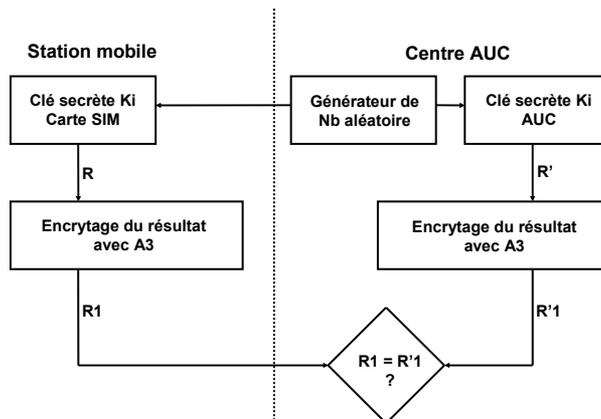
## • Le centre d'authentification ( AUC ) - suite -

Sa principale fonction est de contrôler l'**identité** des utilisateurs d'un réseau GSM et de protéger celui-ci contre des éventuels fraudeurs .  
 Il est situé dans un **local à accès protégé** .

Le centre d'authentification contient toutes les informations nécessaires à la **protection** des communications GSM .  
 Elles ne circulent pas sur le réseau .

- Les modules d'identité d'abonné ( **carte SIM** ) que l'on place dans un terminal mobile contiennent les données qui sont contrôlées par l'AUC.
- Les communications sont **cryptées** dans la partie radio, afin de prévenir toute écoute " indiscrete " .
- L'identité de l'abonné est **protégée** : N° d'abonné ( 06 ... ) N° personnel ( International Mobile Subscriber Identity : IMSI ), Identité temporaire ( Temporary Mobile Subscriber Identity : TMSI ) .

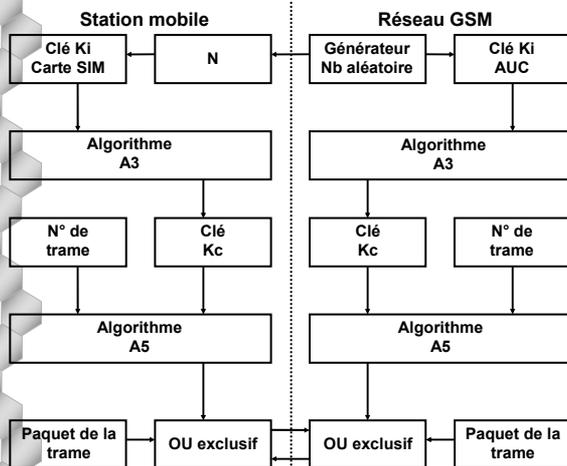
## MECANISME D'AUTENTIFICATION ( pin dévalidé )



Le réseau génère un **nombre aléatoire** qu'il transmet au mobile .

Si  $R1 = R'1$ , la communication est **validée** .

## MECANISME DE CHIFFREMENT DES TRAMES

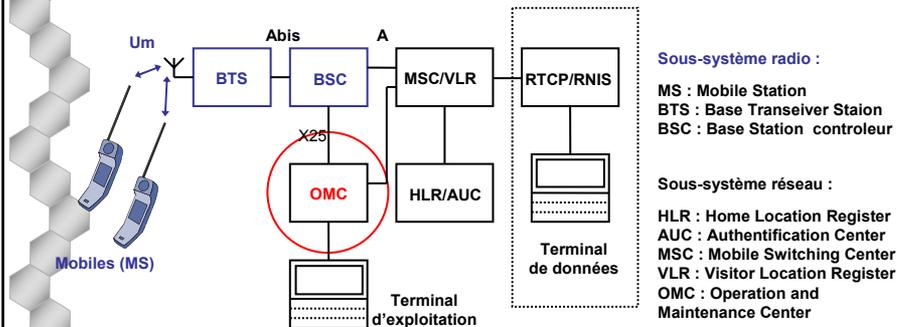


Si les résultats comparés sont égaux, le réseau demande au terminal de **crypter** ses trames à l'aide d'une clé **Kc**, choisie pour la session (  $Ki + \text{algorithme A8}$  ) .

La clé **Kc** et le **N° de trame** sont transmis à algorithme **A5** pour crypter le paquet de la trame ( **OU exclusif** ) .

Les trames sont ainsi **très protégés** et les différentes clés et algorithmes **ne circulent jamais** sur le réseau .

## • Le centre d 'exploitation et de maintenance ( OMC )



## • Le centre d 'exploitation et de maintenance ( OMC ) - suite -

Il est chargée de la **gestion administrative** des abonnés et de la **gestion technique** des équipements du réseau .

### GESTION ADMINISTRATIVE ( en liaison avec le HLR / AUC )

- Création d 'abonnements
- Modification d 'abonnements
- Facturation
- Statistiques ( ajustement des tarifs, développement des services )

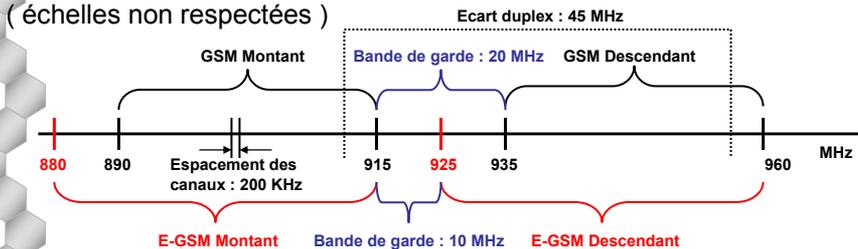
## GESTION TECHNIQUE

- Supervision des alarmes des équipements du réseau
- Suppression des mauvais fonctionnements
- Gestion des versions de logiciels
- Gestion des performances
- Gestion de la sécurité

## IX ) LA TRANSMISSION RADIO

### • Les bandes de fréquences

Bandes de fréquences attribuées au GSM :  
( échelles non respectées )



**GSM** : 2 bandes de 25 MHz et 124 canaux fréquentiels

**E-GSM** : 2 bandes de 35 MHz et 174 canaux fréquentiels

## • Partage en fréquence

Chaque BTS se voit allouée des fréquences de façon " fixe " .

Les canaux, en général au nombre de 8, sont de préférence

« **éloignés** » pour une même BTS .

Il faut veiller à ce que que les **mêmes fréquences** ( ou 2 fréquences proches ) **ne soient pas allouées à des BTS trop proches** ( règle de réutilisation des fréquences ) .

## • Partage en temps

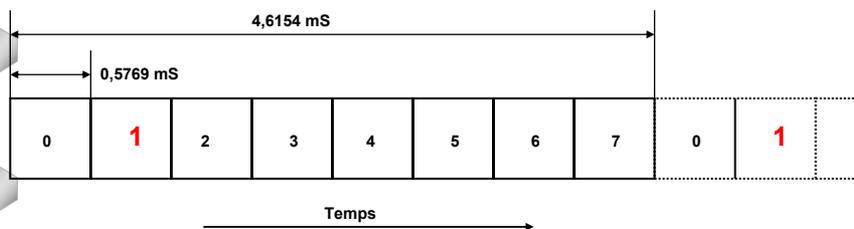
Chaque " porteuse " est divisée en intervalles de temps appelés **slots**, fixés à 75/130 ms ( = 0,5769 ms ) .

Les slots sont organisés en **trames** ; 8 slots = 1 trame GSM = 4,6154 ms .

Chaque usager utilise ( au plus ) **un slot** dans la trame de **façon récurrente**, ce qui permet sur une même porteuse 8 communications simultanées .

## • Partage en temps ( suite )

Un **canal physique** est constitué par la répétition périodique d'un slot dans la trame .



Une telle technique se nomme **multiplexage temporel** ( Time Division Multiple Acces : **TDMA** ) ;



## • Ecart duplex

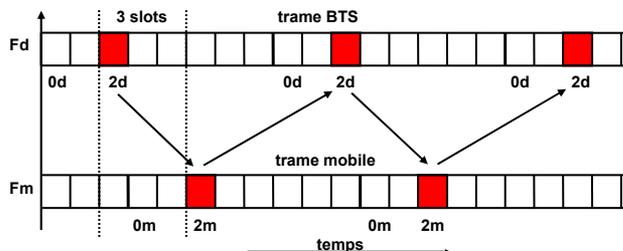
Les fréquences montantes et descendantes utilisées dans le GSM sont liées par la relation :

**Fréq Montante = Fréq Descendante - Écart duplex**  
( Écart duplex = 45 Mhz pour le GSM ) .

Cette règle est respectée en **terme de saut de fréquence** .

## • Relation temporelle trames mobile / BTS

Au niveau du terminal mobile, les trames sont décalées de **3 slots** sur la voie montante .



Un mobile n'émet et ne reçoit pas au « **même instant** » .

Ce " retard " va lui permettre de se **synchroniser** avec la BTS, et d'optimiser le filtrage duplex .

## • Synchronisation

Dans une cellule donnée, les différents utilisateurs sont à **des distances différentes** de la BTS .

Il existe un **temps de propagation** pour les ondes radio dont la valeur **ne peut** être négligée .

Une cellule peut atteindre **30 Km**, et l'onde met **100  $\mu$ s** la parcourir .

Ce temps de décalage peut représenter **plus d'un tiers** de la durée d'un slot ( 577  $\mu$ s ) .

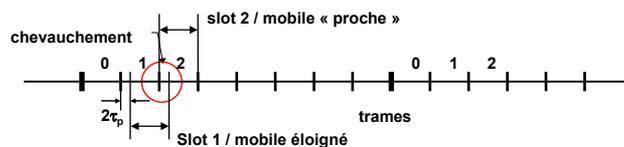
Un mobile doit avancer ses slots de **2 fois ce délai (  $\tau_p$  )** pour être synchrone avec l'horloge de la BTS, et réduire l'intervalle de **garde au minimum**, fixé à **30  $\mu$ s** ( montée des signaux ) .

Le système GSM prévoit le traitement **d'informations spécifiques dans les slots**, afin d'optimiser " finement " l'avance nécessaire à une **parfaite synchronisation** .

## • Synchronisation (suite)

### DECALAGE TEMPOREL VOIE MONTANTE

En l'absence de ce mécanisme, **deux slots consécutifs** sur une même porteuse ( en provenance de deux mobiles situés à des distances extrêmes de la BTS ) **risquent de se chevaucher** .

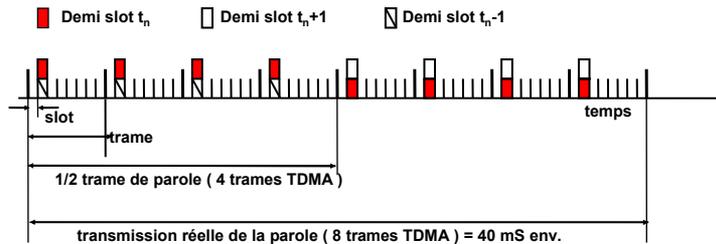


**Ici** : le slot 1 du mobile « éloigné » chevauche le slot 2 du mobile « proche » .

## • Transmission de la parole par blocs

Dans le GSM, la parole ( bande passante : 300 Hz à 3400 Hz ) est découpée en **intervalles conjoints de 20 ms** .

Chaque intervalle est numérisé, comprimé, codé et crypté pour aboutir à un bloc de **456 bits**, transmis à **22,8 Kbits/s** .



La transmission d'un bloc s'effectue sur **8 slots** dans 8 trames consécutives : 8 fois 57 bits ( 8 trames = 8 x 4,6154 ms = 36,923 mS ) .

## • L'encodage de la parole

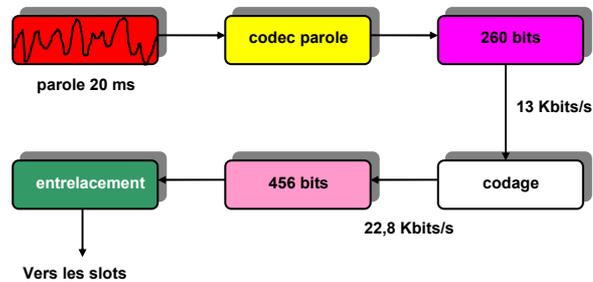
La parole, dans un réseau RNIS, est échantillonnée à **8 KHz** et quantifiée par une **loi logarithmique** sur **8 bits** ( méthode MIC : Modulation par Impulsion et codage ) .

Le débit est donc **64 Kbits/s** ( Shannon ) .

Des techniques d'adaptation permettent de réduire ce débit à **13 Kbits/s** dans le GSM ( avant le codage, qui donnera les **22,8 Kbits/s** ) .

Elles sont basées sur le filtrage numérique linéaire à paramètres variables dans le temps, capable "**d'anticiper**" le signal vocal ( algorithmes de prédiction ) .

## • L'encodage de la parole ( suite )



**Parole non protégée** : 13 Kb/s, soit 260 bits pour 20 mS

**Parole protégée** : 22,8 Kb/s, soit 456 bits pour 20 mS

## • Transmission des données

Le GSM a défini des **fonctions d'adaptation** pour les débits de donnée classiques .

Pour une transmission à **9600 bits/s** , on ajoute **12 bits de contrôle** à **48 bits de l'information**, pour faire un sous-bloc de **60 bits** .

**4 sous blocs de 60 bits** sont transmis sur **4 trames TDMA**, pour former un **bloc 240 bits** .

Les **fonctions d'adaptation** traitent donc ce bloc de 240 bits **toutes les 20 ms**, soit un flux global de **12 Kbits/s** .

## • De la trame à l'hypertrame

Une communication GSM doit effectuer un **certain nombre de tâches** ( Synchronisation, signalisation, information système ... ) .

Seule la **phonie plein débit** nécessite **un slot par trame** .

Les autres informations peuvent être **espacées** sur plusieurs trames .

La norme GSM a défini deux types de **multitrame** :

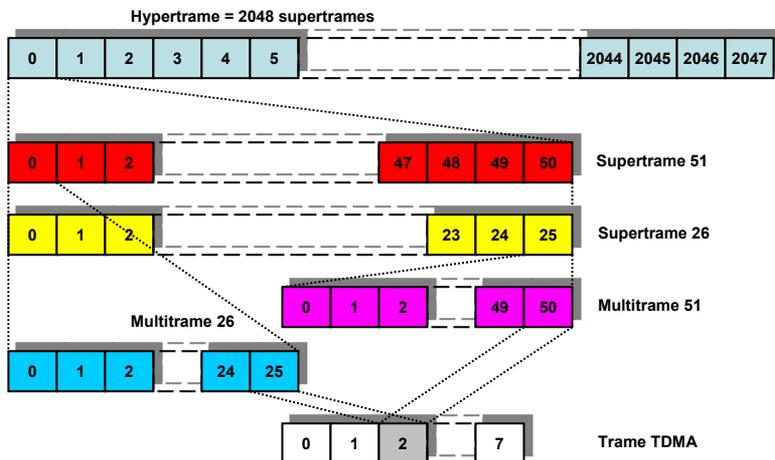
- **Multitrame à 26 trames TDMA : 120 ms**

- **Multitrame à 51 trames TDMA : 235,4 ms**

On définit alors la **supertrame** composée de 51 multitrame " 26 " ou 26 multitrame " 51 " : **6,120 s** .

L'**hypertrame** est composé de 2048 supertrames soit : **3 h 28 mn 53,760 s** .

## • Hiérarchie des trames TDMA



Chaque trame **TDMA** est repérée dans l'hypertrame par un **compteur : le Frame Number ( FN )**, repère temporel de chaque BTS .



## • Les canaux logiques

Le concept précédent permet de répartir les **canaux logiques** sur les slots d'une multitrame ( 26 ou 51 ) .

Les informations " utiles " d'une multitrame sont **juxtaposées et structurées** .

Les canaux logiques sont de 2 types :

- Les **canaux dédiés** ( une paire de slots duplex ) :  
un seul mobile peut en bénéficier .

**SDCCH** : Signalisation

**FACCH** : Hand Over

**SACCH** : Supervision de la communication ( paramètres physiques )

**TCH/FS, TCH/HS** : Parole plein débit, demi-débit

**TCH/F 9,6**: Données à 9600 bps

...



## • Les canaux logiques ( suite )

- Les **canaux non dédiés** ( un slot simplex )

**Voie descendante :**

**BCCH** : Information locales système

**FCCH** : Calage sur porteuse ( environ 20 fois / s sur la balise )

**SCH** : Synchronisation + identification

**PCH** : Appel du mobile ( paging)

**AGCH** : Allocation de ressource ( n° porteuse et de slot, table saut en fréquence ... )

**CBCH** : Messages courts diffusés ( météo, état des routes ... )

**Voie montante :**

**RACH** : Accès aléatoire au réseau

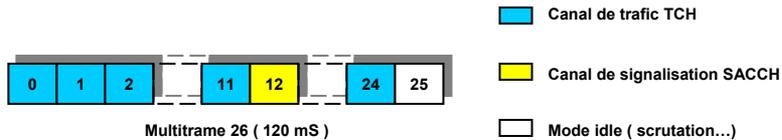
## • Les canaux logiques - canaux associés -

Les canaux **physiques** sont organisés dans les multitrames .

### CAS DE LA PAROLE PLEIN DÉBIT

En simplifiant, il faut transmettre un **slot** de parole toutes les **5 mS** ( découpage de la parole en intervalles de 20 mS ) .

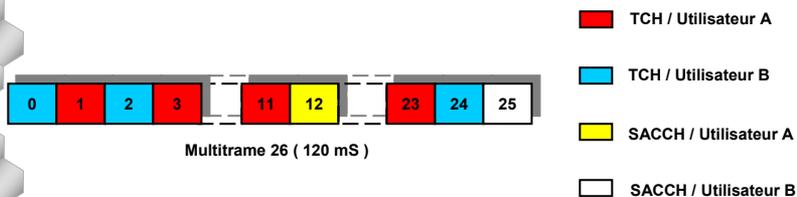
La trame TDMA est **légèrement plus courte** :  $5 \text{ mS} \times (24/26) = 4,6154 \text{ mS}$  .



On peut donc associer par multiplexage, un **canal de trafic** avec un **canal de signalisation** .

## • Les canaux logiques - canaux associés - (suite )

### CAS DE LA PAROLE DEMI DÉBIT ( 1 slot sur 2 pour chaque MS )



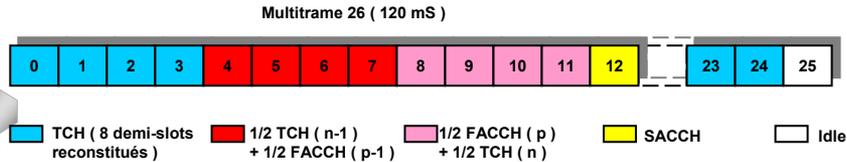
Il n 'y a **apparemment** plus de slot idle ( scrutation des balises voisines ) .

Ce n 'est nullement gênant car dans le cas du demi-débit, chaque mobile peut « scruter » 1 trame sur 2 .

## • Les canaux logiques - Hand Over FACCH -

Le **Hand Over** demande une réaction « rapide » du système .

On remplace 8 demi-slots de trafic par 8 demi-slots FACCH



**Cas de la parole plein débit :**

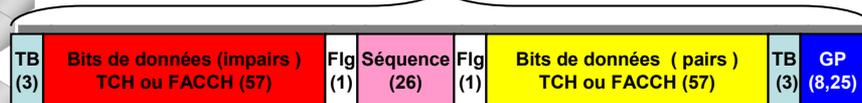
On substitue **2x10 mS** de parole ( redondance sur les bits de trafic substitués ) .

## • Les types de slots

Le GSM définit 4 types de slots :

**LE SLOT NORMAL ( canal TCH ou FACCH )**

**Slot = 156,25 bits ( 576,92  $\mu$ S )**



**Burst = 148 bits ( 546,46  $\mu$ S )**

Les **Tail Bits** valent ici 3 bits (  $3 \times 3,692 \mu\text{S} = 11,076 \mu\text{S}$  ) .

Les drapeaux ( **Flg** ) contrôlent le canal TCH ( trafic ) ou FACCH ( And Over ) .

La période de garde **GP** : 8,25 bits ( soit  $30,46 \mu\text{S}$  : montée de signaux ) .

## • Les types de slots ( suite )

Tous les slots bien qu'organisés différemment valent le même temps :  
**576,92  $\mu$ S** ( ou 156,25 bits ) .

### LE SLOT DE CORRECTION DE FREQUENCE ( canal FCCH )



Il est émis sur la **voie balise** toutes les 50 mS env. et génère une porteuse pure légèrement décalée, ce qui permet un ajustage parfait de l'oscillateur local du mobile ( dérive avec la température ... )

## • Les types de slots ( suite )

### LE SLOT DE SYNCHRONISATION ( canal SCH )

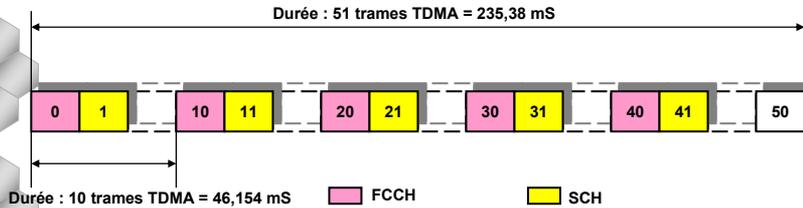


Il est émis juste après le slot de correction de fréquence ( sur la balise ) .

La séquence d'apprentissage, plus longue que celle du slot normal, permet une **synchronisation complète** de la station mobile avec la BTS qui lui est associée .

## • Les types de slots ( suite )

### ORGANISATION DES CANAUX SCH ET FCCH DANS LA MULTITRAME 51 ( voie balise / descendante )



A chaque **idle** ( 25ème bloc de la multitrame 26 pour une transmission plein débit ) et compte tenu du décalage de 3 slots le mobile peut « scruter » la balise de sa BTS **et** des BTS voisines, pendant 6 mS env. ( **glissement** de la multitrame 26 par rapport à la multitrame 51 ) .

Il peut ainsi récupérer les informations pour un Hand Over .

## • Les types de slots ( suite )

### LE SLOT D 'ACCES ( canal RACH )



Le délais de propagation n'étant pas connu, on applique à ce slot un temps de garde suffisamment long pour éviter les **chevauchements** ( pour une cellule de 30 Kms ) .

Les bits de données ( chiffrés ) contiennent la catégorie du service demandé ( appel classique, d'urgence, localisation, SMS ...)



## • L 'équipement mobile

Il existe **3** types de terminaux, définis dans la norme :

### LE TERMINAL FIXE

Il est **fixé dans le véhicule** ( automobile, camion ...) et doit être équipé d 'un « mains libres » pour le conducteur .

Il utilise les ressources d 'énergie du véhicule ( batteries ... ) .

Grâce à sa **puissance ( 20 W )**, il est adapté aux macro-cellules des zones rurales .



## • L 'équipement mobile ( suite )

### LE TERMINAL PORTABLE

( d 'où le terme inapproprié de « portable » pour un **terminal mobile** )

C 'est un intermédiaire entre le fixe et le portatif, utilisé par les **professionnels** ( chantiers ... ) .

Le poids est inférieur à 3 Kg, et la puissance est de 8 W .

## • L'équipement mobile ( suite )

### LE TERMINAL PORTATIF

Le plus courant ...

Il est **complètement autonome**, très maniable et très léger .  
( la norme précise 900 cm3 et 800 g maxi )

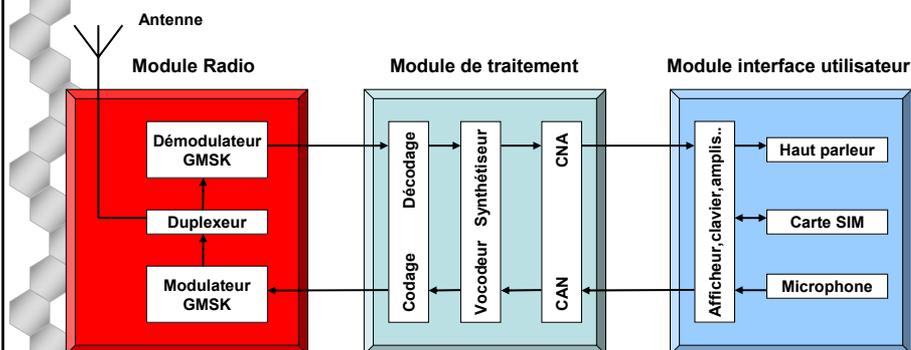
Il possède un affichage alphanumérique ( graphique ) de 2 lignes de 16 caractères .

La puissance crête ( maxi ) est de **2 W** .

On peut y adapter des options « mains libres » et « kit piéton » .



## • Architecture fonctionnelle d'un terminal mobile

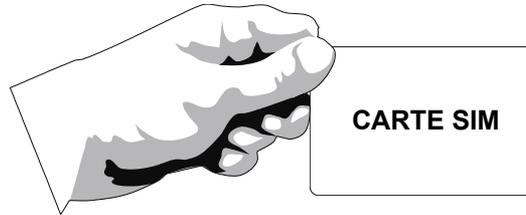


## • La carte SIM

Il s'agit d'une carte à **micro-processeur** assignée à un abonné, conforme aux standards ISO 7816 ( cartes à puce ).

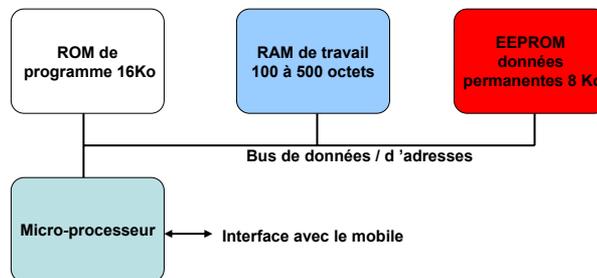
Il en existe 2 formats :

- La taille de crédit
- La micro SIM **Plug-in**



Il s'agit d'un micro système à haut niveau de sécurité .

## • Architecture interne



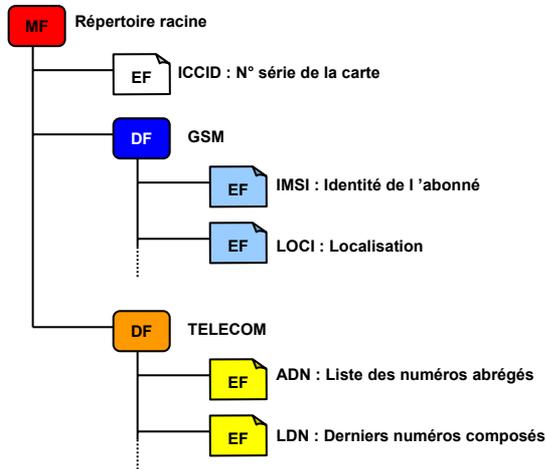
**ROM** : 16 Ko, contient le **système d'exploitation**, les applications spécifiques, les algorithmes A3 et A8 .

**RAM** : quelques centaines d'octets, contient les **données dynamiques** des applications spécifiques .

**EEPROM** : 8 Ko ( typiquement ), contient les champs de données définis par le GSM et des applications spécifiques ( **mémoire hors tension** ).

## • Organisation des données

On reprend l'arborescence d'un système d'exploitation classique :



**MF** : Master file

**DF** : Dedicated file

**EF** : Elementary file

**Il y a 2 répertoires principaux :**

- GSM
- Télécom

## • Accès des données

Il existe **5 niveaux** d'accès :

- **ALW** ( always ) accessible sans mot de passe .
- **CHV1** ( mot de passe 1 : PIN ) accessible avec mot de passe si celui-ci a été activé .
- **CHV2** ( mot de passe 2 ) accessible avec le mot de passe 2 .
- **ADM** ( administrateur ) accessible avec le mot de passe administrateur .
- **NEV** ( never ) jamais accessible .

Il existe aussi **4 types** d'accès :

- **LECTURE**
- **ECRITURE ( modification )**
- **INVALIDATION**
- **REABILITATION**



## • Répartition des données

### **DONNEES DE SECURITE**

Elle ne sont pas dans les répertoires « telecom » ni « GSM », mais accessibles par des commandes « entrée / sortie » ( lecture / écriture ) .

- **CHV1** (PIN) , Indicateur d 'activation et compteur d 'erreurs .
- **CLEF DE DEBLOCAGE** ( PUK ) de CHV1 et compteur d 'erreurs .
- **CLEF D 'AUTHENTIFICATION Ki**



## • Répartition des données ( suite )

### **REPertoire GSM**

#### **Données obligatoires :**

- Information administrative ( abonné « normal » ou mobile de trace )
- Identification de la phase GSM ( 1, 2, 2+ )
- **IMSI** ( identité internationale )
- Table des services souscrits
- Données de **localisation** et le **TMSI**
- Liste des fréquences préférentielles des voies balises
- Clef de chiffrement **Kc** ( calculée à partir de la clef **Ki** )



## • Répartition des données ( suite )

### REPertoire GSM

#### Données optionnelles :

- Sélecteur de réseau ( avec préférences )
- Type de messages courts acceptés
- Identité du fournisseur de service
- Fichiers définissant les groupes d 'utilisateurs ( entreprises )



## • Répartition des données ( suite )

### REPertoire TELECOM

Il est dédié « configuration » et « historique »

Il contient :

- La liste des derniers numéros appelés
- La liste des numéros abrégés et contrôle des services
- Les paramètres de configuration
- Les fichiers **SMS** ( reçus ou à émettre )



## • Vie d'une carte SIM

### Production / distribution

La carte ne contient ni **clef** d'authentification ( Ki ), ni n° **ISMI** .

Elle contient cependant l'**algorithme d'authentification** et quelques **Clefs** de protection .

### Pré-personnalisation

On crée le **répertoire racine** ( MF ) et on charge le n° de série de la carte .

La carte peut être **multiservice** ( carte téléphone de cabines ) .



## • Vie d'une carte SIM (suite)

### Personnalisation

L'opérateur attribue la clef **Ki** et l'**IMSI** et crée les répertoires **GSM** et **TELECOM** ainsi que la clef de déblocage ( PUK ) .

La personnalisation a lieu dans le même environnement de **sécurité** que la manipulation des fichiers d'authentification, par ex .

### Post-personnalisation

On charge ici les paramètres des services autorisés et les réseaux préférentiels ....

## • Protocole d'échange

Il est orienté caractère asynchrone en alternat ( simplex )

( semblable RS 232 en niveaux TTL

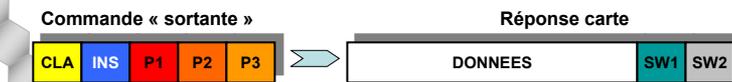
=> protocole T = 0 avec contrôle de parité sur un octet ) .

Le dialogue avec la carte se fait par l'intermédiaire de **commandes** envoyées sur la broche « entrée / sortie » de la carte par le terminal .

A chaque **commande**, la carte retourne une « **réponse** » .

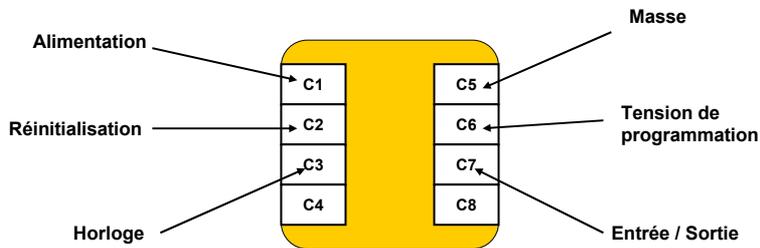
Les commandes et les réponses comprennent plusieurs champs spécifiques .

## • Protocole d'échange ( suite )



CLA, INS, P1, P2, P3, SW1, SW2 sont des **octets** .

## • Interface électrique



Les broches C4 et C8 ne sont pas utilisées .  
La tension d'alimentation est de 5 V ( typique ) .

## X) GPRS & UMTS

### • Le GPRS

#### General Packet Radio Service

Statistiquement, il est possible pour un terminal mobile d'utiliser **plus d'un slot** par trame TDMA .

Le débit ( instantané ) peut alors atteindre **170 Kbps** .

Il est alors possible d'effectuer des communications « multimédia » .

Il faut pour cela disposer d'un terminal mobile **compatible** GPRS .

GPRS peut être relié à différents réseaux de données :

- Autre GPRS
- IP
- X25 ( Orienté connexion )
- CNLP ( Connectionless Network Protocole ), défini par l'ISO

## • Le GPRS (suite )

### Services proposés :

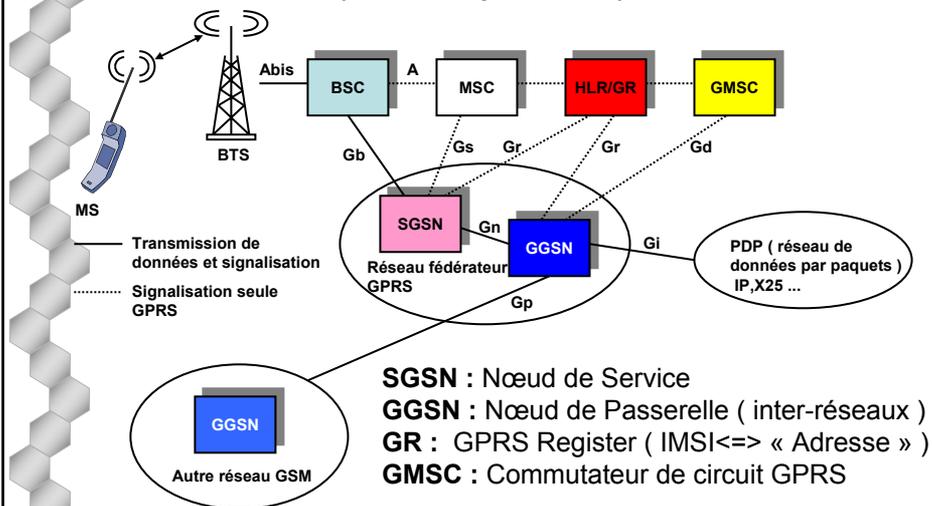
- Consultation Web
- Vidéo compressée
- Transfert de fichier ( par FTP )

### La transmission peut se faire :

- Point à point ( Point-To-Point )
- Point à multipoint ( Point-To-Multipoint )
  - \* Sur une zone géographique ( Point-To-Multipoint Multicast )
  - \* Pour un groupe d 'abonnés ( Point-To-Multipoint Group )

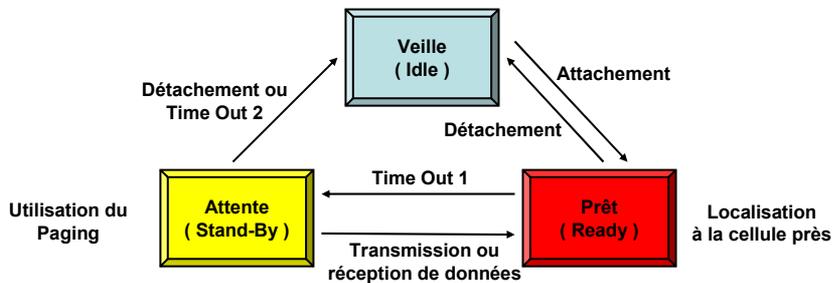
## • Le GPRS (suite )

### Architecture Générale ( réseau IP particulier ) :



## • Le GPRS (suite)

Etats d'une station mobile en GPRS :



Le terminal doit d'abord s'attacher au réseau et passe à l'état « prêt » .

Au bout d'une temporisation ( Time Out 1 ), il passe à l'état « Attente », ce qui permet d'optimiser le trafic de **signalisation** .

## • Le GPRS (suite)

Interface Radio :

Les canaux logiques utilisés sont spécifiques .

- Les **PDCH** ( Packet Data Channel ) :

**PDCH Maître** : Initialisation d'un transfert de données et transmission

- **PRACH** : ( Packet Random Access Channel ) Initialisation
- **PPCH** : ( Packet Paging Access Channel ) Appel du mobile
- **PAGCH** : ( Packet Access Grant Channel ) Infos canaux alloués
- **PBCCH** : ( Packet Broadcast control Channel ) Infos GPRS

**PDCH Esclave(s)** : Transmission des données et signalisation

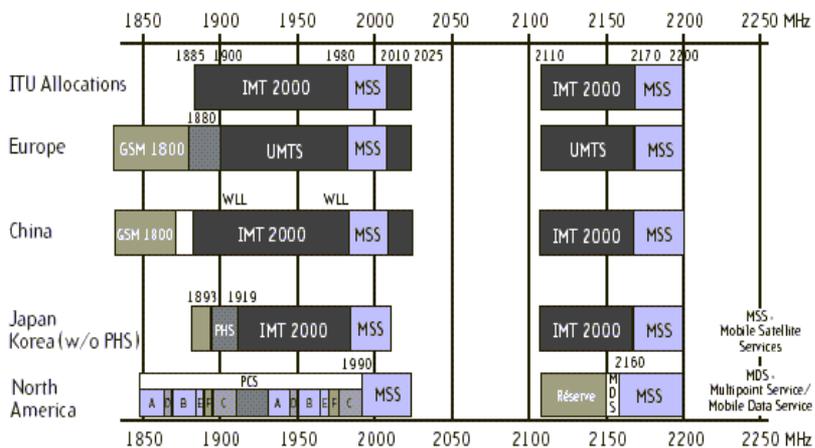
- **PDTCH** : ( Packet Data Transfert Channel ) données utilisateur
- **PACCH** : ( Packet Associated Control Channel ) Acquittements, Contrôle puissance, Time advance et futurs PDTCH

## • L'UMTS

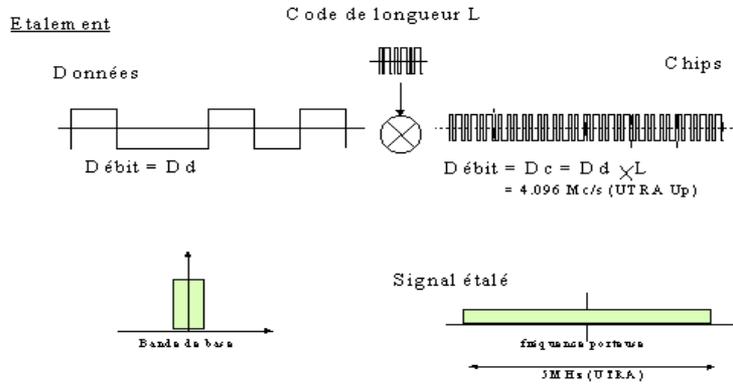
- Apparu en 1992
- Norme **Mondiale**
- Fréquence de travail autour de 2 GHz
- **Interfaces** : TDMA & CDMA
- Mobiles 3G



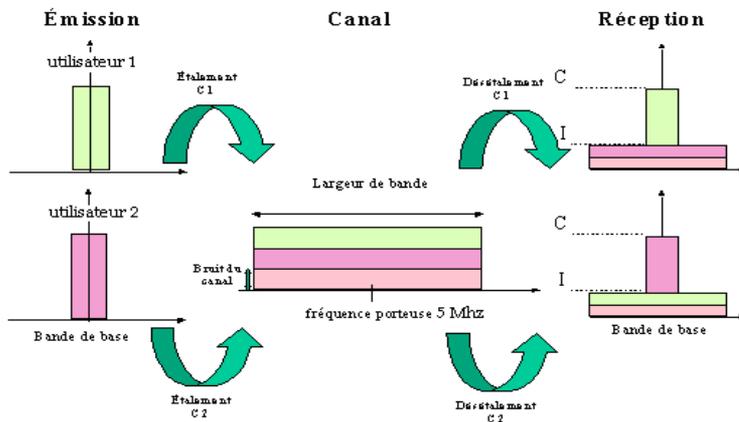
## • L'UMTS – Bandes de fréquences



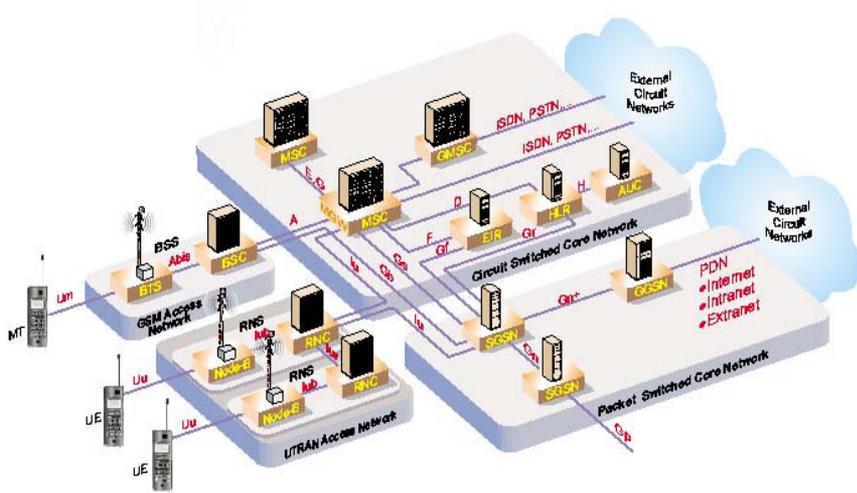
## • L'UMTS – CDMA ( Interface radio : Emission )



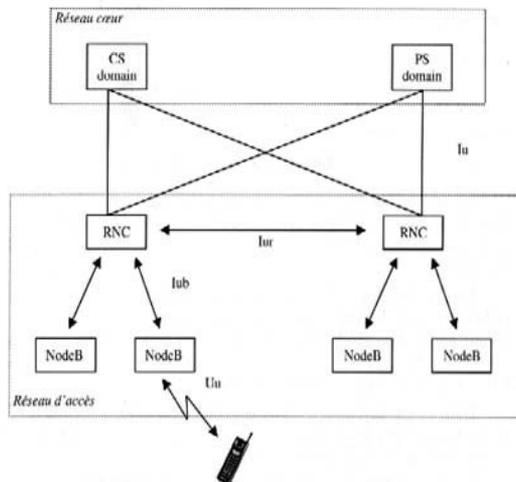
## • L'UMTS – CDMA ( Interface radio : Réception )



## • L'UMTS - Réseau



## • L'UMTS – Réseau ( suite )



# XI ) LES EFFETS BIOLOGIQUES DES RADIOFREQUENCES

- Définitions

Il s'agit d'une recherche pluridisciplinaire qui cherche à établir les **interactions** entre les **rayonnements électromagnétique** et la **matière vivante** .



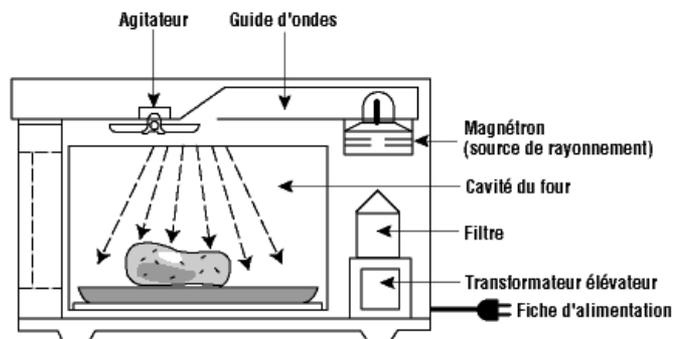
Les effets ( et dangers ) en sont connus depuis l'utilisation des radars .

## • Définitions ( suite )

La **matière vivante** se comporte comme un **diélectrique inhomogène, faiblement conducteur** .

Elle **absorbe**, réfracte et diffracte les ondes électromagnétiques .

## • Le four micro-ondes



On utilise le principe des micro-ondes pour « cuire » nos aliments .

On **agite** les molécules d'eau, principalement en **surface** .

Fréquence utilisée : quelques GHz / Puissance : de l'ordre du KW .

## • Définitions du SAR

On définit le **SAR** ( Specific Absorption Rate - DAS en français - ) .

Il n'est pas **linéaire** et dépend entre autre de la fréquence ( absorption maximum vers 70 MHz chez l'homme ) .

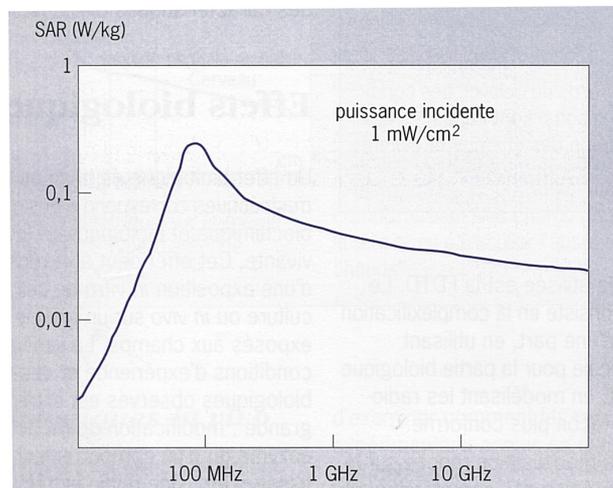
Le **Seuil thermique** est déterminé par une augmentation de la température corporelle de **1°C** chez l'homme .

Le SAR vaut alors **4W/Kg** .

Différentes **normes** et **recommandations** donnent les limites d'exposition aux ondes électromagnétiques .

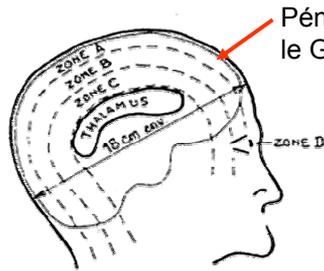
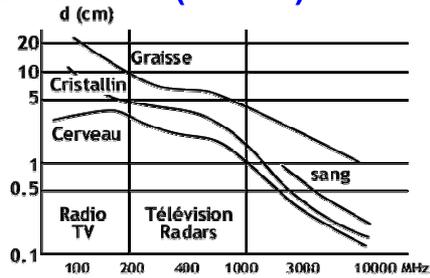
- 0,4 W/Kg pour les professionnels ( informés et suivis )
- 0,08 W/Kg pour le grand public

## • Définitions du SAR ( suite )



Source :  
France  
Telecom  
MT N°6

## • Définitions du SAR ( suite )



Pénétration : 1,5 cm pour le GSM 900 MHz

ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

223

## • Normes et recommandations ( suite )

Tableau 2  
Limites de DAS pour les travailleurs exposés  
aux RF et aux micro-ondes

condition	limites de DAS (W/kg)
Le DAS moyen pour tout le corps.	0,4
Le DAS localisé pour la tête, le cou et le tronc – moyenne d'un gram (g) de n'importe quel tissu.*	8
Le DAS dans les membres – moyenne de 10 g de tissu.*	20

\* Définis comme un volume de tissus sous forme d'un cube.

ESIEA Cours Radiocom Mobiles  
5152 / 2005-2006

224

## • Normes et recommandations ( suite )

**Tableau 1**  
**Limites d'exposition de travailleurs exposés**  
**aux RF et aux micro-ondes**

1	2	3	4	5
fréquence (MHz)	intensité du champ électrique; valeur efficace (V/m)	intensité du champ magnétique; valeur efficace (A/m)	densité de puissance ( $W/m^2$ )	durée (temps pendant lequel la moyenne est calculée) (min)
0,003–1	600	4,9		6
1–10	$600/f$	$4,9/f$		6
10 - 30	60	$4,9/f$		6
30–300	60	0,163	$10^*$	6
300–1 500	$3,54f^{0,5}$	$0,0094f^{0,5}$	$f/30$	6
1 500–15 000	137	0,364	50	6
15 000–150 000	137	0,364	50	$616\ 000 / f^{1,2}$
150 000–300 000	$0,354f^{0,5}$	$9,4 \times 10^{-4} f^{0,5}$	$3,33 \times 10^{-4} f$	$616\ 000 / f^{1,2}$

\* Limite de densité de puissance applicable à des fréquences plus grandes que 100 MHz.

**Remarques :**

1. Fréquence,  $f$ , est en MHz.
2. Une densité de puissance de  $10\ W/m^2$  est équivalente à  $1\ mW/cm^2$ .
3. Une intensité de champ magnétique de  $1\ A/m$  correspond à  $1,257\ \mu T$  ou  $12,57\ mG$ .

ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
 5152 / 2005-2006

225

## • La signalisation



**ATTENTION**  
**RAYONNEMENT RADIOFRÉQUENCE**

- zone de séjour sans restrictions  
 - lésions mineures possibles suite d'usage abusif



**PRUDENCE**  
**RAYONNEMENT RADIOFRÉQUENCE**

- zone de séjour limité (travailleurs sous RF seulement)  
 - lésions graves possibles suite d'usage abusif



**DANGER**  
**RAYONNEMENT RADIOFRÉQUENCE**

- zone de séjour interdit  
 - lésions critiques ou possibilité de mort

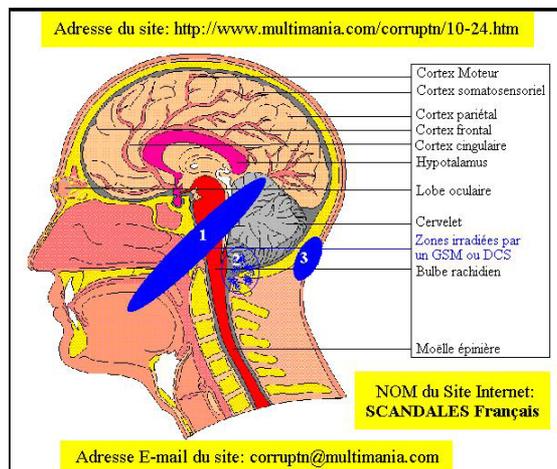
ESIEA Cours Radiocomms Mobiles  
 5152 / 2005-2006

226

## • Les paramètres en jeu

- La **Permittivité / conductivité** de la matière vivante
- Son **homogénéité** quant à ces paramètres
- Sa **géométrie**

## • Les paramètres en jeu ( suite )



- Les **caractéristiques technique** du champ ( puissance, fréquence, polarisation, champ proche ou lointain ...)

## • Les méthodes de recherche

### LES METHODES NUMERIQUES

Elles sont basées sur ma **modélisation**, principalement la méthode des différences finies ( FDTD ) .

Elles utilisent les équations de Maxwell, sur un **maillage** de l'espace ( arête du cube élémentaire  $< \lambda/10$  ) .

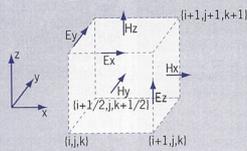
Elles utilisent l' **imagerie médicale** ( RMN... ) comme base, pour la répartition des tissus .

## • Les méthodes de recherche (suite)

### Encadré 2 - La FDTD : principe et limites

Au regard des contraintes liées aux inhomogénéités de la source et de la matière vivante, les méthodes qui semblent les plus adaptées au problème des interactions semblent être la FEM (Finite element method) et la FDTD (Finite difference in time domain). Cette dernière est la plus utilisée dans le domaine du bioélectromagnétisme. Le principe, basé sur les travaux de Yee, est relativement simple puisqu'il consiste à discrétiser l'espace et le temps et à approcher les équations de Maxwell à l'aide de différences finies. Dans un système à une dimension, cela se traduit par :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \Rightarrow \frac{E_{ix}^{n\Delta t} - E_{(i+1)\Delta x}^{n\Delta t}}{\Delta x} = \mu \frac{H_{(i-1/2)\Delta t}^{(n-1/2)\Delta t} - H_{(i+1/2)\Delta t}^{(n-1/2)\Delta t}}{\Delta t}$$



Position de E et H dans une maille élémentaire

L'espace est découpé en cubes élémentaires, les composantes des champs E et H se trouvant comme indiqué sur la figure 1. La stabilité de la méthode impose, d'une part, que les mailles des cubes élémentaires soient de dimensions inférieures à  $\lambda/10$  et, d'autre part, que l'incrément temporel soit telle que :

$$\Delta t \leq \left( \frac{1}{v_{\min}} \right) \left[ \left( \frac{1}{\Delta x} \right)^2 + \left( \frac{1}{\Delta y} \right)^2 + \left( \frac{1}{\Delta z} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

L'objet étudié est positionné dans un volume de calcul. Sur les bords de celui-ci, des conditions d'absorptions aux limites (ABC : absorbing boundary conditions) sont imposées aux champs. Ces contraintes numériques garantissent une absorption des champs et évitent ainsi les "réflexions" sur les faces du volume fini.

Source :  
France  
Telecom  
MT N°6

## • Les méthodes de recherche ( suite )

### LES METHODES EXPERIMENTALES

- Fantômes
- Observations **IN VITRO** ( cellules ...)



- Observations **IN VIVO** ( végétaux, animaux ...)

Ces méthodes sont moins avancées que la modélisation .  
Dans les deux cas, l'**extrapolation** à l 'homme est **difficile** .

## • Classement des effets des ondes électromagnétiques sur la matière vivante

- 1 ) Les effets **athermiques** généralement à faible puissance  
Ils sont dits **spécifiques**, s'ils sont sans thermorégulation .

Les mécanismes de la **thermorégulation** ( irrigation sanguine, par ex. )  
sont complexes .

Il peut se produire un **stress**, sans élévation sensible de la température .

- 2 ) Les effets **thermiques** qui vont de l 'élévation de la température,  
à la **lésion** des tissus .

## • Les effets athermiques dits « spécifiques »

- La fatigue



- Les troubles de la mémoire

## • Les effets athermiques dits « spécifiques » ( suite )

- Le stress, fonction du temps d'exposition



©Voisin/Phanie

- Troubles du sommeil

## • Les effets In Vivo et In Vitro

Différentes recherches sont effectuées dans le monde .  
Leur résultats sont difficiles à extrapoler à l'homme .

### IN VIVO

- L'œil est le plus **sensible** aux ondes électromagnétiques ( faible irrigation sanguine - connu depuis les radars - )
- On constate des effets **biochimiques** et **biologiques** sur le système nerveux des animaux exposés ( diverses puissances mises en œuvre ) .

## • Les effets In Vivo et In Vitro ( suite )



### Les dégâts des ondes

Des ondes électromagnétiques d'une puissance cent fois supérieure à celle des portables (mais de même fréquence) cassent les chromosomes de la cellule en morceaux (flèche verte) et les recombinent en chromosomes à deux (flèche rouge) ou trois (flèche bleue) constrictions : la cellule devient cancéreuse. Les ondes électromagnétiques des portables pourraient avoir, à terme, le même effet.

- On ne constate que les **effets** . On ne sait pas grand chose des **mécanismes** de ces effets .

## IN VITRO

- C'est une bonne base **statistique** ( nombre important de cellules ) .
- La **régulation thermique** doit être très sophistiquée .
- L'**extrapolation** à l'animal ( et à l'homme ) est encore **plus difficile** ( notamment à cause des systèmes de thermorégulation ) .

Les différentes études menées ont mentionné quelques effets neurologiques et des aberrations chromosomiques .

## • Cas du GSM



La **puissance moyenne** d'un terminal mobile ( 250 mW ) produit un SAR local inférieur aux recommandations cités .

Mais la **puissance crête** est de 2 Watts !...

## • Cas du GSM ( suite )

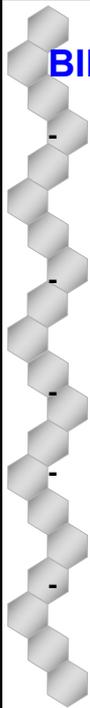


Les recommandations précisent qu'une distance de **60 m minimum** doit être respectée en ce qui concerne les antennes des BTS du GSM .

Les effets seraient à priori **athermiques**, voire **spécifiques** .

Aucune étude n'a pu, à ce jour, établir un **corrélation fiable** entre l'utilisation d'un terminal mobile et d'éventuelles **pathologies** .

Aucune étude n'a non plus **conclu** avec **certitude** sur l'**innocuité** des rayonnements des ondes électromagnétiques .



## **BIBLIOGRAPHIE**

- |  |  |               |
|--|--|---------------|
| <b>Réseaux GSM-DCS</b>   | <b>Xavier Lagrange<br/>Philippe Godlewski<br/>Sami Tabbane</b> | <b>HERMES</b> |
| <b>Pratique des réseaux d'entreprise<br/>GSM réseau et services</b>          | <b>J. Tisal</b>  | <b>MASSON</b> |
| <b>Technologie des Télécoms</b>  | <b>Pierre Lecoy</b>  | <b>HERMES</b> |
| <b>Les Antennes</b>  | <b>Raymond Brault<br/>Robert Piat</b>                          | <b>ETSF</b>   |
| <b>Les mémentos techniques du<br/>Conseil scientifique de France Telecom</b> |  | <b>CNET</b>   |