

**TÉLÉCOMMUNICATIONS AVANCÉES  
OPTION 1 DE TROISIÈME ANNÉE**

**EMMANUEL GÉRON**

*6 mars 2015*

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Les besoins et tendances actuelles</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Haut-débit et nouvelles modulations (bande étroite → large bande)</b>	<b>4</b>
2.1	Rappels sur les modulations bandes étroites . . . . .	4
2.1.1	Modulations analogiques : . . . . .	4
2.1.2	Modulations numériques multi-états . . . . .	5
2.1.3	Conclusion sur les systèmes à modulation bande-étroite . . . . .	5
2.2	Modulations larges bandes . . . . .	6
2.2.1	Introduction . . . . .	6
2.2.2	L'étalement de spectre par sauts de fréquences (frequency hopping) . . . . .	7
2.2.3	L'étalement de spectre par séquence directe . . . . .	8
2.2.4	Les modulations multi-porteuses . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Techniques de multiplexages des liaisons</b>	<b>12</b>
3.1	Frequency Division Multiple Access (FDMA) . . . . .	12
3.2	Time Division Multiple Access (TDMA) . . . . .	13
3.3	TDMA+FDMA . . . . .	14
3.4	Code Division Multiple Access (CDMA) . . . . .	14
3.5	Liaison duplexe . . . . .	16
3.6	Multiplexage spatial . . . . .	16
3.6.1	Réseaux cellulaires . . . . .	16
3.6.2	Antennes adaptatives . . . . .	17
3.7	Les système MIMO (Multiple Input Multiple Output) . . . . .	19
3.7.1	Diversité spatiale en MIMO . . . . .	19
3.7.2	Multiplexage spatial en MIMO . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Quelques notions de codage vidéo - Codage MPEG-2</b>	<b>22</b>
4.1	Le codage Intra . . . . .	22
4.2	Le codage Inter . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Télécommunications privées (DECT, ADSL + Fibre Optique maintenant)</b>	<b>24</b>
5.1	Présentation succincte de la norme DECT . . . . .	25
5.1.1	Multiplexage fréquentiel . . . . .	26
5.1.2	Multiplexage temporel . . . . .	26
<b>6</b>	<b>- Télécommunications publiques</b>	<b>26</b>
6.1	Présentation succincte de la norme GSM . . . . .	27
6.1.1	Multiplexage spatial et fréquentiel . . . . .	27
6.1.2	Multiplexage temporel . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Le "tout communicant" (Wifi et Bluetooth)</b>	<b>29</b>
7.1	Systèmes permettant la mobilité avec haut débit → WIFI . . . . .	29
7.1.1	présentation générale de WIFI . . . . .	29
7.1.2	Quelques données techniques Sur le WIFI . . . . .	29
7.2	Systèmes permettant une grande interopérabilité entre périphériques mais relativement bas-débit → Bluetooth . . . . .	31
<b>8</b>	<b>Un support alternatif : réseau de transport d'énergie (powerline)</b>	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>Processus de standardisation mondiale</b>	<b>33</b>
<b>10</b>	<b>Le futur</b>	<b>33</b>

# 1 Les besoins et tendances actuelles

## 1. Communications voix

- **Domaine privé : mobilité dans le logement et faible coût**

Le service recherché est une communication vocale au sein d'un logement (maison, appartement) ou d'un lieu de travail (agence, bureau, entrepôt) avec une mobilité de déplacement pour un piéton. Un tel système de téléphonie mobile doit remplacer les téléphones filaires actuels. La qualité de la liaison vocale est indispensable car personne n'envisage de téléphoner chez lui avec un mauvais téléphone. On recherche le même confort d'écoute mais avec une liberté de déplacement local. Ce service de mobilité ne doit pas dépendre d'un opérateur pour limiter les coûts.

Les réponses actuelles sont la norme de téléphonie de proximité DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) ou bien un mobile compatible Wifi relié à une Box et utilisant la norme VoIP (Voice over Internet Protocol).

La solution la plus simple et la plus économique actuellement est un téléphone selon la norme DECT. Le codage de la parole privilégie la qualité avec un débit relativement élevé (1152kBit/s) mais en contrepartie le système présente une portée réduite pour en limiter le coût (300m en champ libre). Avec une base simple, on peut assurer un mini standard téléphonique avec 5 mobiles. La norme contient d'autre part les fonctionnalités pour permettre l'itinérance ("roaming") lors de la communication. Le déploiement d'une telle solution n'est pas tributaire d'un opérateur. Il s'agit d'un système dit privé. Il n'y a pas de couverture donc pas de mobilité hors du domaine privé. La seule facturation possible provient des appels faits à l'extérieur du réseau de l'habitation ou de l'entreprise qui passe alors par un opérateur de télécommunication.

Les solutions avec mobiles compatibles Wifi étaient souvent des options payantes des fournisseurs d'accès internet jusqu'à récemment.

- **Domaine publique : mobilité totale, disponibilité réseau et faible coût**

On recherche avant tout une bonne disponibilité du réseau, soit une couverture en champ électromagnétique la plus étendue possible, et un dimensionnement suffisant des infrastructures du réseau pour écouler un trafic éventuellement important.

La qualité de la liaison vocale si elle ne doit pas être déplorable est moins critique que pour les téléphones d'intérieur. Pour une qualité sonore donnée (et bonne tout de même), les débits recherchés sont les plus faibles possible. L'objectif est de conserver le plus de bande passante disponible pour émettre plusieurs communications simultanément (trafic important...) et limiter le coût des systèmes d'émission/réception. Plus la bande passante est large, plus le système est coûteux en général. C'est la norme GSM (phase2) qui assure un tel service dans la majorité des pays du monde. La norme GSM est une norme 2G (2<sup>de</sup> Génération) par rapport aux premiers systèmes de radiocommunication mobile (type Radiocom 2000 ou SFR analogique) qui étaient des systèmes analogiques.

Mais la demande pour des liaisons de données avec des hauts débits (débits > 100Kbit/s) ainsi qu'une saturation progressive des réseaux dans certaines régions géographiques a rendu cette norme insuffisante et a conduit au développement soit de prolongement de la norme GSM (GPRS et EDGE (2,5G)) soit de nouvelles normes dites de 3<sup>ème</sup> génération (3G et 3G+) (UMTS), ou de 4<sup>ème</sup> génération (4G) (LTE) en cours de déploiement.

## 2. Communications données

Les besoins actuels s'orientent vers des liaisons qui puissent transporter indifféremment de la voix ou des données alors que les contraintes sont radicalement différentes. Les consommateurs recherchent également une simplification des interactions entre les systèmes.

Au delà de ce constat général, des tendances lourdes pour les applications peuvent être identifiées.

- (a) INTERNET avec débits élevés pour (ADSL et ADSL2, fibre optique...) :

- vidéos à la demande
- courriers électroniques avec images attachées
- consultations rapides de bases de données
- téléchargements et échanges de fichiers

- (b) INTERNET avec mobilité totale ou partielle pour une consultation de courriels ou bases de données en usage itinérant :

- mobilité partielle : consultation sans déplacement hors de la zone de couverture du point d'accès de rattachement, à des endroits variables (Hotspot Wifi...)
- mobilité totale : consultation en cours de déplacement en avion, train, voiture ou piétonnier (UMTS)

- (c) Interopérabilité totale et simple entre les différents systèmes de traitement de données (transparence pour l'utilisateur) :

PC de bureau ou portable, PDA, scanner, imprimante, appareils de prise de vue numériques, baladeur MP3...

2 objectifs distincts (Bluetooth et Zigbee) :

- i. simplification et même élimination des câbles de connexion
- ii. reconnaissance automatique, au niveau des applications, des sources potentielles d'informations numériques

### 3. Conclusions :

Les attentes énoncées précédemment conduisent à des solutions techniques différentes comme l'indique l'existence de différents standards internationaux.

Il est relativement difficile d'assurer un haut débit en même temps qu'un déplacement libre et rapide. En effet le bruit dans le canal hertzien conduit à une déformation et un brouillage des constellations IQ permettant les modulations haut-débits.

Un système faible coût implique généralement des performances limitées soit en terme de débit, soit en terme de portée pour un système radiofréquence.

Un système câblé s'il permet des acheminements rapides sur de longues distances est souvent limité dans ces performances par les systèmes électroniques d'aiguillage nécessairement présents pour assurer un maillage dense dans la zone géographique de fourniture du service ; et dans son développement par les coûts de déploiement des infrastructures réseaux.

Une constante dans tous les nouveaux systèmes est l'optimisation de l'utilisation du spectre radio-fréquence qui est une denrée rare. Nous allons ainsi présenter les nouvelles techniques de modulation mises en œuvre pour ces nouveaux systèmes avec leurs avantages et leurs inconvénients. Ces techniques issues initialement des systèmes militaires peuvent être déployées à grande échelle pour des systèmes grand public grâce au faible coût des systèmes de traitement numérique et au facteur d'échelle lié au marché grand public.

## 2 Haut-débit et nouvelles modulations (bande étroite → large bande)

### 2.1 Rappels sur les modulations bandes étroites

En première années, les modulations analogiques et numériques abordées étaient bandes étroites.

#### 2.1.1 Modulations analogiques :

$S_m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$  est le signal modulant .

$S_c(t) = A_c \cos(\omega_c t)$  définit la porteuse

Une modulation est dite bande étroite lorsque  $\omega_m \ll \omega_c$ .

Le spectre du signal reste très localisé autour de la porteuse. Lors de la propagation, on peut considérer que tout le signal subit les mêmes perturbations.

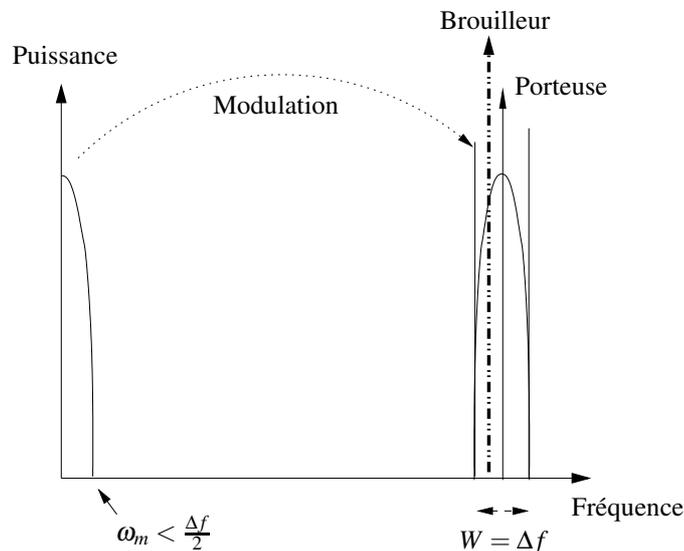


FIGURE 1 – Modulation bande étroite

La relation  $\omega_m \ll \omega_c$  implique pour conserver le rapport  $\frac{\Delta f}{f_0}$  constant, soit une limitation du débit, soit une augmentation de la fréquence porteuse pour augmenter la fréquence modulante et ainsi le débit maximal théorique du canal de communication. Les nouveaux systèmes de radiocommunication haut-débit utilisent ainsi des gammes de fréquences de plus en plus élevées.

Cette relation est vraie pour toutes les modulations qu'elles soient analogiques ou numériques même multi-états. Pour notre part, nous allons nous concentrer sur l'étude des modulations numériques.

L'utilisation d'une modulation numérique sous-entend une émission par salve des données avec compression. Il faut en effet coder les informations numériques ou analogiques (voix) sous forme d'un train de données binaires qui sert à générer à son tour un signal analogique seul apte à être véhiculé au travers d'un média de transport. Les temps de traitement impliquent un décalage temporel, limité uniquement par une compression des informations à transmettre.

### 2.1.2 Modulations numériques multi-états

#### (Rappel dans le cas d'une modulation QAM=Quadrature Amplitude Modulation)

Une modulation numérique complexe est définie par le nombre d'états possibles dans la constellation IQ correspondante. Soit  $M$  le nombre d'états modulant disponibles,  $M = 2^N$  où  $N$  est le nombre de bits codés par un état.

La forme générale d'un signal modulant complexe (à la sortie du générateur) est :

$$S_m(t) = \sum_k (a_k + jb_k) g(t - kT) \quad (1)$$

Dans l'équation 1,  $(a_k + jb_k)$  représente les états complexes et  $g(t)$  la fonction de mise en forme spectrale. L'ensemble définit les symboles complexes de la modulation numérique multi-états.

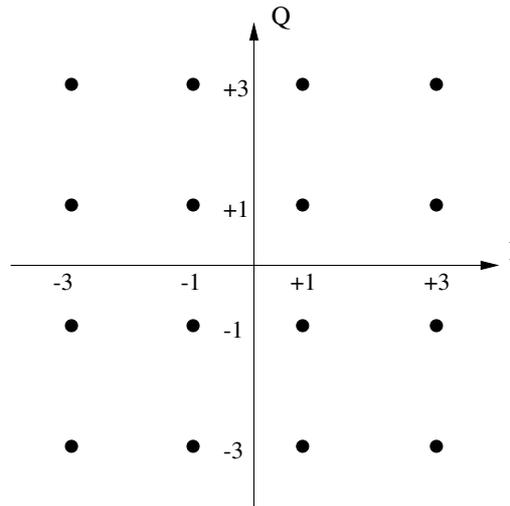


FIGURE 2 – Modulation numérique QAM 16 états

#### Rmq :

1. Si  $a_k^2 + b_k^2 = Cte$ , alors il s'agit d'une modulation par saut de phase uniquement (PSK).
2. Si  $b_k = 0$ , alors il s'agit d'une modulation par saut d'amplitude uniquement (ASK)

Avec l'équation 1, le signal modulé complet à la source s'écrit :

$$S(t) = Re \left\{ \sum_k (a_k + jb_k) g(t - kT) e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \right\} \quad (2)$$

Si la modulation numérique est bande étroite, alors le rythme de changement des symboles est lent.

On rappelle que la vitesse de modulation maximale est donnée par une séquence de changement d'états du type :

$$\text{état}_i / \text{état}_j / \text{état}_i / \text{état}_j / \text{état}_i / \text{état}_j \dots \quad (3)$$

Dans une telle séquence, la période minimale modulante est  $T = \frac{1}{f_m} = 2T_s$  où  $T_s = \frac{1}{f_s}$  est le temps d'un symbole.

Avec  $\Delta f$  la largeur fréquentielle d'un canal de communication, on a bien évidemment la relation :

$$f_m = \frac{1}{T} = \frac{1}{2T_s} = \frac{f_s}{2} = \frac{1}{2NT_{bit}} = \frac{f_{bit}}{2N} \leq \frac{\Delta f}{2} \quad (4)$$

### 2.1.3 Conclusion sur les systèmes à modulation bande-étroite

#### Avantages

1. Linéarité aisée des systèmes électroniques.
2. Adaptation des impédances entre sources et charges réalisable facilement.
3. Possibilité de multiplier le nombre de canaux simultanés en les juxtaposant dans la bande fréquentielle disponible.
4. Techniques de modulation "naturelles".
5. Les défauts du canal de propagation influencent toutes les informations de la même façon.

## Inconvénients

1. Une grande sensibilité d'un canal donné vis à vis d'un brouilleur localisé à la même fréquence. Toutes les informations sont perdues et le canal devient inexploitable.
2. Impossibilité sur un canal de largeur fréquentielle  $\Delta f$  d'utiliser une fréquence modulante supérieure à  $\frac{\Delta f}{2}$ . Avec des modulations multi-états, on peut augmenter le débit mais au détriment de la sensibilité au bruit. Il y a une limitation intrinsèque du débit maximal disponible.
3. Une variation du débit implique d'utiliser plusieurs canaux, ce qui rend éventuellement l'exploitation difficile.
4. L'émission de l'information dans une bande réduite conduit à une puissance crête relativement importante. Actuellement, on cherche à réduire cette puissance dans les systèmes modernes pour des questions de santé publique et de cohabitation avec les autres systèmes électromagnétiques ou électroniques.
5. Enfin, toute l'information étant concentrée sur une étendue spectrale faible, il est relativement aisée "d'écouter" la communication pour en intercepter le contenu, même avec un cryptage.

Les méthodes de modulations modernes tendent à dépasser ces limitations. Pour cela, au lieu d'être concentrée sur une petite étendue fréquentielle (le canal), l'information est répartie sur une large plage de fréquences. On parle alors de modulations "large bande". Nous allons maintenant présenter les techniques actuelles développées dans les nouveaux systèmes de communication.

## 2.2 Modulations larges bandes

### 2.2.1 Introduction

- De façon générale, les techniques de modulation large-bande consistent à répartir le signal utile sur une large plage de fréquences autour de la porteuse. La relation  $\omega_m \ll \omega_c$  devient  $\omega_m < \omega_c$ .  
Les modulations large bande permettent ainsi :
  1. Une plus grande immunité contre les brouillages électromagnétiques à fréquence localisée. Seule une faible partie du signal est perturbée par un brouilleur localisé.
  2. Une densité spectrale de puissance globalement plus faible : pour l'émission des informations de chaque communication, la puissance disponible est étalée sur une large plage de fréquences.
  3. Une meilleure protection contre les "écoutes" : chaque liaison radio-fréquence apparaît comme du bruit pour les autres. L'écoute nécessite de capter une grande largeur spectrale ce qui limite la sensibilité des récepteurs "pirates".
  4. Une augmentation sensible du débit maximal disponible sur la liaison.
- En vertu de la relation de Shannon sur la capacité d'un canal de communication, une augmentation de la largeur de la bande passante (ou largeur du canal fréquentiel) permet d'augmenter le débit théorique maximal.  
On rappelle que la capacité  $C$  en  $\text{bit}^{-1}$  s'exprime en fonction du rapport signal sur bruit  $\frac{S}{N}$  et de la bande passante du canal de transmission  $W = \Delta f$  en Hz selon la relation de Shannon (5).

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = W \log_2 \left( 1 + \frac{E_{bit}}{N_0} \frac{f_{bit}}{W} \right) \quad (5)$$

Pour un signal numérique, l'énergie d'un bit est  $E_{bit} = S \cdot T_{bit}$ .  $S$  est la puissance du signal. La puissance du bruit est  $N = W N_0$  quand  $N_0$  est la densité spectrale uniforme de puissance du bruit (bruit blanc additif gaussien à bande spectrale limitée). Le terme obtenu  $\frac{E_{bit}}{W}$  en bit/s/Hz correspond à l'efficacité spectrale de la technique de transport de l'information utilisée, pour le système de télécommunication étudié.

- Il existe actuellement deux catégories de modulations larges bandes : les modulations à étalement de spectre et les modulations multi-porteuses.  
Les nouveaux systèmes de communications utilisent ainsi trois grandes techniques de modulation :
  1. Les techniques d'étalement de spectre par sauts de fréquences (lents ou rapides).
  2. Les modulations à étalement de spectre par séquence directe.
  3. Les modulations multi-porteuses (de type OFDM).

Quel que soit le type retenu, les modulations large bande consistent à répartir l'information sur une plage de fréquences très large comparativement aux modulations classiques à bande étroite.

Dans le cas de la radiotéléphonie mobile, plusieurs mobiles (soit plusieurs utilisateurs) partagent simultanément cette large bande pour assurer un multiplexage.

### 2.2.2 L'étalement de spectre par sauts de fréquences (frequency hopping)

Dans les systèmes de communication modernes, plusieurs fréquences sont utilisées. Cette diversité fréquentielle permet d'envisager un moyen simple de s'affranchir des brouilleurs localisés, et de limiter les écoutes "non autorisées".

Des sauts d'une fréquence porteuse à une autre, à des intervalles de temps réguliers et rapprochés au cours de la liaison hertzienne, permettent, dans le cas d'un brouilleur localisé, de ne perdre que peu de données. D'autre part, cette suite de fréquences porteuses, si elle est choisie de façon pseudo-aléatoire, complique l'interception par un système tiers.

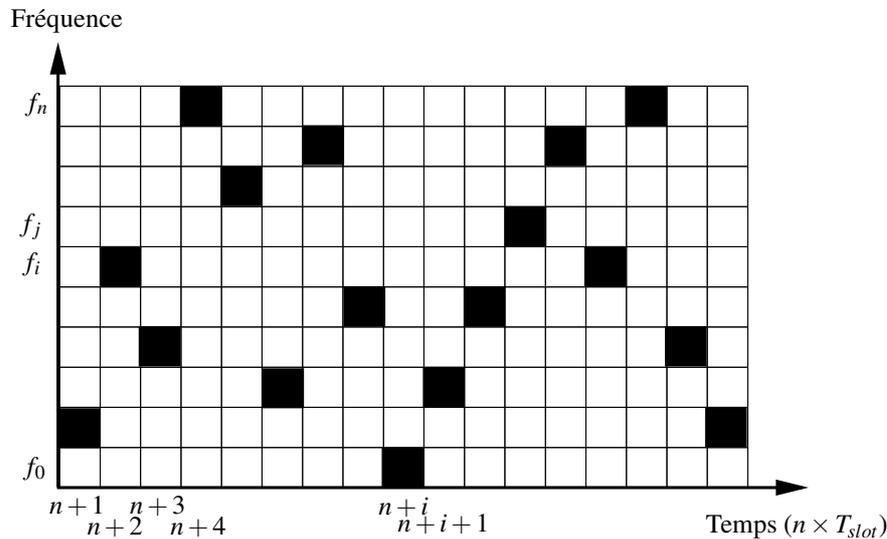


FIGURE 3 – Le saut de fréquences

Dans la figure 3,  $T_{slot}$  désigne le temps d'émission sur une fréquence parmi l'ensemble des fréquences disponibles. On distingue alors la technique par sauts de fréquences lents ( $T_{slot} \gg T_{symbole}$ ) et l'étalement de spectre par sauts de fréquences rapides pour lequel au contraire  $T_{slot} \ll T_{symbole}$ .

1. Le saut de fréquences lent revient à changer de fréquence porteuse à chaque nouvelle trame émise, essentiellement pour limiter le brouillage par interférences avec des émetteurs à fréquence localisée. Cette technique permet également de combattre les effets d'évanouissement ("fading") lié au phénomène des multi-trajets. Plusieurs bits d'informations sont ainsi émis sur chaque porteuse. Le saut de fréquence lent est mis en œuvre dans le GSM et dans les systèmes Bluetooth. La séquence des sauts est choisie par l'émetteur et le récepteur à l'aide d'un algorithme commun et apparaît comme pseudo-aléatoire pour les autres systèmes.
2. Le saut de fréquences rapide consiste au contraire à changer plusieurs fois de fréquences porteuses pendant le temps d'un bit. L'information modulante est ainsi "étalée" sur plusieurs porteuses donc sur une plage de fréquences étendue. La séquence des sauts est ici encore choisie par l'émetteur et le récepteur à l'aide d'un algorithme commun et apparaît également comme pseudo-aléatoire. Ceci rend l'écoute particulièrement difficile car la vitesse des sauts est élevée. Enfin la puissance est émise sur plusieurs porteuses en parallèle. Peu de signal est émis sur chaque porteuse, ce qui limite la puissance crête dans le canal de communication. Bien évidemment, le canal fréquentiel nécessaire est finalement plus grand. Il correspond à l'agrégation des différents petits canaux utilisés au cours de la transmission des bits.

Pour les deux techniques, le système en émission est celui décrit par la figure 4. Le flux de données binaire à transmettre sert à moduler une porteuse intermédiaire. Celle-ci est ensuite multipliée par une séquence de fréquences permettant d'occuper les canaux disponibles.

Pour la réception le procédé est identique. Il suffit de multiplier le signal étalé reçu à l'antenne par la même séquence de sauts de fréquences pour retrouver la porteuse modulée intermédiaire en FSK ou BPSK. La démodulation de celle-ci permet de revenir au flux de données d'information.

Qu'il s'agisse d'un étalement par des sauts de fréquences lents ou rapides, cette technique permet de combattre les dégradations occasionnées par le canal de transmission tel que l'évanouissement. Le changement de la fréquence de la porteuse modifie les déphasages des signaux ayant parcourus des distances différentes. Si pour une fréquence le champ résultant est nul en un lieu, il ne le sera pas pour une autre fréquence si cette dernière est suffisamment éloignée de la précédente. La séquence de sauts définit donc des fréquences successives qui ne sont pas adjacentes.

Pour améliorer encore cet effet, il est intéressant de mettre en place un procédé de brassage des données. On parle "d'interleaving" en anglais. Il s'agit de répartir dans plusieurs salves successives les données normalement émises en une seule (Fig. 5).

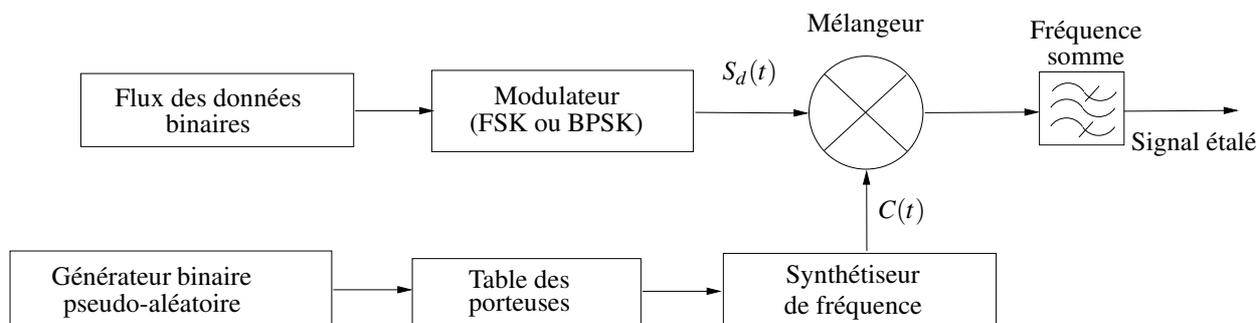


FIGURE 4 – Étalement de spectre par sauts de fréquences

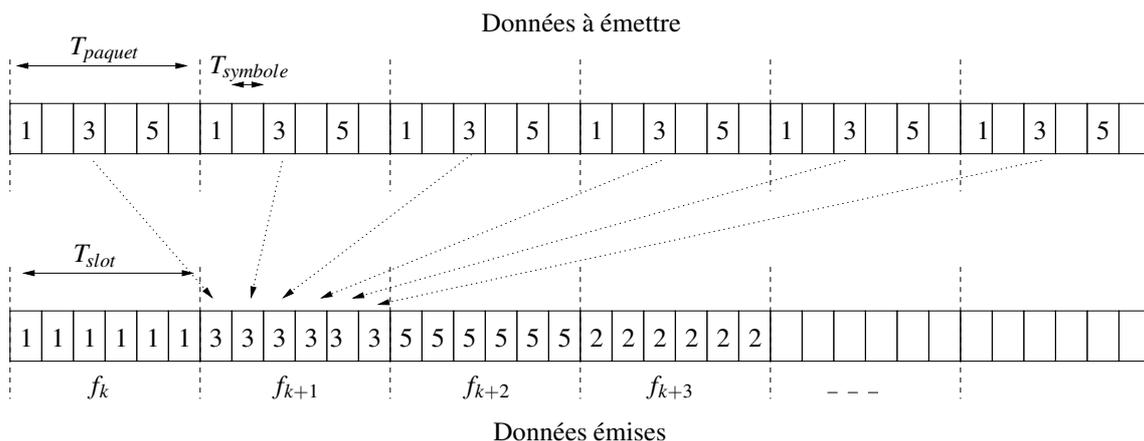


FIGURE 5 – Brassage des données (exemple)

### 2.2.3 L'étalement de spectre par séquence directe

#### 1. En émission

Le principe est de multiplier (OU exclusif en logique binaire) la trame des données binaires à émettre dont le débit est  $n \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ , par une séquence de codage dont le débit est beaucoup plus élevé ( $N \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ ).  $N$  est le "Chip rate" (Fig.6). Cette multiplication conduit à la trame modulante binaire dont le débit est pratiquement celui de la séquence d'étalement.

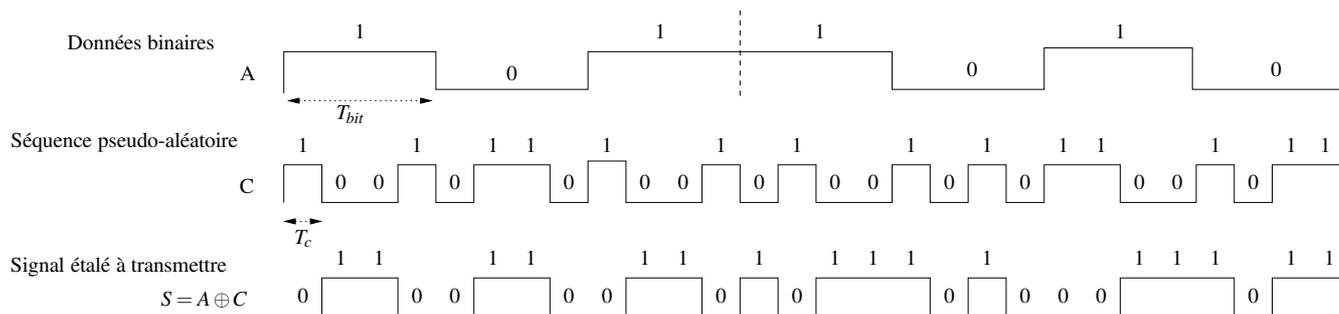


FIGURE 6 – Étalement de spectre par séquence directe

La fréquence modulante obtenue est au rythme de  $N \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$  beaucoup plus élevé que le rythme binaire initial, ce qui étale le spectre (Fig. 7). Pour être efficace, cette séquence doit conduire à un étalement du spectre de façon relativement uniforme sur la bande spectrale étendue. Elle doit "blanchir" le spectre émis.

La séquence de codage est ainsi choisie avec des caractéristiques proches d'un signal aléatoire (bruit blanc) et donc une étendue relativement importante.

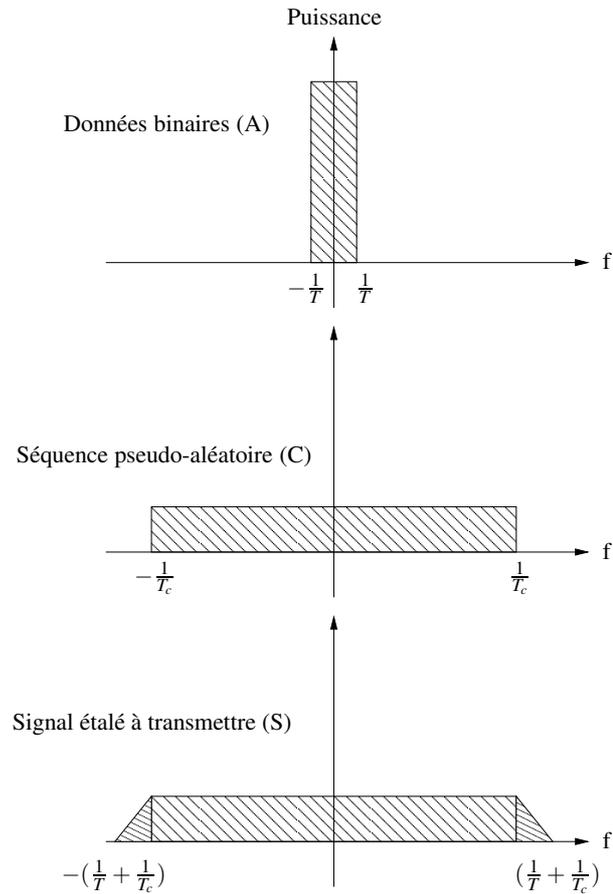


FIGURE 7 – Spectre étalé par séquence directe

Le système à l'émission suit l'architecture de la figure 8.

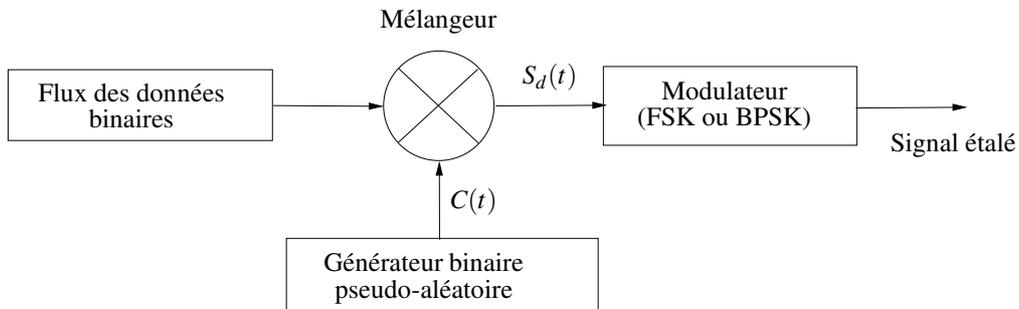


FIGURE 8 – Émetteur pour étalement de spectre par séquence directe

### 1. En réception

Pour retrouver l'information à la réception, le signal démodulé est remultiplié avec la séquence de codage utilisée à l'émission. Les propriétés de la multiplication binaire font qu'une trame binaire multipliée avec elle-même donne zéro ( $B \oplus B = 0$  et  $0 \oplus X = X$ ). On retrouve ainsi le signal de départ (Fig. 6).  $S$  est le signal étalé,  $C$  la séquence d'étalement et  $A$  les données binaires de départ.

$$S \oplus C = A \oplus C \oplus C = A \quad (6)$$

### 2. Propriétés

- La fonction d'étalement permet de s'affranchir des brouilleurs localisés mais aussi des écoutes pirates.
- Elle permet également de lutter contre le brouillage lié aux multi-trajets.

On s'intéresse au cas d'un décalage temporel quand le signal reçu n'est pas nul. Si la séquence de codage présente une auto-corrélation stricte, alors seul le trajet principal sera pris en compte. L'auto-corrélation stricte revient à dire qu'il faut que la séquence de codage multipliée binaires avec elle-même mais avec un décalage quelconque de 1 bit ou plus donne une séquence proche d'un bruit blanc donc comme s'il s'agissait d'un signal provenant d'un autre émetteur. Il n'est donc pas "reconstruit" et reste un faible bruit dans le canal, non gênant pour la réception du signal utile.

Les relations de corrélation ou d'inter-corrélation pour les séquences s'estiment en utilisant les règles suivantes :

1. Un 0 de la trame binaire pseudo-aléatoire est représenté par  $-1$
2. Un 1 de la trame binaire pseudo-aléatoire est représenté par  $1$
3. La multiplication employée est une multiplication normale (et non pas une addition modulo deux)
4. On obtient ainsi :
  - (a) pour l'auto-corrélation (même séquence de codage)

$$R(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_k C_{k-\tau} \quad (7)$$

- (b) pour l'inter-corrélation (deux séquences de codage)

$$X(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_k C'_{k-\tau} \quad (8)$$

L'auto-corrélation stricte donne  $R(\tau) = 0 \forall \tau \neq 0$  et  $R(0) = C^2$ .

Dans le cas d'une superposition de signaux décalés dans le temps à l'antenne du récepteur, il s'agit en fait du même signal  $S = A \oplus C$  avec un décalage temporel variable.  $S$  est la séquence de données utiles et  $C$  la séquence directe d'étalement. Pour le récepteur, l'auto-corrélation stricte permet de retrouver pour chacun des signaux le décalage temporel et de les resommer de façon constructive. Le récepteur doit calculer une série d'inter-corrélations entre le signal reçu et la séquence d'étalement de l'émission mais décalées dans le temps.

Soit  $S_{Total}$ , la somme de deux signaux identiques décalés dans le temps à l'antenne et donc brouillés :

$$S_{Total} = S + S_{\Delta T} = A \oplus C + A_{\Delta T} \oplus C_{\Delta T} \quad (9)$$

A la réception, il suffit de multiplier  $S_{Total}$  par la séquence  $C$  avec un éventuel décalage temporel pour retrouver les deux signaux :

$$S_1 = S_{Total} \oplus C = A \oplus C \oplus C + A_{\Delta T} \oplus C_{\Delta T} \oplus C = A \oplus C^2 = A \quad (10)$$

$$S_2 = S_{Total} \oplus C_{\Delta T} = A \oplus C \oplus C_{\Delta T} + A_{\Delta T} \oplus C_{\Delta T} \oplus C_{\Delta T} = A_{\Delta T} \oplus C_{\Delta T}^2 = A_{\Delta T} \quad (11)$$

Ayant extrait les deux copies du signal de départ, le récepteur peut alors les sommer en phase pour améliorer la réception en environnement difficile.  $A$  et  $A_{\Delta T}$  sont en effet identiques au décalage temporel  $\Delta T$  près.

Cette technique de modulation large bande par étalement du spectre par séquence directe est utilisée dans certaines normes 802.11 (Wifi) et dans les systèmes de téléphonie de type CDMA américain ou asiatique, ou encore UMTS (3G+) et 4G.

## 2.2.4 Les modulations multi-porteuses

La dernière méthode de modulation large bande revient à émettre une grande quantité de données en utilisant plusieurs fréquences porteuses simultanément, contrairement aux deux techniques précédentes qui n'utilisent qu'une seule fréquence porteuse à la fois. Cette technique porte le nom général de modulation DMT (Discrete Multi-Tone), soit une modulation à porteuses multiples discrètes.

Considérons une large plage de fréquences pour notre système de radiocommunication. Contrairement aux autres techniques d'étalement de spectre qui consistent à moduler rapidement une porteuse unique, les modulations multi-porteuses utilisent des porteuses modulées lentement mais en très grand nombre. La bande de fréquence est partagée en un nombre important de canaux de communications indépendants et étroits spectralement. L'information à transmettre est ainsi répartie à chaque instant sur plusieurs de ces canaux. Ceci décrit le principe de la modulation multi-porteuses. Néanmoins telle quelle, cette approche n'étalement pas réellement le spectre. L'étalement du spectre vient de la redondance ajoutée aux informations à transmettre avant émission sur les porteuses multiples.

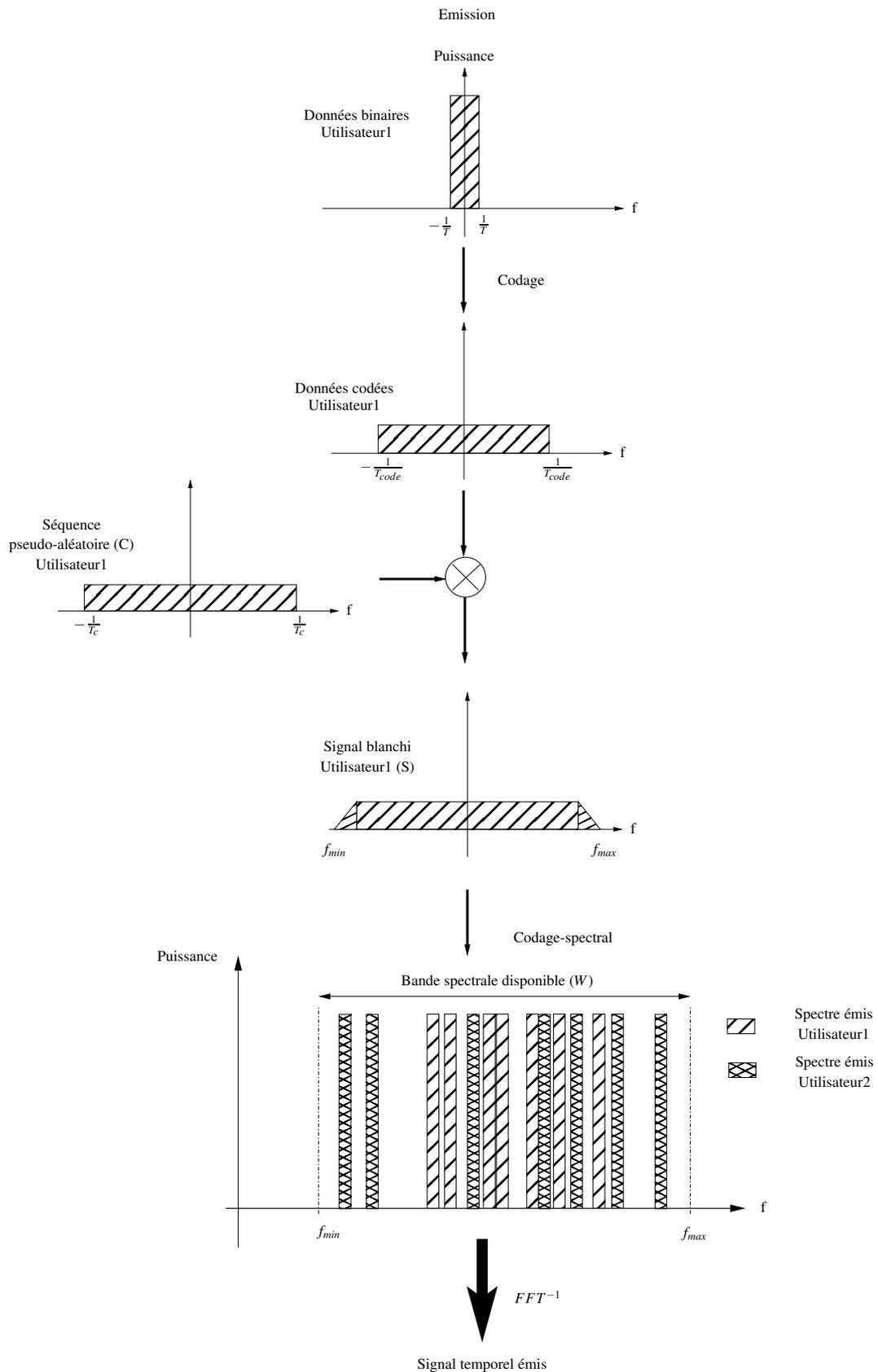


FIGURE 9 – Construction d'un signal pour une modulation multi-porteuses

Décrivons le procédé schématisé dans la figure 9 :

1. Soit  $D_c = n \text{ bits } s^{-1}$  le débit nécessaire dans le canal pour véhiculer l'information utile.
2. Si on émet sur  $M$  porteuses simultanément, chaque sous porteuse propose un débit de  $D_{sc} = \frac{D_c}{M} = \frac{n}{M} \text{ bits } s^{-1}$ . Si  $D_{sc} = 2^k \frac{W}{M} \text{ bits } s^{-1}$ ,

alors chaque sous-porteuse est utilisée avec une modulation multi-états (avec *k* états).  $W$  représente ici la largeur spectrale totale disponible entre  $f_{min}$  et  $f_{max}$ .

3. Pour renforcer la résistance de la liaison vis à vis des parasites électromagnétiques, on ajoute de la redondance et on prend un débit binaire utile de  $D_{sc} = \frac{1}{P} \frac{n}{M} bits s^{-1}$ .  $P$  indique le degrés de redondance. Par exemple un code convolutionnel  $P = \frac{2}{3}$  indique que pour 2 bits d'information utile, 3 bits serviront à moduler les porteuses.
4. Enfin pour répartir convenablement les données de façon pseudo-aléatoire sur les différents sous-canaux, les données après codage convolutionnel sont multipliées avec une séquence de blanchiment de type séquence binaire pseudo-aléatoire mais de débit juste supérieure ou égal au débit des données. Ce blanchiment n'étale pas le spectre, mais fait apparaître la liaison comme du bruit blanc pour tout système d'écoute pirate.
5. Pour répartir les données utiles sur les différentes porteuses, on utilise finalement des règles de projections en considérant les sous-canaux d'émissions comme les coordonnées d'un repère orthogonal à  $M$  dimensions. On parle ainsi de modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). On applique des coefficients complexes (amplitude et phase) sur chacune des sous-porteuses. On crée alors un spectre particulier pour chaque temps symbole et chaque transition entre deux symboles successifs temporellement.
6. Le signal décrit dans l'espace des fréquences (espace des sous-canaux) est alors converti en son signal temporel haute-fréquence équivalent par une transformée de Fourier inverse. Les étapes 5 et 6 forment la modulation proprement dite.

Ainsi comme pour l'étalement de spectre par séquence directe, les informations de départ au débit de  $n bits s^{-1}$  donnent un flux à émettre au rythme de  $N = P \cdot n bits s^{-1}$ , mais l'étalement du spectre n'est pas le simple fruit d'une multiplication par une trame d'étalement.

#### **Application de la modulation multi-porteuses :**

Les techniques de modulation multi-porteuses sont très intéressantes pour les systèmes présentant des phénomènes de multi-trajets avec de longs délais mais sans annulation du champ électromagnétique. Avec une modulation classique haut débit, le temps d'un symbole est court. Au niveau de l'antenne du récepteur, les signaux décalés dans le temps de plus d'un demi-symbole apparaissent comme brouillés. Pour tolérer des délais longs, il faut augmenter le temps symbole. Dans une modulation classique cela conduit à diminuer le débit, ce qui n'est pas recherché.

Pour une modulation multi-porteuses, chaque sous-porteuse est modulée avec un débit beaucoup plus faible que le débit d'information, et ce d'autant plus que le nombre  $M$  de sous-porteuses est grand. Le temps symbole pour chaque petit canal fréquentiel est ainsi multiplié pratiquement par un facteur  $M$ . Les délais tolérés entre les différents trajets sont ainsi beaucoup plus grands. Le système est plus robuste. Ce type de délais longs entre trajets différents pour un même signal est une caractéristique des systèmes d'émission de télévision. La modulation OFDM est ainsi utilisée pour le nouveau standard de la télévision numérique terrestre (TNT). Le phénomène de multi-trajets est aussi sensible pour les réseaux informatiques sans-fil de type Wifi surtout dans la bande des 5GHz pour l'intérieur des bâtiments (et également dans la bande des 2,4GHz mais à un degré moindre). Les normes 802.11a et 802.11n utilisent ainsi la modulation OFDM.

## **3 Techniques de multiplexages des liaisons**

### **3.1 Frequency Division Multiple Access (FDMA)**

Dans la bande de fréquences allouée au système, on définit plusieurs canaux fréquentiels de largeur fixe (Fig. 10). Chaque canal fréquentiel permet d'écouler un trafic de données. Il y a plusieurs utilisateurs simultanés par séparation physique des canaux fréquentiels. On parle de multiplexage fréquentiel. La ressource partagée est ainsi la fréquence.

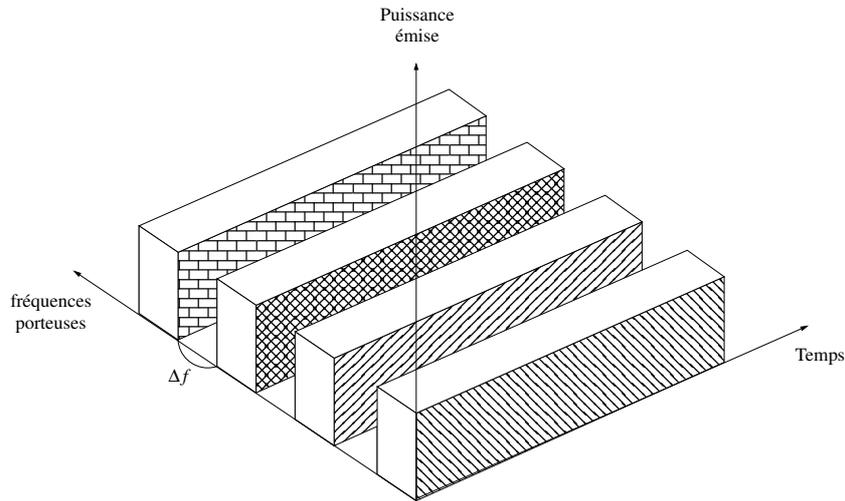


FIGURE 10 – FDMA

Un exemple de la vie de tous les jours est la radiophonie sur la bande FM. Le numéro donné avec chaque nom de chaîne de radio correspond à la fréquence porteuse qui lui est allouée. La télévision est un autre système utilisant le multiplexage fréquentiel.

Il est important de noter que le système de réception pour différencier le canal utile  $C$  des autres canaux doit utiliser un filtrage passe-bande centré sur la fréquence porteuse du canal  $f_c$ . Ce filtrage implique un intervalle de garde fréquentiel entre chaque canal. Pour une bande passante totale donnée, une partie de l'étendue spectrale n'est donc pas utilisée pour l'acheminement de données. Le multiplexage qui apporte de la souplesse pour le nombre de communications simultanées se fait au détriment du débit total transporté.

### 3.2 Time Division Multiple Access (TDMA)

Les données dans les systèmes numériques sont envoyées par trames pour permettre le codage de l'information initiale et l'ajout de redondance et de codes correcteurs d'erreurs pour assurer une qualité de liaison satisfaisante. Par ailleurs, l'information subit une compression qui permet de limiter le débit de données à émettre. Finalement pour une trame de données au départ de 1 seconde, la trame véhiculée par la liaison radio-fréquence dure par exemple 100ms. Il reste donc du temps non utilisé. Le principe du multiplexage temporel est d'attribuer ce temps restant à d'autres communications en utilisant le même canal fréquentiel. On met bout à bout plusieurs émissions distinctes dans des intervalles de temps fixes ("slots"). La ressource partagée est maintenant le temps. Il s'agit du multiplexage temporel.

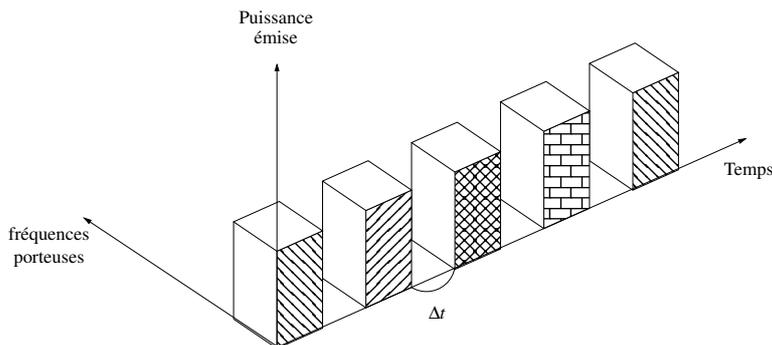


FIGURE 11 – TDMA

Le multiplexage temporel uniquement disponible avec les systèmes de télécommunication numériques (du fait de la compression de données indispensable) implique une synchronisation très précise entre les différents émetteurs et récepteurs afin de respecter les intervalles temporels (slots) affectés à chaque communication. Toute horloge surtout pour un système grand public présente des fluctuations au cours du temps. Un tel système n'est donc envisageable qu'avec une tolérance sur les bornes temporelles des slots de communication. Ainsi pour le TDMA, un intervalle de garde temporel est inclus entre chaque slot et des motifs de re-synchronisation sont insérés de façon régulière dans les trames échangées. Le temps non utilisé pour les communications et les données de re-synchronisation (données réseau) rajoutées contribuent ici encore à une réduction du débit transmis par rapport au débit théorique maximal. Cependant au prix de cette diminution du débit utile, le multiplexage temporel offre une souplesse supplémentaire pour l'affectation de canaux de communications par rapport au seul espace des fréquences.

### 3.3 TDMA+FDMA

Pour augmenter le nombre de canaux de communication et permettre une plus grande souplesse d'affectation de ceux-ci, les systèmes modernes combinent presque toujours un multiplexage temporel et fréquentiel. Les systèmes combinent ainsi un multiplexage temporel sur plusieurs fréquences porteuses en parallèle. Les canaux de communications sont cette fois définis par un couple : slot temporel + fréquence porteuse.

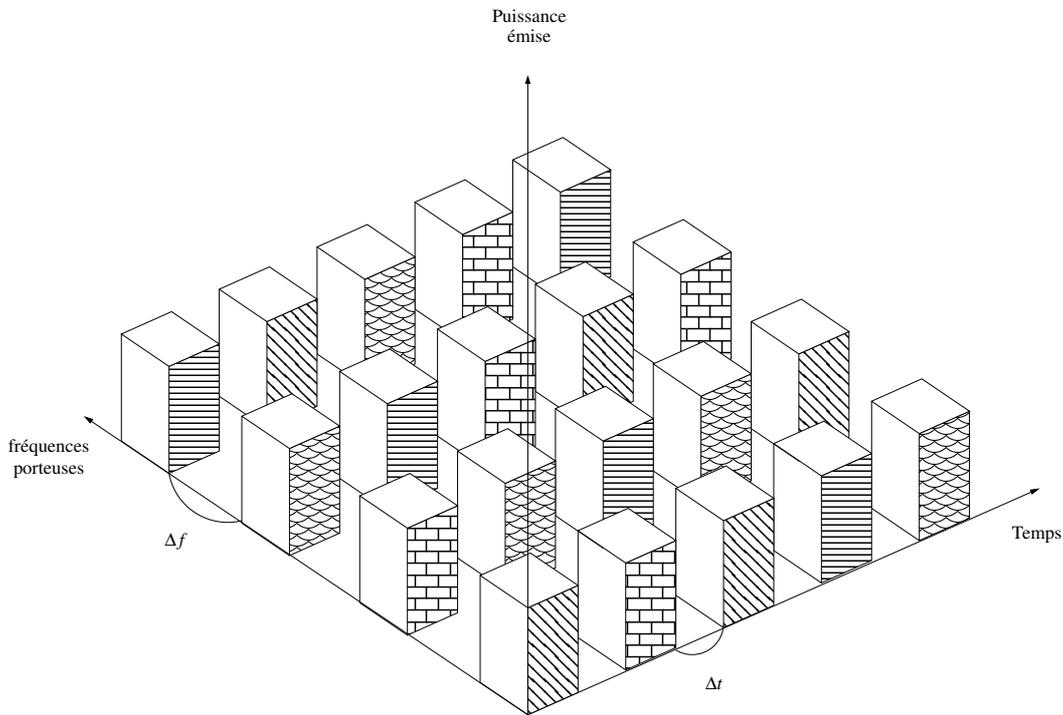


FIGURE 12 – TDMA+FDMA avec sauts de fréquences lent

Cette souplesse obtenue dans le choix des canaux de communications peut être mise à profit pour lutter par exemple contre des signaux de brouillage localisés soit dans le temps, soit dans le domaine fréquentiel. Il suffit de ne pas émettre à la fréquence donnée à l'instant donné pour éviter de perdre des informations. Bien sur la technique du saut de fréquences présentée dans le cas de l'étalement de spectre nécessite ce double multiplexage.

### 3.4 Code Division Multiple Access (CDMA)

Dans le cas de l'étalement de spectre par séquence directe, pour utiliser correctement la bande spectrale large, il est nécessaire de pouvoir émettre simultanément plusieurs communications au sein de ce canal étendu. Pour cela, il faut qu'une séquence de codage d'un émetteur autre que celui désiré, multipliée par la séquence de codage en cours d'utilisation ne re-concentre pas l'information. Il faut que le résultat apparaisse comme du bruit blanc. Les deux séquences de codage doivent être orthogonales au sens de la multiplication binaire.

Cette propriété d'orthogonalité permet d'assurer le multiplexage des communications. On parle de multiplexage par codage (CDMA).

La figure 13 explicite le principe du multiplexage par codage direct du côté de l'émission. On notera que la puissance émise est variable en fonction du nombre de communications simultanées.

A la réception, le principe pour récupérer les données est semblable à l'émission. Le signal complet (plusieurs communications ensembles) est multiplié par la séquence de codage affectée à l'utilisateur considéré. Ceci a pour effet de re-concentrer spectralement l'information utile tout en laissant étalé les spectres des autres communications qui restent ainsi semblable à du bruit. La figure 14 illustre le fonctionnement du récepteur.

Dans ce cas, on considère que le média partagé est la puissance dans le canal. En effet, pour une puissance totale donnée dans un canal, compte tenu de la puissance minimale qui doit être restituée par la partie réception, la puissance pour chaque canal de communication est définie et le nombre de canaux de communications simultanés par canal fréquentiel élargi est limité.

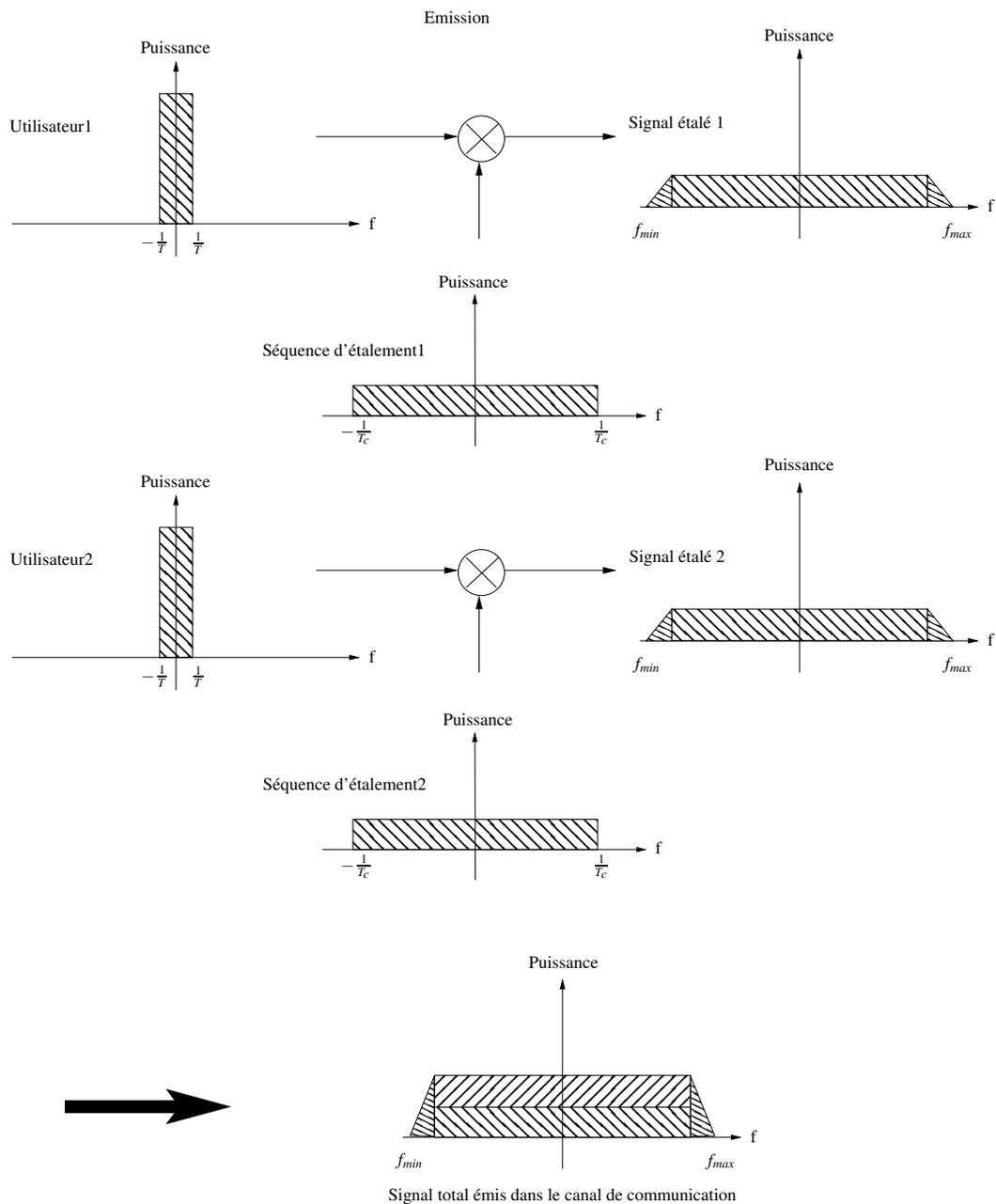


FIGURE 13 – CDMA à l'émission

Si le principe du CDMA est élégant, il est en fait plus complexe à implanter qu'il n'y paraît.

Considérons deux utilisateurs en liaison avec la même station d'émission radio-fréquence mais dont l'un est deux fois plus éloigné que l'autre. Pour fixer les idées, supposons que l'utilisateur 1 est le plus éloigné. Sur l'antenne de réception de la station de base arrivent donc deux signaux qui sont complètement superposés spectralement mais dont l'un présente une puissance quadruple du second. Si le récepteur de la station de base essaie de re-concentrer le signal utile de la liaison 1 alors se pose le problème du rapport signal sur bruit lors du décodage final. En effet, le spectre utile de l'utilisateur 1 est bien re-concentré mais le signal de l'utilisateur 2 est équivalent à un bruit très important qui dans le pire des cas bloque l'exploitation du signal 1. On se retrouve dans le cas classique d'un signal noyé dans le bruit.

Pour tenir compte des puissances éventuellement très différentes reçues sur les récepteurs du système en fonction de la distance ou des phénomènes de multi-trajets, il est indispensable d'implémenter sur chaque émetteur un système de contrôle de la puissance émise. Ce système permettra de réduire la puissance des signaux naturellement les plus forts et au contraire d'amplifier les signaux les plus faibles. Le but est de ramener la puissance reçue pour chaque communication à une valeur moyenne commune.

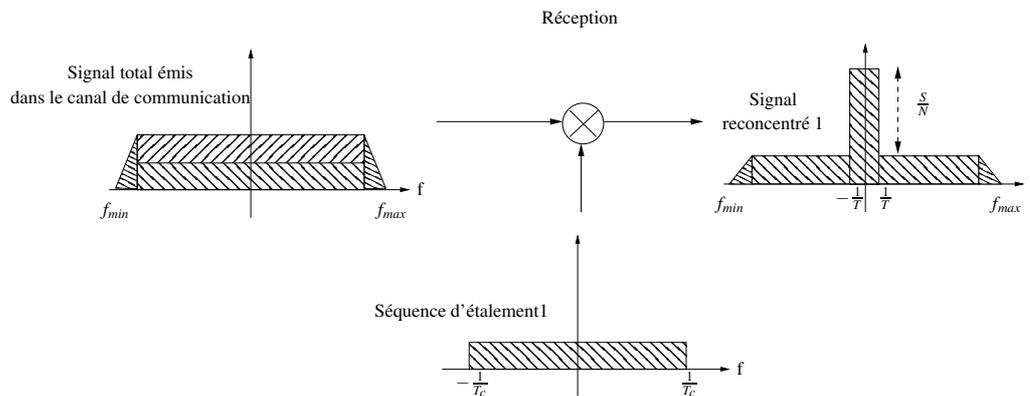


FIGURE 14 – CDMA à la réception

NB : Le principe du codage orthogonal utilisé ici pour multiplexer deux signaux lors d'une modulation par étalement de spectre par séquence directe est complètement transposable au cas des sauts de fréquence, et aux modulations multi-porteuses. En effet dans ces deux cas, la table des fréquences émises par un utilisateur doit être strictement différente de celle d'un autre utilisateur dans la même cellule. Il faut donc là encore un algorithme donnant des séquences orthogonales. Le produit scalaire employé pour définir l'orthogonalité restant à préciser dans chaque cas.

Pour le saut de fréquence l'orthogonalité est relativement simple à assurer car seule une fréquence entre en jeu pour chaque liaison à chaque instant. Pour les modulations multi-porteuses pour véhiculer plusieurs communications dans le canal élargi, l'orthogonalité est plus délicate car à chaque instant plusieurs fréquences sont utilisées par communication. A chaque nouveau symbole les fréquences utilisées par un canal changent mais entre deux canaux il ne doit jamais y en avoir de communes. En fait on doit définir des spectres disjoints (orthogonaux).

### 3.5 Liaison duplexe

Dans le cas d'une communications simultanée dans les deux sens (Full Duplex), il faut deux canaux de communications simultanément pour chaque liaison entre deux systèmes d'émission/réception. C'est le cas par exemple pour les liaisons téléphoniques mobiles. Il existe cependant des liaisons bidirectionnelles alternées (Half Duplex) dans lesquelles les communications sont acheminées alternativement de l'utilisateur 1 vers l'utilisateur 2 et vice versa. Parmi de tels systèmes, les plus connus sont les systèmes de talkie-walkie ou de CB (Citizen Band).

L'établissement d'une liaison bidirectionnelle se fait actuellement de deux façons :

- 2 fréquences sont utilisées par communication, une pour chaque sens. On parle alors de système FDD (Frequency Division Duplex)
- 2 intervalles de temps sont réservés pour chaque liaison. Il s'agit d'un système de communication alterné mais avec une fréquence d'alternance si rapide qu'elle est invisible pour l'utilisateur. On parle cette fois de systèmes TDD (Time Division Duplex). Rien à priori n'empêcherait d'utiliser un double codage pour établir le lien bidirectionnel. On pourrait parler de CDD (Code Division Duplex). Cependant aujourd'hui aucun système n'implémente un tel double codage. On peut d'ailleurs en conclure qu'un système CDMA est nécessairement aussi soit FDMA, soit TDMA... En fait il est les 3 à la fois mais avec des largeurs de canaux très importantes par rapport aux systèmes TDMA ou FDMA seuls.

### 3.6 Multiplexage spatial

Plusieurs réalités sont regroupées sous ce vocable général. En effet le multiplexage spatial regroupe à la fois les techniques de réaffectation spatiale des ressources spectrales (ou ré-allocation de fréquences), de répartition angulaire statique ou dynamique de la puissance avec les antennes configurables et adaptatives et enfin les techniques d'optimisation spatio-temporelle du canal de communication regroupées sous le terme général de système MIMO (Multi-Input Multi-Output).

Chacun de ces procédés a pour objectif de jouer sur le signal émis par les antennes pour diriger la puissance des signaux électromagnétiques échangés dans des directions angulaires particulières afin d'optimiser globalement le rapport signal sur bruit, et d'augmenter le nombre de communications simultanées au  $m^2$ . Il est important de noter que ces techniques spatiales n'ont de sens que pour des systèmes de radiocommunication utilisant la propagation des ondes électromagnétiques dans l'air comme médium de transport.

#### 3.6.1 Réseaux cellulaires

Nous allons nous intéresser d'abord au multiplexage spatial sous sa forme la plus simple qui conduit à la réalisation des réseaux de radiocommunication cellulaires.

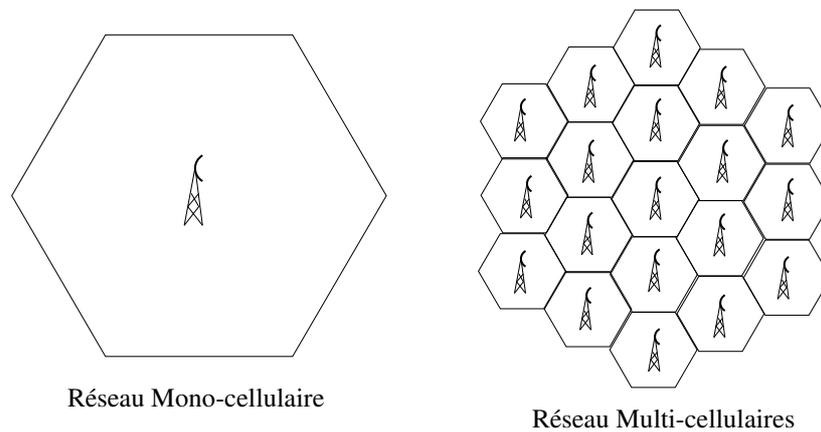


FIGURE 15 – Réseau cellulaire.

La figure 15 explicite le principe de la réaffectation des fréquences et sa conséquence, à savoir le développement des réseaux cellulaires. Considérons une zone géographique définie par le grand octogone. Supposons que le système dispose d'environ 7 fréquences pour émettre en mode FDMA. Avec la structure du système monocellulaire, la zone géographique est couverte par une seule station d'émission et on ne peut donc avoir que 7 liaisons simultanées sans brouillages. Pour pouvoir réutiliser 2 fois la même fréquence d'un point à un autre de cette cellule unique, il faut que la puissance d'une liaison ne gêne pas l'autre. Autrement dit, il faut que l'une des communications se passe loin de l'autre. Il faut donc 2 émetteurs différents chacun près d'un des 2 mobiles impliqués dans ces communications. La cellule initiale doit être redécoupée en cellules plus petites d'où l'implantation de réseaux cellulaires. Dans de tels réseaux, chaque cellule est entourée de 6 voisines donc a priori 7 fréquences sont nécessaires pour ne pas avoir de superposition spectrale entre deux cellules adjacentes. En fait, deux cellules espacées d'une autre peuvent utiliser la même fréquence. On peut ainsi ré-allouer les fréquences pour les cellules qui ne sont pas des plus proches voisines.

Le principe d'un système cellulaire (ou micro-cellulaire en fonction de la taille des cellules) conduit à un système plus coûteux à mettre en place. Il faut plus de systèmes d'émission/réception et des moyens d'interconnecter ces cellules entre elles pour acheminer les communications vers les réseaux câblés des opérateurs. Par contre, la puissance émise pour établir une liaison entre une base et un mobile est moindre car la distance est plus faible. Ceci conduit à une autonomie supérieure des appareils mobiles sur batterie et à une nuisance électromagnétique moindre. La ré-allocation des fréquences permet de densifier les canaux de communication mais nécessite d'établir un plan des fréquences lors de l'installation.

Pour les systèmes de 3ème génération (UMTS), un raffinement supplémentaire a été introduit sous la forme d'une séquence de blanchiment propre à chaque cellule et utilisée comme pour l'étalement par séquence directe. Les données à émettre sont multipliées par cette séquence non pour étaler le spectre (la séquence présente un débit semblable à celui des données) mais pour le blanchir. Chaque communication d'une cellule apparaît comme du bruit pour les cellules adjacentes lors de la reconstruction des données en réception. Il est ainsi possible d'utiliser dans une certaine mesure les mêmes fréquences dans les cellules adjacentes.

### 3.6.2 Antennes adaptatives

Dans un système cellulaire, le fait d'utiliser des cellules plus petites permet de mieux paver les zones géographiques de forme irrégulières. Il est ainsi tout à fait possible d'utiliser des cellules de formes variées. La forme hexagonale de la figure 15 est bien sûr une illustration commode mais absolument pas réaliste. Pour obtenir des zones de couverture variable, on joue sur le diagramme de rayonnement des antennes utilisées soit de façon statique (lors de la construction) soit de façon dynamique (couverture variable en fonction du temps (pas la météo !!!)). La couverture dynamique nécessite des antennes dites adaptatives. Il s'agit d'antenne réseau dont les éléments rayonnant sont alimentés par des signaux variables en phase et en amplitude les uns par rapport aux autres.

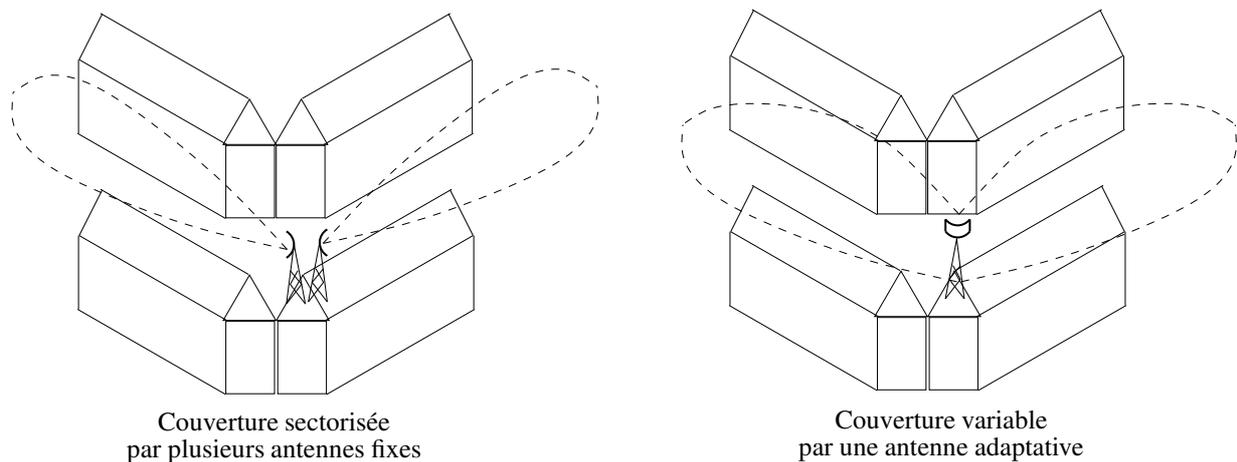


FIGURE 16 – Couverture adaptative.

En jouant sur les phases et amplitudes relatives des signaux émis par chaque antenne élémentaire du réseau, on peut construire des figures d'interférences complexes contrôlées à longue distance des sources, et ceux d'autant plus que le nombre d'éléments rayonnants est important. Cette liberté liée au nombre de sources est évidemment contre-balancé par la complexité des systèmes électroniques à mettre en œuvre pour déphaser et amplifier de façon indépendante un grand nombre de sources.

Les applications peuvent être très diverses. La figure 16 montre par exemple l'utilisation d'une antenne au lieu de deux pour la couverture de 2 secteurs angulaires particulier de l'espace. Il s'agit dans ce cas d'une utilisation statique où la configuration du système se fait lors de son installation. La figure 17 montre elle, une utilisation dynamique de l'adaptation du diagramme de rayonnement pour reporter une part des communications d'une cellule saturée vers une cellule disponible. Cette couverture variable peut aussi servir à annuler une direction de propagation particulière s'il apparaît un signal parasite fort provenant de cette direction. La déformation du diagramme de rayonnement peut également servir à émettre plus de puissance dans la direction d'un utilisateur pour améliorer la couverture du point de vue de la portée.

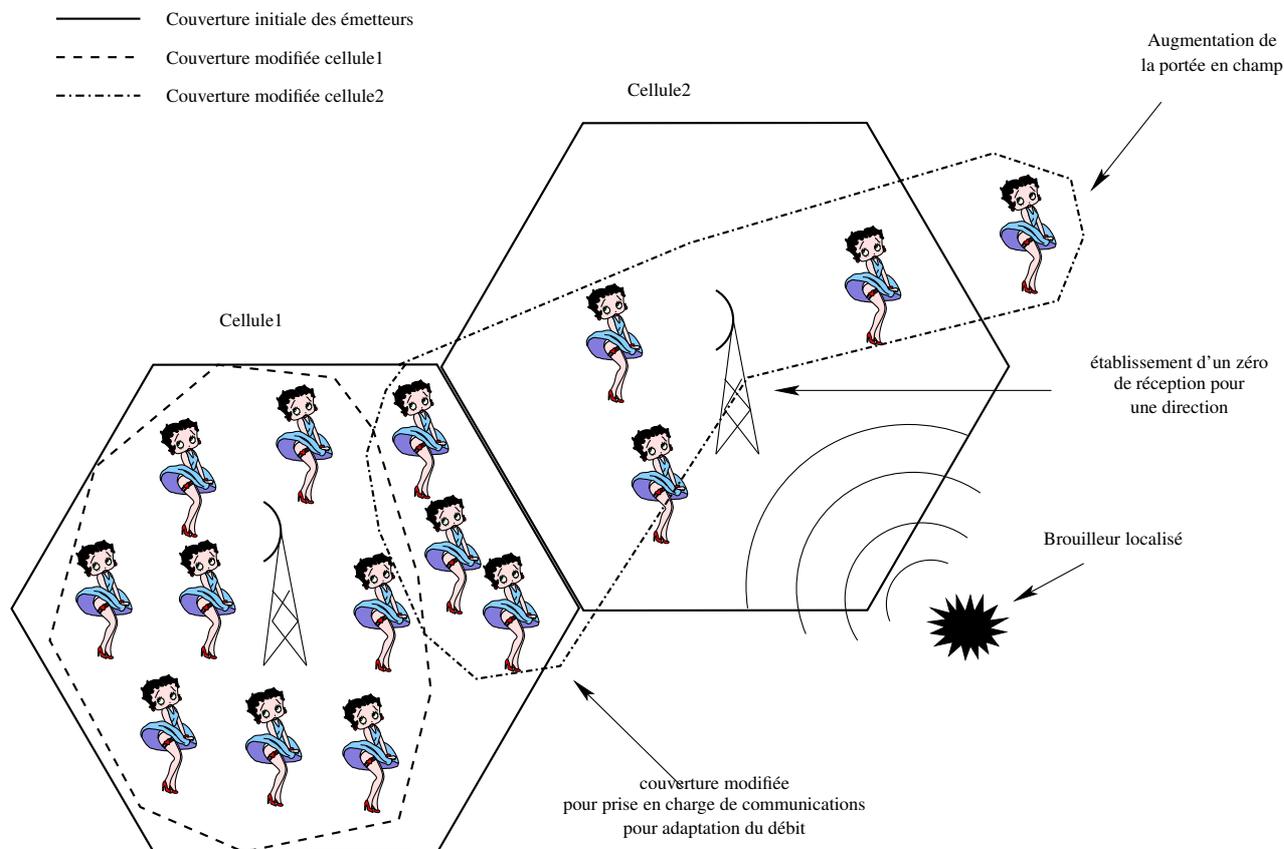


FIGURE 17 – Intérêts couverture adaptative.

Le fait d'émettre dans des directions privilégiées, donc de sectoriser l'espace du point de vue de l'émission peut permettre

la réutilisation d'une fréquence à tout instant dans plusieurs zones géographiques différentes mais proches. On réalise ainsi un multiplexage spatial par pavage spatial de la zone d'émission.

Le dernier intérêt des antennes adaptatives est leur possibilité de n'émettre que dans les directions utiles ce qui permet de réduire la puissance émise nécessaire aux systèmes de communications. Leur utilisation peut être une solution pour réduire les nuisances électromagnétiques.

### 3.7 Les système MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Les systèmes abordés jusqu'à présent sont des systèmes SISO (Single Input Single Output). Il n'y a qu'un système d'émission et un système de réception du point de vue des signaux. Sur les systèmes multi-antennes, seule une combinaison du même signal mais déphasé et d'amplitude modifiée est utilisée.

Pour les systèmes MIMO, il y a plusieurs émetteurs complets et plusieurs récepteurs complets permettant d'utiliser sur chaque antenne des signaux complètement distincts les uns des autres si on le désire (fig 18). Néanmoins l'objectif d'un système MIMO est d'émettre des signaux quelque part complémentaires, soit pour apporter de la redondance dans un milieu complexe (avec beaucoup de réflexions et de diffusion) très bruité, soit dans ces mêmes milieux lorsque, au contraire, le rapport signal sur bruit est important, d'offrir un réel multiplexage spatiale. Le multiplexage spatial correspond à l'établissement de liens de communication indépendants mais géographiquement au même endroit et en utilisant au même moment une bande spectrale identique.

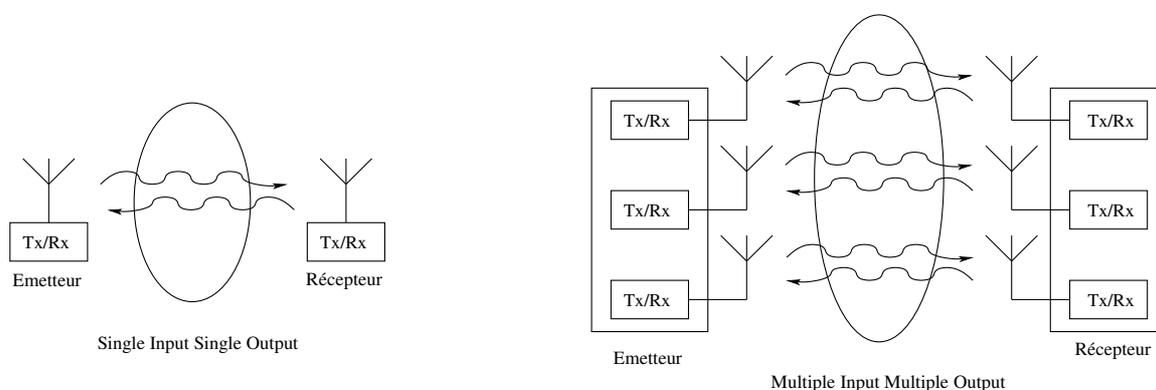


FIGURE 18 – Systèmes SISO et MIMO

#### 3.7.1 Diversité spatiale en MIMO

Considérons un système formé de deux antennes à l'émission et de deux antennes à la réception. Les antennes sont considérées comme proche l'une de l'autre. La redondance utile en milieux bruité est obtenue par l'utilisation de codes spatiaux-temporels. Il s'agit d'émettre au cours du temps les mêmes signaux successivement sur les deux antennes avec de légères transformations. Les codes les plus connus sont les codes Alamouti dont le code  $2 \times 2$  (12).

$$\begin{matrix} Slot_1 & Slot_2 & temps / antenne \\ \begin{bmatrix} S_1 & -S_2^* \\ S_2 & S_1^* \end{bmatrix} & & \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} \end{matrix} \quad (12)$$

Avec un tel code, si la capacité théorique maximal du canal SISO non bruité selon Shannon est  $c_0$ , alors pour le code Alamouti cette capacité reste la même  $c_{2 \times 2} = c_0$ . Par contre il a été démontré mathématiquement que pour les codes définissables pour des systèmes à 3 émetteurs et récepteurs ou plus, les capacités correspondantes décroissent :  $c_0 > c_{3 \times 3} > c_{4 \times 4} \dots$

D'un point de vue pratique, seuls les codes  $2 \times 2$  à  $4 \times 4$  sont utilisés. Pour des systèmes avec plus d'émetteurs récepteurs indépendants, la perte de débit maximal et la complexité de mise en œuvre sont trop importantes comparativement au gain en débit en milieu bruité obtenu par rapport à un système SISO.

#### 3.7.2 Multiplexage spatial en MIMO

Dans le cas d'un milieu fortement diffusant, ou présentant des réflexions multiples en très grand nombre, et peu bruité par ailleurs, alors il est mathématiquement possible de considéré le canal hertzien comme un canal de communication multiple permettant d'acheminer en parallèle plusieurs communications sur des systèmes dont les antennes que ce soit en émission ou en réception sont proches les unes des autres. Le nombre de canaux indépendants réalisables dépend du milieu et doit être déterminé à chaque fois.

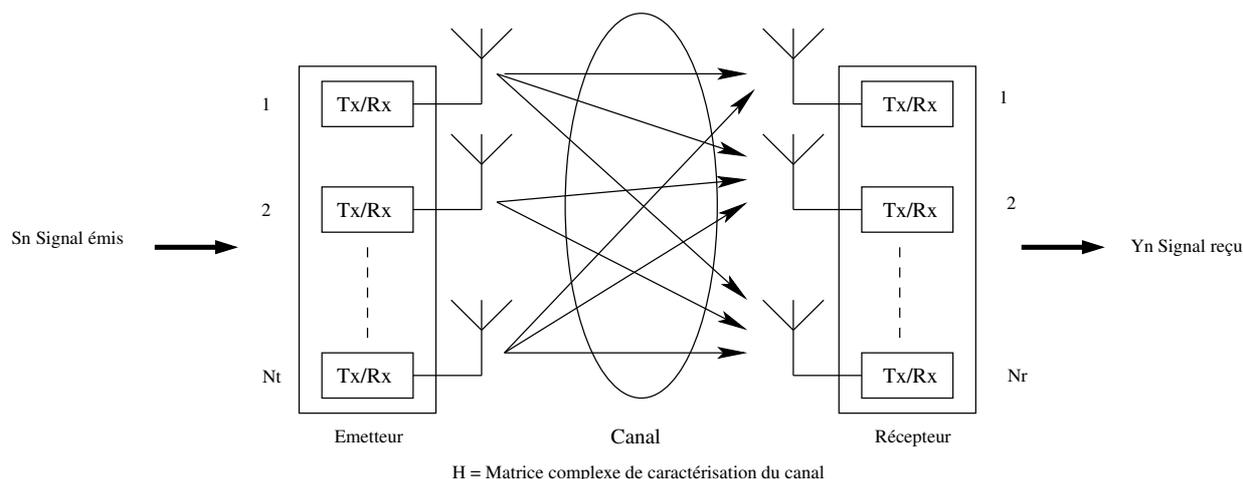


FIGURE 19 – Multiplexage spatiale en MIMO

Le canal de transmission est alors caractérisé par la matrice de probabilité complexe (déphasage + atténuation) reliant chaque antenne du système d'émission à chaque antenne du système de réception (fig 19). Dans le cas général, le nombre  $N_t$  d'antennes pour le système d'émission et le nombre  $N_r$  d'antennes pour le système de réception, utilisés pour le lien mono-directionnel décrit ici, sont différents. La matrice  $H$  est donc une matrice rectangulaire (eq. 13).

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & \cdots & \cdots & h_{1N_r} \\ h_{21} & h_{22} & \vdots & \ddots & \cdots & h_{2N_r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_t,1} & h_{N_t,2} & \cdots & \cdots & \cdots & h_{N_t,N_r} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Le canal est susceptible de varier au cours du temps et de façon général il est dispersif lorsqu'il y a des réflexions multiples. Il est important de retenir que la matrice  $H$  caractérisant le canal dépend donc du temps et de la fréquence. On doit ainsi considéré une matrice fonction du temps et de la fréquence  $H(t, f)$ .

On définit alors deux cas distincts :

1. Le canal bande étroite qui correspond à l'échange d'un signal bande étroite en fréquence.

Si le signal est à bande étroite, alors il est légitime de faire l'approximation que le signal est mono-fréquentiel à la fréquence de la porteuse et on peut simplifier l'écriture du canal :  $H(t, f) = H(t)$ . On peut ainsi déduire le signal reçu du signal émis dans le domaine temporel :

$$y(t) = H(t) * s(t) + n(t) \quad (14)$$

Dans cette équation  $s(t)$  est le signal émis,  $n(t)$  le bruit additif du canal et  $y(t)$  le signal reçu après reconstruction sur l'ensemble des antennes.  $y$ ,  $s$  et  $n$  sont des vecteurs.

$$y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{N_r} \end{bmatrix} \quad s = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \vdots \\ s_{N_t} \end{bmatrix} \quad n = \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \\ \vdots \\ n_{N_r} \end{bmatrix} \quad (15)$$

2. Le canal large bande qui correspond à l'échange d'un signal large bande

Dans le cas d'un signal large bande, la simplification précédente n'a plus de sens et le signal reçu peut être obtenu du signal émis de 2 façons.

- En passant dans le domaine spectral.

$$Y(t, f) = H(t, f) \cdot S(t, f) + N(t, f) \quad (16)$$

Dans cette équation  $H(t, f)$  représente la fonction de transfert du canal et  $Y$ ,  $S$  et  $N$  sont les transformées de Fourier des signaux temporels  $y$ ,  $s$  et  $n$  ( $Y = TF(y)$ ,  $S = TF(s)$ ,  $N = TF(n)$ ).

- En utilisant la réponse impulsionnelle du canal  $h(t, \tau)$

On utilise alors la caractérisation du canal dans le temps et en délai de propagation.

$$y(t) = \sum_{i=0}^{N_{\text{symbole}}} h(t, \tau_i) s(\tau_i) + n(t) \quad (17)$$

Pour définir le nombre de canaux théoriquement indépendants dans ce canal MIMO multi-réflexif, il faut réaliser la décomposition en valeurs propres de la matrice de la covariance du canal  $R$ .

$$R = H.H^H \quad (18)$$

Dans l'équation 18,  $H^H$  est la transposée hermitienne (transposée et conjuguée) de  $H$ . Si  $v$  est le vecteur propre associé à la valeur propre  $\lambda$ , alors on rappelle qu'on peut écrire  $Rv = \lambda v$ . Si on peut déterminer  $M$  valeurs propres distinctes avec leurs vecteurs propres associés, alors on peut définir  $M$  canaux indépendants de communication dans ce milieu qui utilise la propagation libre d'une onde hertzienne. Dans le cas général, compte tenu du caractère triangulaire de la matrice et du milieu quelconque  $M \neq N_t \neq N_r$ .

Quand on parle de multiplexage, on sous-entend une utilisation optimale du débit théorique du canal. Il est ainsi intéressant de définir la capacité binaire d'un canal MIMO par rapport à un canal simple (SISO) telle que la définit Shannon (eq.19).

$$C_{\text{Shannon}} = W \log_2 \left( 1 + \frac{S_0}{W.N_0} \right) \text{ en bit.s}^{-1} \quad (19)$$

Si on normalise cette capacité par rapport à une largeur spectrale de 1Hz pour le canal, on peut la réécrire sans le terme  $W$ . Elle s'exprime alors en bits/sec/Hz. On rappelle que  $\frac{S_0}{N_0} = \text{SNR}$  représente le rapport signal sur bruit au niveau du récepteur.

$$C_{\text{SISO}} = \log_2 \left( 1 + \frac{S_0}{N_0} \right) \text{ en bit.s}^{-1}.\text{Hz}^{-1} \quad (20)$$

Pour un canal MIMO, on obtient une relation analogue mais matricielle (eq. 21).

$$C_{\text{MIMO}} = \log_2 |I_{N_r} + H.Q.H^H| \text{ en bit.s}^{-1}.\text{Hz}^{-1} \quad (21)$$

Dans cette relation  $I_{N_r}$  représente la matrice identité de dimension  $N_r$ . Ainsi, plus le nombre de récepteurs augmente, plus la capacité augmente. Ceci se comprend aisément car plus de puissance est captée et de la redondance spatiale est ajoutée en réception.  $H$  représente la matrice caractérisant le canal. Enfin  $Q$  est la matrice covariante du signal transmis (avec normalisation), ainsi  $\text{tr}(Q) = \sum_{i=1} Q_{ii} = \text{SNR}$  (on travaille avec la même puissance utile dans les deux cas).

1. Dans le cas général on ne peut rien dire sur la capacité ainsi obtenue par rapport à un canal SISO. Il faut ainsi d'abord caractériser le canal. Néanmoins, 2 cas particuliers sont simples à envisager :

(a) L'émetteur ne connaît rien du canal et émet ainsi un signal identique sur l'ensemble des antennes d'émission. Il n'exploite pas les caractéristiques du canal. La matrice  $Q$  est simple ( $Q = \frac{\text{SNR}}{N_t}$ ) et la capacité du canal s'écrit simplement (eq. 22)

$$C_{\text{MIMO}} = \log_2 \left[ \det \left( I_{N_r} + \frac{\text{SNR}}{N_t} H.H^H \right) \right] \quad (22)$$

(b) Au contraire, le canal est parfaitement connu de l'émetteur et la puissance est répartie sur les antennes d'émission selon les vecteurs propres de la matrice  $R$  du canal. La puissance est répartie selon les canaux indépendants (eq. 23).

$$C_{\text{MIMO}} = \sum_{i=1}^{\min(N_t, N_r)} \log_2 \left( 1 + \frac{\text{SNR}}{N_t} \lambda_i \right) \quad (23)$$

2. De façon plus générale, dans le cas d'un lien MIMO, dans un canal **sans mémoire** à bruit blanc additif gaussien, on peut caractériser la capacité du canal dans le cadre d'un "fading" de Rayleigh (Il s'agit d'un modèle d'évanouissement du signal par les trajets multiples utilisé notamment pour l'exploitation des réseaux de téléphonie mobile type GSM en milieu urbain).

(a)  $\left( \begin{array}{l} N_t \text{ grand} \\ N_r \text{ fixé} \end{array} \right)$ , alors on peut montrer que  $\lim_{N_t \rightarrow \infty} (C_{\text{MIMO}}) = N_r \cdot \log_2(1 + \text{SNR})$

(b)  $\left( \begin{array}{l} N_t = 1 \\ N_r \text{ grand} \end{array} \right)$ ,  $C_{\text{MIMO}}$  est asymptotique à  $\log_2(1 + \text{SNR} \cdot N_r)$

(c)  $\left( \begin{array}{l} N_t \text{ grand} \\ N_r = 1 \end{array} \right)$ ,  $C_{\text{MIMO}}$  est asymptotique à  $\log_2(1 + \text{SNR})$

(d)  $M = N_t = N_r = n$ ,  $C$  varie linéairement avec  $n$  le nombre de canaux indépendants du canal  $C_{\text{MIMO}} = n \cdot \log_2(1 + \frac{\text{SNR}}{n})$ .

Il est important de noter qu'augmenter le nombre d'antennes en réception est toujours plus intéressant qu'augmenter le nombre d'antennes en émission dans un canal bruité (comparaison cas 2 et 3).

## 4 Quelques notions de codage vidéo - Codage MPEG-2

Le codage vidéo actuel le plus répandu est le codage MPEG-2 utilisé par exemple pour la TNT basse définition ou les DVDs commerciaux. Le principe général du codage MPEG-2 est d'utiliser 2 niveaux de codage :

1. Le codage intra qui utilise la redondance spatiale dans une image
2. Le codage inter qui lui utilise la redondance temporelle pour une séquence vidéo.

Nous allons expliciter succinctement ces 2 codages puis nous présenterons également la structure d'un flux vidéo MPEG.

### 4.1 Le codage Intra

Le codage intra consiste à coder une image complète dite de référence en utilisant la redondance spatiale propre à cette image. Le codage de l'image seule est un codage de type JPEG (établi en 1992).

La figure 20 présente le codage JPEG d'une image en couleur.

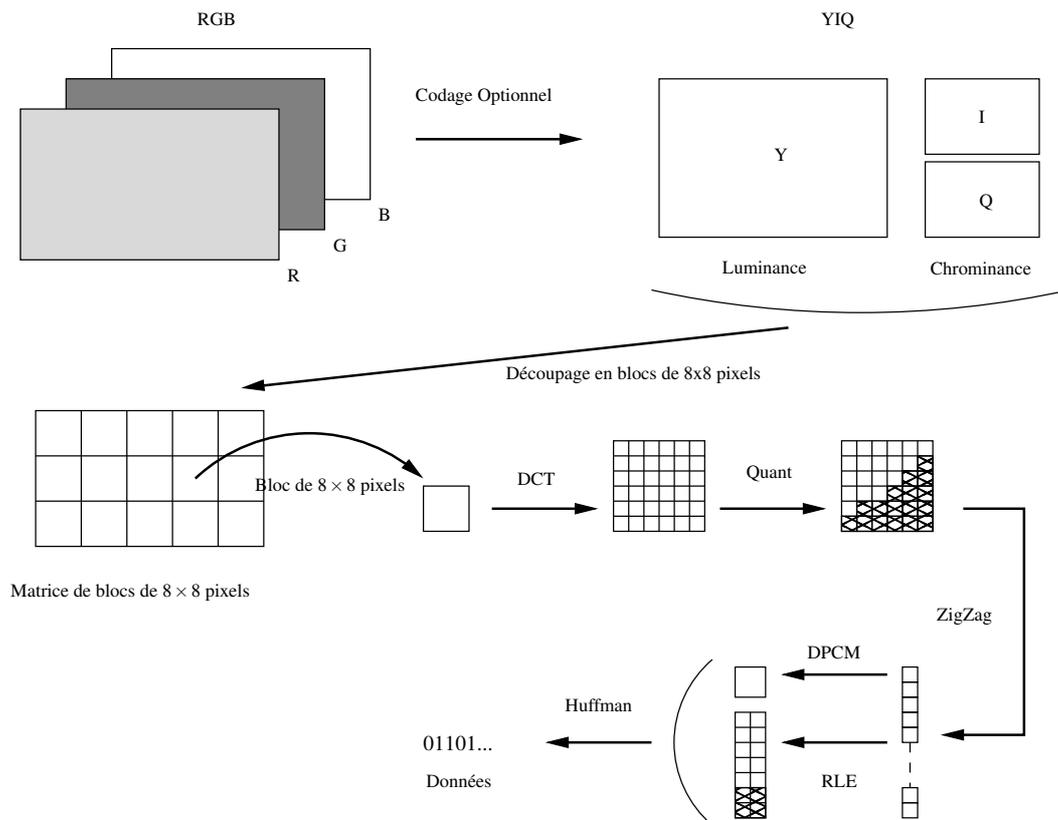


FIGURE 20 – Codage Mpeg2 intra

Ce codage comporte en fait 7 grandes étapes.

1. Pour une image d'une séquence vidéo, l'image définie par ces plans Rouge (R), Vert (G) et Bleu (B) est transcodée en trois plan : un plan Y (Luminance) et deux plans I et Q (Chrominance). L'œil humain est en effet plus sensible à la différence de luminosité qu'à la différence de couleur. On code donc plus finement la luminance que la chrominance. Ce codage est néanmoins facultatif pour une image standard.
2. Chaque plan RGB ou YIQ est découpé en blocs élémentaires de  $8 \times 8$  pixels.
3. Chaque bloc de  $8 \times 8$  pixels est étudié dans le plan des fréquences spatiales par une transformée en cosinus discrets (DCT = Discret Cosinus Transform).

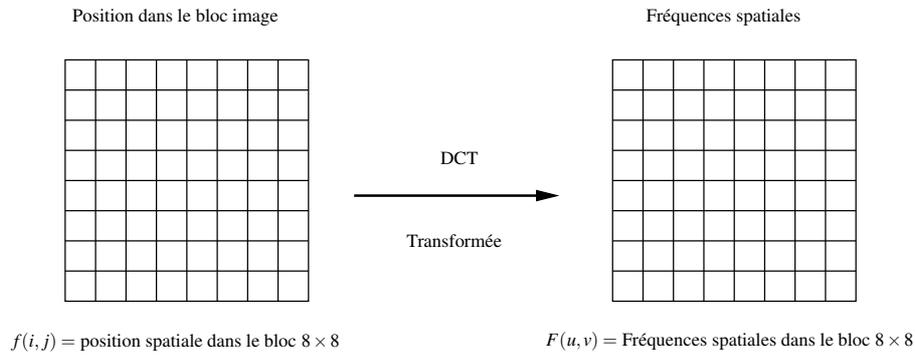


FIGURE 21 – Transformée en Cosinus Discret (DCT)

La transformée en cosinus discrets est donné par l'équation 24.

$$F(u, v) = \frac{1}{4} \sum_{i,j} \Lambda(u) \Lambda(v) \cos\left(\frac{(2i+1)u\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2j+1)v\pi}{16}\right) f(i, j) \quad (24)$$

avec

$$\Lambda(\zeta) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{pour } \zeta = 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour la DCT,  $F(0,0)$  correspond à la composante continue et  $F(i, j)$  pour  $i$  ou  $j \neq 0$  donne les composantes alternatives. Plus  $(i, j)$  augmentent et plus le terme associé correspond à des fréquences hautes.

4. La quantification (Quant) est l'opération qui à une grandeur physique associe un code binaire équivalent à son niveau pour une plage de mesure définie. Cette plage de mesure dépend du nombre de bits de quantification donc de codage. Pour le JPEG, la quantification n'est pas faite avec un pas uniforme. Les basses fréquences mieux perçues par l'œil humain sont quantifiées avec un pas fin alors que plus les fréquences augmentent moins il y a de niveaux différents. Il y a donc compression par limitation du nombre de niveaux. Plus les fréquences sont élevées et plus en moyenne le coefficient correspondant est faible en pratique. Un effet de seuillage est ainsi appliqué à l'ensemble des éléments du tableau. Tous les coefficients inférieurs à ce seuil sont mis à zéro.
5. Le nouveau tableau résultant de la quantification amplifie l'importance des basses fréquences. Pour en tenir compte, le tableau est lu en ZigZag. Les coefficients sont lus dans l'ordre  $F(0,0)$ ,  $F(1,0)$ ,  $F(0,1)$ ,  $F(0,2)$ ,  $F(1,2)$ ,  $F(2,0)$ ,  $F(3,0)$ ,  $F(3,1)$ ... Les coefficients sont donc rangés bout à bout en allant des coefficients de plus basses fréquences vers les coefficients de plus hautes fréquences. Cet arrangement des coefficients conduit à une série comportant de plus en plus de zéros au fur et à mesure qu'on avance dans les fréquences élevées.
6. L'ensemble des coefficients est alors codés avec compression. Le coefficient  $F(0,0)$  correspondant au continu du bloc de  $8 \times 8$  pixel en cours de traitement est codé en DPCM (Differential Pulse Code Modulation) par rapport au coefficient  $F(0,0)$  du bloc précédent. Bien sûr, il est indispensable de coder la première valeur complètement. Les autres coefficients de la DCT sont codés en utilisant un code RLE (Run Length Encode). Plusieurs coefficient étant nuls au bout d'un moment dans le tableau, on code le nombre de zéros : exemple 128009000100004... devient (01)(02)(08)(29)(31)(44)... Plus il y a de zéros dans la suite à coder et plus ce codage est efficace, d'où l'intérêt du seuillage précédent.
7. Enfin l'ensemble des valeurs obtenues est codé finalement en utilisant un codage variable en longueur de Huffman (Variable Length Code) sans perte d'information. On obtient ainsi les données binaires à transporter pour une image de référence.

Le codage VLC construit un alphabet des codes successifs envoyées :

- si à l'instant  $t$  la suite de données binaires est nouvelle, elle est enregistrée comme nouveau mot (18 bits) du dictionnaire (donc avec une adresse)
- Si au contraire à l'instant  $t$  la suite de données binaires est déjà connue alors seule l'adresse du mot correspondant dans le dictionnaire est envoyé, ce qui conduit à envoyer moins de bits mais sans pertes d'information.

Pour finir, la figure 22 donne l'organisation des données d'un flux JPEG.

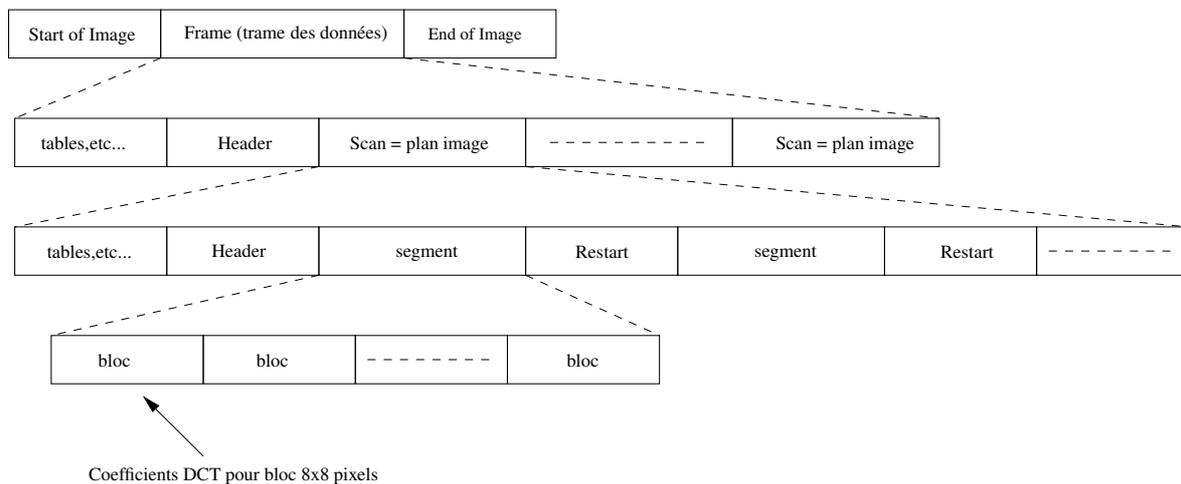


FIGURE 22 – Flux JPEG

## 4.2 Le codage Inter

Le codage inter consiste à coder une image en utilisant la redondance présente entre les images entrelacées successives au cours du temps. Il s'agit cette fois d'exploiter la redondance temporelle sur les images codées !!!

- Le codage en mode trame tient compte de l'entrelacement des images pour la vidéo. Ceci est plus efficace s'il y a du mouvement dans la séquence vidéo.
- Le principe est d'estimer les mouvements dans l'image traitée par rapport à l'image d'avant ou d'après codée. Cette estimation se fait uniquement sur des macro-blocs (ensemble de plusieurs bloc de  $8 \times 8$  pixels et uniquement en considérant des mouvements de translation.
- Le flux MPEG2 définit ainsi trois types d'images : I, P ou B.
  - I = Intra picture (or image). Il s'agit d'une image de référence qui se suffit à elle-même.
  - P = Predictive picture. Il s'agit d'une image reconstruite par rapport à une image I ou P précédente dans la séquence.
  - B = Bi-directionally predictive picture. Il s'agit cette fois d'une image reconstruite par rapport à une image I ou P précédente et/ou suivante dans la séquence.
- La prédiction bi-directionnelle impose un ré-ordonnement de la séquence d'envoi des images. Le décodeur doit nécessairement contenir de la mémoire.
- Le codage final de Huffman conduit à un débit variable en sortie du codeur. Il est nécessaire d'implanter un tampon pour réguler le débit pour le média de transport.

**NB :** Le codage MPEG-4 (équivalent au Divx) utilise un codage inter analogue sur les images. Par contre le codage intra est différent en ce sens que le codage MPEG-4 utilise la notion d'objets et de plans superposés. L'image est structurée, ce qui conduit à un codage plus ou moins vectoriel des objets de l'image. Grossièrement, un bateau naviguant sur l'eau sera décrit comme un fond d'image fixe (l'eau) avec l'objet "bateau" se déplaçant dessus.

## 5 Télécommunications privées (DECT, ADSL + Fibre Optique maintenant)

### 1. Voix

Il s'agit souvent du couplage de la téléphonie sans fils numérique d'intérieure de type DECT (mobilité partielle) avec la voix sur IP sur une technologie de type ADSL (faible coût).

### 2. Données

Pour la plupart des utilisateurs finaux, la technologie de type ADSL est utilisée chez eux pour la connexion au réseau mondial. La technologie émergente concurrente sur courant porteur ("plugs") est envisageable mais pour l'instant pour un coût plus élevé. Les autres technologies de desserte de la boucle locale (WIMAX, WIFI en extérieur, liaisons satellites) ne sont pas encore concurrentielles en terme de coût sauf dans les zones où l'ADSL est non disponible.

Toutes ces technologies définissent des couches physiques (supports de communications différents) mais aboutissent toutes au transport de type TCP/IP ou UDP/IP classique sur les réseaux Ethernet câblés standards. Les recherches portent actuellement sur des formats de compression plus performants pour limiter le débit demandé par les applications au niveau utilisateur (vidéo mpeg2 ou 4), musique (mp3)...

Les liaisons par fibre optique sont en plein essor poussée par les besoin en haut débit de données. Ces connexion utilisent une modulation par impulsion tout ou rien d'une porteuse aux fréquences lumineuses (rouge, bleu...) 23. La modulation peut se faire par exemple sur la durée des impulsions ou bien sur l'écart temporel entre deux impulsions de longueur donnée.

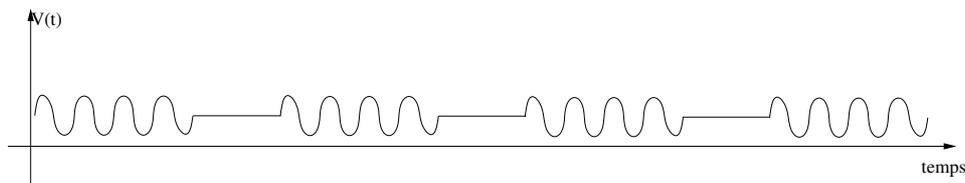


FIGURE 23 – impulsion dans fibre optique

## 5.1 Présentation succincte de la norme DECT

Les téléphones sans fil que l'on peut acheter pour un usage domestique sont maintenant tous des systèmes numériques à la norme DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications). Cette norme initialement européenne a été adoptée dans le monde entier. Pour les systèmes grand public un système DECT est composé d'une base et de 1 à 5 mobiles.

L'utilisation d'une transmission numérique de la voix a permis d'améliorer considérablement la qualité "sonore" des téléphones sans fil, et d'assurer la confidentialité par l'intermédiaire d'un système de cryptage des données.

Pour fonctionner ensemble, une base et les combinés disponibles doivent s'identifier. Les mobiles doivent reconnaître la base et être inscrits comme mobiles acceptés par celle-ci. Cet échange d'information se fait au travers de données dites de réseau échangées entre la base et les mobiles.

Dans un système DECT, une base est susceptible d'assurer une liaison téléphonique classique vers le réseau commuté de l'opérateur auprès duquel l'utilisateur a son abonnement mais aussi une communication interne entre deux mobiles. Elle doit également pouvoir détecter la mise en marche d'un combiné supplémentaire le cas échéant.

Pour assurer un tel nombre de communications simultanées et ce, en présence éventuellement d'autres bases DECT à proximité, la norme DECT fait appel simultanément au multiplexage fréquentiel (FDMA pour Frequency Division Multiple Access) et temporel (TDMA pour Time Division Multiple Access).

TABLE 1 – Liste des fréquences porteuses DECT

N° de porteuse	fréquence centrale
0	1,897344 GHz
1	1,895616 GHz
2	1,893888 GHz
3	1,892160 GHz
4	1,890432 GHz
5	1,888704 GHz
6	1,886976 GHz
7	1,885248 GHz
8	1,883520 GHz
9	1,881792 GHz

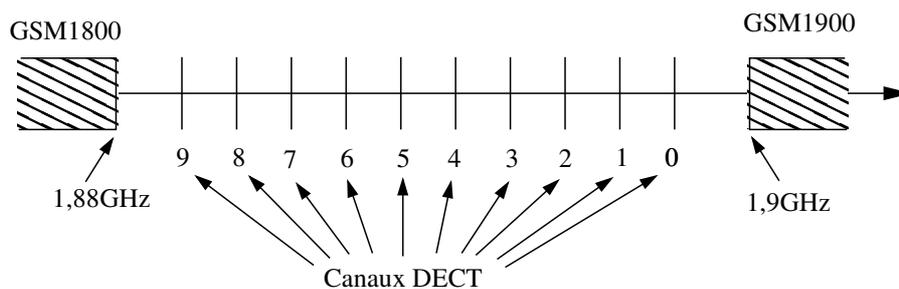


FIGURE 24 – Bande spectrale DECT

### 5.1.1 Multiplexage fréquentiel

En premier lieu, il est important de bien comprendre que pour véhiculer plusieurs conversations téléphoniques distinctes dans l'air, l'information vocale initiale de chacune des conversations dont le spectre s'étend d'environ 0Hz à 30kHz, doit être translatée sur des gammes de fréquences différentes. Ceci permet de dissocier les communications les unes des autres. L'information utile module ainsi une fréquence porteuse pour chaque communication.

La bande des fréquences disponibles pour la norme DECT s'étend de 1,88 à 1,9GHz. Cette étendue fréquentielle de 20 MHz est partagée en 10 porteuses différentes espacées de 1,728MHz et numérotées de 0 à 9 (tab. 1). Les fréquences porteuses laissent apparaître une zone du spectre non utilisée aux extrémités de la bande : il s'agit de zones de garde pour limiter les interférences avec d'autres systèmes hyperfréquences tel que le DCS1800 qui utilise des fréquences jusqu'à 1,88GHz.

Sans autre traitement, il n'est ainsi possible de véhiculer que 10 conversations distinctes dans un seul sens (mode simplex).

### 5.1.2 Multiplexage temporel

Avec le seul multiplexage fréquentiel précédent, il n'est pas possible de véhiculer plus de 10 communications mono-directionnelles (ou 5 bidirectionnelles) simultanément. Ceci est très limitant pour un système amené à être déployé à grande échelle. Ainsi dans un appartement avec 4 voisins possédant chacun un système DECT avec 1 base et 2 terminaux mobiles il y aurait déjà saturation.

Pour multiplier les possibilités de communications, les données à émettre sont découpées en paquets qui sont envoyés successivement de façon non continue mais à intervalles de temps fixes. Le temps libre entre 2 émissions successives est alors affecté à une autre liaison. La ressource partagée est alors le temps. Ceci constitue le multiplexage temporel.

Dans le système DECT qui utilise les deux types de multiplexage simultanément, un canal de communication est alors défini par un couple de valeur : fréquence porteuse / numéro de l'intervalle temporel utilisé. Dans la norme DECT on parle ainsi de trafic carrier (fréquence) et trafic slot (temps).

Pour assurer des communications en mode bidirectionnel simultanément la norme DECT définit une structure temporelle par trame de  $T_{trame} = 10ms$ . Dans la norme DECT, la trame de 10ms est partagée en 24 intervalles temporels identiques ou "slots" de  $\frac{10}{24}ms = 416,67\mu s$ . Les 12 premiers intervalles (5ms) sont affectés aux liaisons base vers mobiles, et les 12 suivants pour les liaisons mobiles vers base. Le mode bi-directionnel de la liaison est réalisé dans la norme DECT par partage du temps (comme pour un talkie-walkie). Le rythme est alterné toutes les 5ms pour les liaisons de la base vers les mobiles puis des mobiles vers la base. Pendant chaque "slot", soit un mobile, soit la base émet un signal modulé transportant 420 bits avec un débit binaire de  $D_{bits} = 1,152.10^6 bits/s$ , soit pendant un temps d'environ 365μs (eq. 25). On parle de "burst" en émission.

$$\frac{N_{bit-slot}}{D_{bits}} = \frac{N_{bit-slot}}{N_{bit-trame}} T_{trame} = \frac{420}{1,152.10^6} \simeq 365\mu s \quad (25)$$

La trame qui module la porteuse contient des informations de synchronisation fixes, des informations réseau (notamment l'identification) en nombre réduit et relativement constantes et les données utiles, c'est à dire les bits codant numériquement la voix avec d'éventuelles redondances sous forme de codes correcteurs d'erreurs (bits supplémentaires). La trame modulante est ainsi constituée de trois parties successives.

## 6 - Télécommunications publiques

Télécommunication filaire (RTC, RNIS...)

Télécommunication sans fil (GSM →UMTS)

### 1. Communication voix :

Saturation des réseaux GSM → nouveau standard UMTS → LTE (Long Terme Evolution = 4ème Génération)

Optimisation et limitation de la puissance émise par le réseau et les mobiles → mise en œuvre de nouvelles technologies.

→ nouveau standard UMTS et LTE.

### 2. Communication données

Si l'application principale actuelle est la fonction téléphonie mobile type GSM (la plus répandue), soit le transport de la voix sous forme numérique ; l'envoi de SMS ou MMS (données) en grand nombre impose le développement du transport de données.

Le besoin d'accès à INTERNET avec la mobilité totale est un enjeu majeur pour les futures normes de téléphonie mobile. L'échec commercial relatif du WAP sur GSM standard, montre la nécessité d'un débit plus important en mode donnée pour ce type d'utilisation d'un terminal mobile smart-phone (téléphone intelligent).

Pour répondre à ces besoins, plusieurs étapes :

- (a) Amélioration de la norme GSM pour le transport de données avec un fonctionnement en mode paquets en plus du mode connecté pour la voix (GPRS).

- (b) Modification de la modulation du GSM pour augmenter la capacité en mode paquet (EDGE).
- (c) Développement d'une nouvelle norme conçue dès le départ pour la double utilisation voix/données avec des débits élevés (de l'ordre de 100 koctets/s).

—> nouveau standard UMTS

## 6.1 Présentation succincte de la norme GSM

Si vous possédez un téléphone portable avec lequel vous discutez ou envoyez des SMS pratiquement n'importe où en France, vous êtes un utilisateur des services de communication mobile type GSM (Global System Mobile). Cette norme établie initialement par l'Europe dans les années 1990 est maintenant majoritaire au niveau mondial. De nos jours le terme GSM est devenu générique et ne recouvre pas une norme mais des normes qui ont pris les noms de GSM 2G, 2.5G, 3G, 3G+ et maintenant 4G.

Le GSM désigne une norme de téléphonie mobile numérique. Pour la version 2G du GSM, La parole est numérisée au niveau du mobile puis codée sous forme de données binaires qui sont ensuite utilisées pour moduler une porteuse radiofréquence en utilisant une modulation de type GMSK. La modulation est ainsi une modulation à 2 états de fréquences avec un indice de modulation  $m_f = \frac{1}{2}$ , avec continuité de la phase (on parle de modulation CPFSK= Continuous Phase Frequency Shift Keying). En fin de traitement des données de modulation, un filtrage en bande de base utilisant un filtre gaussien de bande passante définie par un  $BT$  de 0.3 est appliqué pour diminuer l'encombrement spectrale sans altérer les temps de propagation des symboles. C'est une normalisation de la bande passante du filtre à 3dB ( $B$ ) par rapport au temps symbole  $T$ . L'utilisation d'une transmission numérique de la voix permet d'améliorer considérablement la qualité "sonore" des téléphones sans fil, et d'assurer la confidentialité par l'intermédiaire d'un système de cryptage des données.

Ce système de téléphonie repose sur un découpage cellulaire de l'espace. Chaque cellule permet l'interaction entre une station de base du réseau déployé par chaque opérateur et les mobiles des utilisateurs présents dans la zone géographique concernée. Les liaisons établies utilisent une transmission par voie hertzienne. Chaque téléphone mobile de type GSM intègre en son sein un module d'identification : la carte SIM.

Pour établir une communication entre le mobile et le testeur il y a trois étapes importantes :

1. Le mobile identifie les réseaux présents. Pour chaque réseau (chaque opérateur), les stations de bases émettent un signal radiofréquence avec un identifiant réseau particulier qui permet de les différencier. Cette émission se fait via le canal de contrôle (Control Channel).
2. Le mobile s'inscrit sur le réseau souhaité pour se faire connaître et il y a alors vérification de ses droits d'usage. S'il est accepté, il se voit attribuer un numéro de canal fréquentiel à utiliser pour les échanges ultérieurs (Traffic Channel).
3. Soit à partir de la station de base, soit à l'initiative du mobile, un lien radio-fréquence est demandé pour établir une communication vocale.

Tout au long du processus et même pendant la durée d'une communication, des informations dites "réseau" sont échangées entre les mobiles et les stations de base.

Pour assurer un grand nombre de communications simultanées et ce, en présence éventuellement d'autres signaux de BTS (Base Transceiver Station= station de transmission de base) à proximité, la norme GSM fait appel simultanément au multiplexage fréquentiel (FDMA pour Frequency Division Multiple Access) et temporel (TDMA pour Time Division Multiple Access), et à la notion de plan de fréquences. Les fréquences de travail sont différentes d'une cellule à ses voisines.

### 6.1.1 Multiplexage spatial et fréquentiel

Pour réaliser un découpage cellulaire de l'espace, le réseau GSM définit la notion de cellule. Il s'agit de la zone couverte par le champ électromagnétique émis par une station de base (BTS). La taille des cellules est fixée par 2 paramètres que sont la sensibilité des mobiles en réception (seuil de puissance en dessous duquel un mobile ne reconnaît plus le signal par rapport au bruit) et la puissance d'émission du mobile qui conditionne la distance d'éloignement maximale entre la base et le mobile. Si un mobile émet peu alors la distance maximale entre la base et le mobile sera faible. La base, dont la sensibilité est également finie, va effectivement perdre assez rapidement le signal. La puissance captée par une antenne diminue en effet très vite avec la distance.

Pour le GSM, un mobile est pris en charge par une seule cellule au sein du réseau d'un opérateur. Pour permettre un déplacement du mobile en cours de conversation, il faut que les cellules adjacentes se recouvrent partiellement. Pour éliminer les risques de brouillage entre les cellules adjacentes, il est alors nécessaire d'utiliser des fréquences porteuses différentes au sein de chaque cellule. Le plan de fréquence est ainsi une planification au niveau de l'ensemble des cellules d'un opérateur des fréquences attribuées à chaque cellule. Bien sûr, des cellules suffisamment éloignées peuvent utiliser les mêmes fréquences. Les niveaux de puissances reçus par un mobile seront dans ce cas suffisamment distincts (un fort souhaité et un faible parasite) pour que le recouvrement ne perturbe pas l'analyse du signal recherché. Ce découpage en cellule correspond donc à une sorte de multiplexage spatial.

Au sein de chaque cellule pour qu'il puisse y avoir plusieurs communications simultanément, il y a plusieurs porteuses radiofréquences disponibles. C'est le multiplexage fréquentiel (Fig. 25).

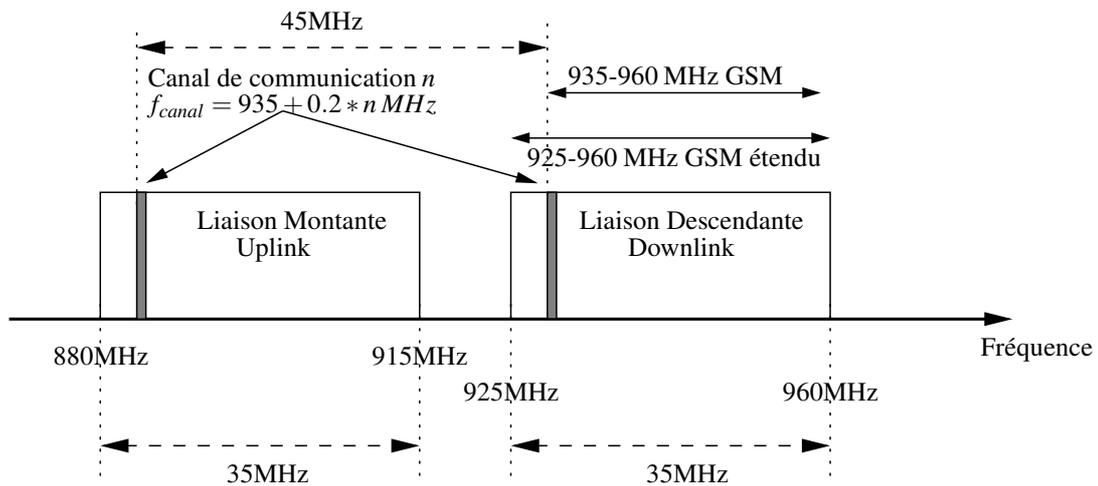


FIGURE 25 – Bandes spectrales GSM

### 6.1.2 Multiplexage temporel

Les multiplexages fréquentiel et spatial précédents ne sont pas suffisants pour assurer un nombre de communication élevé au sein d'une même cellule. La norme GSM définit dans chaque sens de la communication une bande spectrale de 35MHz de large. Chaque canal fréquentiel est délimité par une largeur spectrale de 200kHz. Dans une cellule, il y a donc théoriquement 174 canaux utilisables compte tenu de la zone de garde fréquentielle à chaque extrémité de la bande spectrale allouée au GSM. Compte tenu du nombre d'opérateur, ce nombre est à diviser 4.

La modulation GSM impose un signal modulant dont le spectre est trop large par rapport à la largeur de chaque canal. Le signal du canal de communication  $n$  déborde sur les canaux adjacents  $n$  et  $n + 1$ . Seul un canal sur deux est ainsi utilisable.

Enfin en prenant un modèle simple d'un pavage de l'espace avec des cellules hexagonales, chaque cellule possède 6 voisines proches qui ne doivent pas utiliser les mêmes fréquences porteuses pour éviter les interférences destructives ou du brouillage au niveau du champ électromagnétique reçu par les antennes. Le nombre de canal est encore à diviser par environ 4.

Au final, seuls environ 7 canaux fréquents sont disponibles simultanément par opérateur et par cellule, ce qui est trop faible pour répondre au besoin en communications simultanées des clients. Ceci a d'ailleurs conduit à une saturation rapide des réseaux avant le développement du DCS1800.

Le DCS1800 est une transposition du GSM vers des fréquences de 1,8GHz avec une bande spectrale dédiée plus importante et une puissance utile plus faible pour diminuer la taille des cellules et ainsi densifier le réseau. Par contre tant pour la modulation, que les divers codages et le cadencement temporel, la norme GSM et la norme DCS1800 sont identiques. Seule la partie hyperfréquence des modules émetteur/récepteur HF des téléphones sont à modifier entre les deux systèmes. Il est ainsi assez aisé de concevoir des téléphones compatibles avec les 2 normes. Tous les téléphones modernes en France sont ainsi bi-bande.

Mais avant même l'apparition du DCS1800, la norme GSM a introduit le multiplexage temporel pour augmenter le nombre de canaux de communications simultanés. Pour multiplier les possibilités de communications, les données à émettre sont découpées en paquets qui sont envoyés successivement de façon non continue mais à intervalles de temps fixes. Le temps libre entre 2 émissions successives pour une liaison est alors affecté à une autre liaison.

Dans le système GSM qui utilise les deux types de multiplexage fréquentiel et temporel simultanément, un canal de communication est défini par un couple de valeur : fréquence porteuse / numéro de l'intervalle temporel utilisé. Pour le temps, on parle de numéro de "time slot" (intervalle temporel d'émission) et il y en a 8 (0 à 7) de définis pour le GSM. Chaque "time slot" dure  $577\mu s$ . La structure périodique (ou trame) du GSM est ainsi de 8 "time slot" soit  $4,6ms$ . Dans la norme GSM, il y a en plus un décalage temporel fixe de 3 "time slot" entre l'émission et la réception par le mobile. Il en est de même pour la base. Ceci laisse du temps à l'électronique pour changer de gamme de fréquences entre la voie montante et la voie descendante.

Pendant chaque "slot" (ou "burst"), soit le mobile, soit la base émet un signal modulé transportant  $156\text{ bits}$  pendant un temps de  $577\mu s$  soit avec un débit binaire de  $D_{bits} \approx 270.10^3 \text{ bits/s} = 270\text{ kbits/s}$  (eq. 26).

$$\frac{N_{bit-slot}}{D_{bits}} = \frac{N_{bit-slot}}{N_{bit-trame}} T_{trame} = \frac{156}{270.10^3} \approx 577\mu s \quad (26)$$

Le temps d'inter-burst dans une communication correspond normalement au temps de trame. La trame est une macro-structure au dessus du "time slot" qui rythme l'alternance des différentes liaisons et des différents type de "burst" échangés entre les mobiles et la BTS au cours des communications et des déplacements pour assurer le transport des données vocales mais aussi de certaines données réseau.

**(présentation des grandes lignes de l'UMTS)**

## 7 Le "tout communiquant" (Wifi et Bluetooth)

### 7.1 Systèmes permettant la mobilité avec haut débit —> WIFI

#### 7.1.1 présentation générale de WIFI

L'appellation WIFI (WIREless FIDelity) recouvre en fait les standards 802.11a (à 5GHz), 802.11b et 802.11g (à 2,4GHz), et la norme plus récente 802.11n qui reprend les 2 plages de fréquences avec des considérations MIMO et du cryptage et de la sécurisation plus robustes (Robust Security Network 802.11i).

Actuellement le standard WIFI (Wireless Fidelity) tel qu'il est déployé ne permet pas un déplacement sur une longue distance en cours de communication car les réseaux implantés ne pratiquent pas l'itinérance ("roaming"), contrairement aux réseaux de téléphonie numérique type GSM. Pour avoir accès au réseau avec un haut débit, l'utilisateur doit se rattacher à une borne (ou hot-spot en extérieur) et rester dans sa zone de couverture.

#### 1. avantages du WIFI :

- (a) possibilité de débit allant jusqu'à 56Mbit/s actuellement si bon rapport signal sur bruit.
- (b) technologie faible coût maintenant car nombre de produits sont disponibles sur le marché.
- (c) souplesse d'un déploiement réseau (absence de câblage) ;
- (d) établissement de liaisons avec une infrastructure réseau (mode avec point d'accès) en place ou connexion avec d'autres ordinateurs directement (mode ad-hoc).
- (e) évolution possible hors de la bande ISM à 2,4GHz qui commence à saturer. Les nouveaux systèmes nomades utilisent maintenant simultanément les bandes de fréquences à 2,4GHz et 5GHz

#### 2. inconvénients du WIFI

- (a) sécurité très perfectible actuellement (ou alors compliquée à implanter).
- (b) pas de "roaming".
- (c) pas encore de possibilité de réseau avec seulement infrastructure radio-fréquence (mode relais non encore implanté).
- (d) Technologie toujours gourmande en énergie mais maintenant généralisée dans les périphériques informatiques tels que les téléphones mobiles, les imprimantes, les appareils photos numériques...
- (e) Pas de mécanisme propre pour permettre une liaison téléphonique de qualité —> seulement voix sur IP avec inconvénient sur la non-réservation d'un débit minimal pour la liaison. Néanmoins des systèmes de gestion de la qualité et de la priorité de services (QoS) sont mis en œuvre pour améliorer la fluidité des liaisons vocales.

Le WIFI est pour l'instant cantonné à une utilisation sur des sites spécifiques (campus d'université, domicile, hôtel, gare, bureau d'entreprise...) mais pas d'itinérance et plutôt avec des ordinateurs portables ou éventuellement PDA et smart-phone (Téléphones mobiles évolués).

#### 7.1.2 Quelques données techniques Sur le WIFI

##### Les canaux radiofréquences

1. Les plages de fréquences des ondes porteuses se trouvent dans les bandes de fréquences ISM (Industrial Scientific and Medical).
  - (a) En Europe :
    - i. 2,4–2,4835GHz pour le standard 802.11b et g
    - ii. 5,15-5,35GHz + 5,725-5,850GHz pour le standard 802.11a
  - (b) Aux USA :  
fréquences identiques sauf 802.11a (Bande haute uniquement).
2. Canaux fréquentiels
  - (a) Dans la bande basse à 2,4GHz :  
**14 canaux de 5MHz de large.**

Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fréquence	2,412	2,417	2,422	2,427	2,432	2,437	2,442	2,447	2,452	2,457	2,462	2,467	2,472	2,477

TABLE 2 – Les canaux fréquentiels WIFI dans la bande ISM à 2,4GHz

→ Pour 11Mbit/s, il y a recouvrement entre canaux.  
 NB : Souvent ne sont utilisés que les canaux 1, 6 et 11.

(b) Dans la bande haute à 5GHz

**8 canaux de 20MHz sont définis**

Les canaux sont plus larges et la bande moins occupée !!!

3. La bande ISM à 2,4GHz est très utilisée :

(a) Contraintes :

- Émission à faible puissance :  
 $P_{max} \leq 100mW$
- Modulations et protocoles limitant les perturbations de l'extérieur.

(a) Solutions :

i. Modulations à étalement de spectre

A. Sauts de fréquences réguliers → **Frequency Hopping**

B. Etalement par une séquence de codage → **Direct Sequence Spread Spectrum**

C. plusieurs fréquences simultanées pour une liaison → **Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)**

ii. Brassage des données dans des trames temporelles successives

**La portée d'utilisation avec une antenne standard :**

1. Le débit dépend du nombre d'états.
2. La propagation ajoute du bruit en phase et amplitude.
3. En réception, les états IQ deviennent des nuages.
4. Les états sont d'autant plus proches qu'ils sont nombreux (haut-débits).
5. Pour des haut-débits, le bruit mélange les états à la réception.  
 → Les modulations haut-débit nécessite un rapport signal sur bruit (SNR) grand.

$$SNR = \frac{S}{N}$$

→ La portée est directement reliée au débit demandé (Tab. 3).

**Le Phénomène du Multi-trajets**

1. Le Fading

(a) Problème :

- i. En milieu urbain : réflecteurs= immeubles et mobiliers urbains
- ii. En intérieur : réflecteur = les meubles, murs, et sols et aussi les plafonds.  
 → Le phénomène de multi-trajets est encore plus fort.
- iii. Interférences entre les différents chemins.

$$E_{total} = E_1 + E_2 + E_3 = E_0(e^{\alpha - j\phi_1} + e^{\beta - j\phi_2} + e^{\gamma - j\phi_3})$$

Type	Débit (Mbit/s)	Portée intérieure (m)	Portée extérieure(m)
<b>802.11a</b>	54	10	
	48	17	
	36	25	
	24	30	
	12	30	
	6	70	
<b>802.11b</b>	11	50	200
	5,5	75	300
	2	100	400
	1	150	500
<b>802.11g</b>	54	27	75
	48	29	100
	36	30	120
	24	42	140
	18	55	180
	12	64	250
	9	75	350
	6	90	400

TABLE 3 – Portée Wifi en fonction du débit

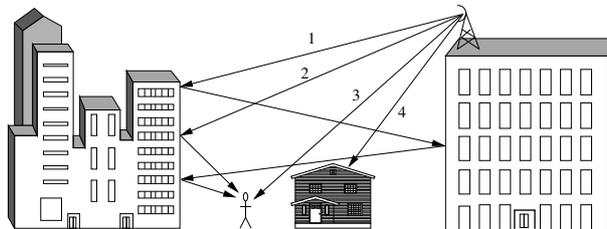


FIGURE 26 – Multi-trajets

—> Dans le pire cas  $E_{total} = 0$

—> Onde stationnaire avec périodiquement des ventres et des noeuds du champ électromagnétique.

—> C'est le phénomène du **Fading**

(b) Solutions :

- i. Plusieurs antennes espacées d'environ  $\frac{\lambda}{4}$  (ex : 2 antennes dans les cartes Wifi PCMCIA).
- ii. Changements réguliers de fréquences (Frequency Hopping).

## 2. Le Brouillage

(a) Le système *émetteur-canal de transmission-récepteur* est linéaire

(b) Si  $E_{total} \geq E_{min}$  la réception est possible.

(c) Pour le récepteur,

On somme des trames de données numériques décalées dans le temps.

Plus on module lentement, moins l'écart temporel sur les signaux reçus est perturbant.

**Le multi-trajets limite à priori le débit disponible.** La modulation **OFDM** qui divise le débit entre plusieurs porteuses est une modulation adaptée.

## 7.2 Systèmes permettant une grande interopérabilité entre périphériques mais relativement bas-débit —> Bluetooth

(présentation de Bluetooth)

Wifi n'est pas conçu pour interfacier des périphériques informatiques entre eux. Pour permettre cet échange de manière transparente les industriels ont développé la norme Bluetooth permettant de réaliser des micro-réseaux ou encore PNA (Personal

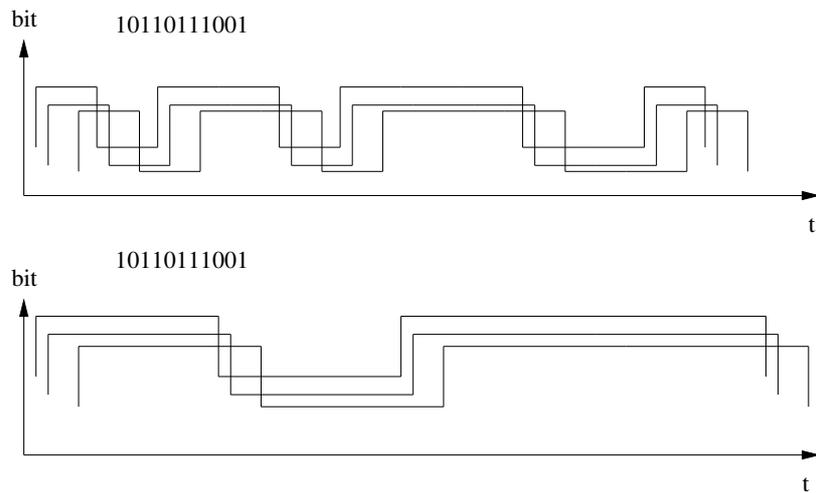


FIGURE 27 – Brouillage par superpositions temporelles décalées

Network Architecture). Le principe est l'établissement automatique par les périphériques de petits réseaux cellulaires appelés piconets entre un périphérique ayant le rôle de maître et sept autres ayant un rôle d'esclave. Ces piconets peuvent éventuellement s'interconnecter mais de façon très rudimentaire.

avantages de bluetooth :

1. système plus simple que WIFI et consommant moins.
2. produit maintenant bien industrialisé donc peu coûteux à implanter.
3. norme faite pour interfacer pratiquement tout type de périphériques simplement.
4. identification automatique des périphériques au sein du piconet.
5. norme prévue pour permettre une liaison de type téléphonique (qualité de service suffisante pour le transport de la voix).

inconvénients de bluetooth :

1. débit très faible comparativement à WIFI (pas d'avenir en tant que point d'accès réseau sans fil).
2. pas de "roaming" .
3. Arrivé tardive sur le marché par rapport à Wifi donc non standard sur les ordinateurs portables par exemple
4. Pas d'évolution hors de la bande de fréquences ISM à 2,4GHz pour l'instant

## 8 Un support alternatif : réseau de transport d'énergie (powerline)

L'intérêt des techniques des réseaux sans fils est d'éviter un câblage coûteux dans des lieux non-aménagés à l'origine ainsi qu'une mobilité partielle dans les zones couvertes par les points d'accès.

Néanmoins une alimentation électrique est très souvent nécessaire et disponible dans les locaux. La question qui se pose est : est-il possible d'utiliser le réseau d'alimentation électrique des bâtiments pour réaliser un réseau informatique ? Cette solution existe et commence à se vulgariser. Il s'agit de la technologie sur courant porteur autrement appelée "powerline".

Deux applications distinctes sont envisagées :

- La première concerne la réalisation d'un réseau local (par exemple dans une agence bancaire) pour échanger des informations entre les ordinateurs et les imprimantes avec un raccordement éventuel au réseau mondial INTERNET par une technologie classique (par exemple ADSL).

Les "plugs HD" font partis de cette famille d'application sur courant porteur !

- La seconde application est au contraire d'assurer la connexion à INTERNET des bâtiments par le courant porteur au travers des installations EDF. Le réseau dans les bâtiments peut éventuellement utiliser une technologie classique différente. On parle alors de boucle locale. L'intérêt est d'utiliser un câblage existant.

Les difficultés sont :

1. de faire cohabiter des hautes tensions 220Volts (ou plus avec les lignes EDF très Haute Tension) avec des signaux beaucoup plus petits.

- de fonctionner alors que les impédances de charge sur les câbles peuvent varier du tout au tout (pensez à la mise en marche de radiateurs électriques de façon intermittente (résistance faible) en parallèle par exemple avec la prise de raccordement de l'ordinateur. Il peut s'agir de lampes ou d'autres appareils ménagés.

(présentation de PowerLine)

## 9 Processus de standardisation mondiale

L'ensemble des normes abordées ici sont issues d'un processus de standardisation qui est maintenant mondial pour des questions de coût.

Deux processus différents sont possibles :

- Un besoin est identifié au niveau des utilisateurs. Un appel d'offre auprès des industriels est lancé pour obtenir des réponses techniques possibles. Un comité réalise la synthèse des différentes solutions pour n'en retenir que le meilleur. Un standard est alors élaboré par les autorités habilitées. Les industriels développent alors des produits commerciaux selon ce standard. Au cours de la vie du standard, celui-ci évolue régulièrement pour répondre à des besoins connexes ou pour éliminer des problèmes techniques de mise en œuvre (sécurité, interopérabilité, fonctionnalité manquante, difficulté d'industrialisation).
- Le second processus est différent. Un besoin est identifié au niveau des utilisateurs (ou créé...). Un industriel ou un groupement d'industriels développe un système permettant de satisfaire ce besoin. Ce groupement d'industriel fait du "lobbying" auprès d'autres industriels pour qu'ils adoptent cette technologie, et conjointement auprès des autorités de certification pour qu'elles intègrent cette technologie sous forme d'une nouvelle norme internationale pour ouvrir le marché et permettre la commercialisation des produits.

Les deux processus sont souvent mêlés et il s'agit la plupart du temps d'un échange entre spécialistes des autorités internationales et industriels pour aboutir à un système utilisable...

## 10 Le futur

- Amélioration des standards Wifi et Bluetooth.  
Pour Wifi : sécurité accrue, débit augmenté, développement de réseaux purement radio-fréquence  
Pour Bluetooth : augmentation du débit, diminution du coût par augmentation de la production (effet d'échelle de marché), développement de systèmes avec "roaming" prévue dans la norme mais non implanté, amélioration des liaisons téléphoniques, développement de modules très faible consommation.
- Développement de la norme ZIGBEE : développement d'interfaces radio-fréquences très faible coût et très faible consommation, mais avec débit faible (applications : étiquettes électroniques, badges d'accès, télécommandes d'appareils, domotique faible coût, centrales de commande et capteurs (type alarmes par exemple, ou contrôle de chaînes de production...))
- Systèmes multistandards (ex : Wifi si près d'un point d'accès et UMTS sinon...)
- Développement de systèmes dit terminaux de traitement multi-usages simples et compacts, poursuite des développement des smartphones ( fin des PDA ?)  
Développement de systèmes dédiés 1 fonction avec interaction automatique avec autres systèmes.
- Développement de la Télévision Numérique Terrestre (TNT), avec par exemple la généralisation de la haute définition (HD)  
Développement de la radiophonie numérique terrestre (bientôt...et déjà fait au Japon)
- Développement de la géolocalisation des utilisateurs via leur terminal actif (fonction A-GPS des téléphones portables)
- En recherche et développement :
  - augmentation des débits disponibles à puissance d'émission constante
  - augmentation des couvertures radio-fréquences
  - augmentation de l'autonomie des systèmes
  - augmentation de la sécurité des systèmes et des échanges de données numériques