

Sommaire

Réseaux sans-fil et réseaux mobiles	29
Historique	29
Concepts Mobile & Sans-fil	30
Définition : Réseau mobile et réseau sans-fil	30
Classification des réseaux mobile & sans-fil	31
Classification selon la technique d'accès	31
Techniques d'accès Multiple	31
Duplexage	31
Duplexage par répartition en fréquence (FDD)	31
Duplexage temporel (TDD)	32
Technique FDMA	32
FDMA appliquée au GSM (Bande 890-960 MHz)	33
Technique TDMA	34
Technique CDMA	36
Avantages de l'étalement de spectre	38
Etalement de spectre par séquence directe (DS-SS)	39
Codes d'étalement	41
Exemple de la CDMA	41
Etalement de spectre par saut de fréquence (FH-SS)	42
Technique OFDM	44
Modulations Multi-porteuses	46
Utilisation des techniques de modulation multiporteuses	47
Principe de l'OFDM	47
Systèmes sans-fil et techniques d'accès multiple	48
Avantages du sans-fil	50
Inconvénients	51
Allocation du spectre de fréquence	51
Bandes de fréquences sans Licence	51

Réseaux sans-fil et réseaux mobiles

Historique

- ⇒ Maxwell en **1864**: Prédiction d'existence d'ondes électromagnétiques ;
- ⇒ Hertz en **1887**: Confirmation pratique du travail de Maxwell ;
- ⇒ Tesla en **1893**: Transmission Radio par onde porteuse et invention du Radar ;
- ⇒ Marconi en **1897** : Télégraphie sans-fils ;
- ⇒ Marconi en **1901** : Première Transmission sans-fils à travers l'atlantique ;
- ⇒ **1946**: AT&T (American Telephone & Telegraph) introduit le premier système de Téléphonie mobile ;
- ⇒ **1947**: Bell Labs invente le concept de système cellulaire ;
- ⇒ **1971** : AT&T et Motorola proposent d'utiliser la bande 800 MHz pour les réseaux cellulaires ;
- ⇒ **1983**: Première licence commerciale de réseau cellulaire. Déploiement du 1G AMPS - Advanced Mobile Phone System (Analogique) (Voir la figure (1));
- ⇒ **1988**: Réseaux cellulaire numérique GSM : 2G European (services offerts: voix et SMS) ;
- ⇒ **1990**: IEEE 802.11 Wireless LAN ;
- ⇒ **1993**: Début IS-95 (Interim Standard, CDMA : 2G américain) ;
- ⇒ **2000**: 2.5G GPRS (General Packet Radio Service) dans quelques pays (Commutation par paquets - Voix et données et augmentation de débit) ;
- ⇒ **2000**: 3G (UMTS - Universal Mobile Telecommunications System, Supporte données multimédias comme vidéo) ;
- ⇒ **2010**: 4G LTE (Long Term Evolution, Supporte Ultra-Wideband internet access) ;
- ⇒ **2020** et au-delà... : 5G. La 5G arrive d'abord en Corée, puis en Chine. Les USA, le Royaume-Uni et l'Allemagne viennent ensuite, suivis par le reste du monde.

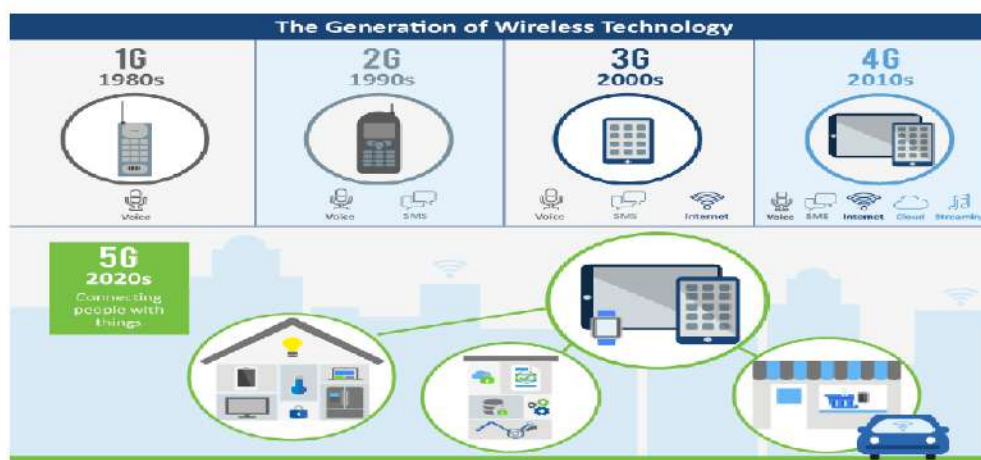


Figure 1 Evolution de la technologie sans-fil

Concepts Mobile & Sans-fil

- Les termes « mobile » et « sans-fil » sont souvent utilisés pour décrire les systèmes existants, tels que le GSM, l'IS95, l'UMTS, le LTE, l'IEEE 802.11 (ensemble de normes concernant les réseaux sans-fil locaux), Bluetooth, etc ;
- Un utilisateur mobile est défini théoriquement comme un utilisateur capable de communiquer à l'extérieur de son réseau d'abonnement tout en conservant une même adresse ;
- Le concept de sans-fil est étroitement associé au support de transmission ;
- Un système est dit sans-fil s'il propose un service de communication totalement indépendant des prises murales ;
- Dans cette configuration, d'autres moyens d'accès sont exploités, tels que l'infrarouge ou les ondes hertziennes.

Définition : Réseau mobile et réseau sans-fil

- Le terme mobile signifie la capacité d'être en mouvement ;
- Un appareil mobile est tout ce qui peut être utilisé en déplacement, allant des ordinateurs portables aux téléphones mobiles ;
- Le sans-fil fait référence à la transmission de la voix, de la vidéo et des données informatiques par ondes radio ;
- Les appareils sans-fil incluent tout ce qui utilise un réseau sans-fil pour envoyer ou recevoir des données.
- Le réseau sans-fil est accessible depuis des appareils mobiles, ainsi que depuis des appareils fixes. La figure (2) illustre la relation entre le mobile et le sans-fil.

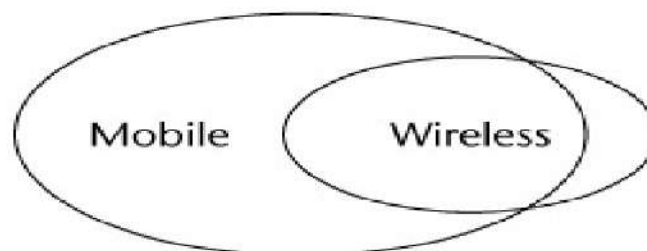


Figure 2 Relation mobile-sans-fil.

- Comme le montre cette figure, dans la plupart des cas, le sans-fil peut être un sous-ensemble du mobile. Cependant, dans de nombreux cas, une application peut être mobile sans être sans-fil ;
- Les applications sans-fil qui ne sont pas mobiles utilisent des réseaux sans-fil fixes ;
- Exemple : le réseau local sans-fil (WLAN). Ce réseau est utilisé pour donner un accès réseau aux postes de travail. De nombreuses entreprises ainsi que des

utilisateurs à domicile installent la technologie WLAN pour éviter d'avoir à installer des câbles réseau dans leurs bâtiments ;

- Les applications mobiles qui ne sont pas sans-fil caractérisent toutes les applications qui peuvent être utilisées en déplacement et qui n'ont pas de connectivité sans-fil. Exemples : Applications pour ordinateurs portables ;
- Il y a quelques années seulement, il était en fait rare d'avoir un accès aux données sans-fil pour les appareils mobiles ;
- Pour ces applications mobiles, les données sont souvent synchronisées à l'aide d'une connexion fixe et stockées sur l'appareil pour une utilisation ultérieure.

Classification des réseaux mobile & sans-fil

Les réseaux mobiles peuvent être distingués par leurs modes de fonctionnement, leurs services et applications et les méthodes d'accès multiples utilisées.

Classification selon la technique d'accès

Une influence majeure sur le développement des systèmes de communication radio est la limitation du spectre radio disponible pour l'utilisation. Un objectif apparent est d'affecter le nombre maximum d'utilisateurs à un segment de fréquence radio disponible. Cet objectif est atteint en utilisant divers schémas d'accès multiples. Ici, nous listons les quatre technologies les plus couramment utilisées :

1. L'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) ;
2. L'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) ;
3. L'accès multiple par répartition de code (CDMA) ;
4. L'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA).

Techniques d'accès Multiple

- ⇒ Plusieurs schémas d'accès sont utilisés pour permettre à de nombreux utilisateurs mobiles de partager simultanément une bande de fréquences radio ;
- ⇒ Une grande capacité est requise ;
- ⇒ L'opération d'accès multiple doit se faire sans dégradation des performances ;
- ⇒ Le duplexage est nécessaire pour permettre aux abonnés d'envoyer et de recevoir des informations simultanément.

Duplexage

- ⇒ Il est basé sur l'utilisation de techniques fréquentielles ou temporelles ;

Duplexage par répartition en fréquence (FDD)

- ⇒ Comme le montre la figure (3), ce type de duplexage permet de Fournir deux bandes distinctes de fréquences pour chaque utilisateur ;
 - Bande de transfert ---- de la station de base au mobile ;
 - Bande inversée ---- du mobile à la station de base.

- ⇒ Il se compose donc de deux canaux simplex ;
- ⇒ Pour réaliser ce mode répartition de fréquences, un duplexeur est utilisé ;
- ⇒ La répartition des fréquences entre le canal aller et le canal retour est constante.

Duplexage temporel (TDD)

- ⇒ Il utilise le temps pour fournir à la fois un lien direct (MS→BTS) et inverse (BTS→MS) ;
- ⇒ Si l'intervalle de temps entre les times slots aller et retour est petit, alors la transmission et la réception des données apparaissent simultanément ;
- ⇒ Il permet la communication sur un seul canal et simplifie l'équipement de l'abonné puisque le duplexeur n'est pas nécessaire.

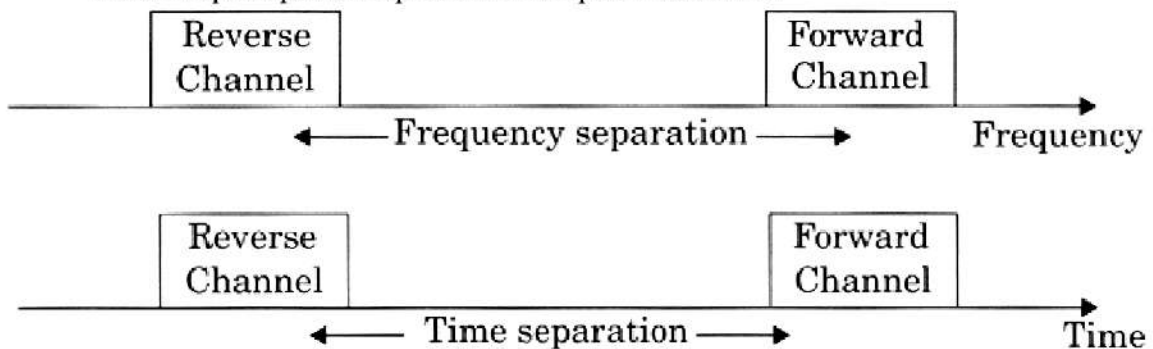


Figure.3. Principe des techniques de Duplexage FDD et TDD.

Comme le montre la figure (3), la FDD fournit deux canaux simplex **en même temps**. La TDD fournit deux créneaux de temps (Time slots) simplex **à la même fréquence**.

Technique FDMA

FDMA (Frequency Division Multiple Access)

- Le spectre de fréquences est subdivisé en canaux (dits aussi sous-canaux)
- Chaque émetteur utilise la bande de fréquences qui lui allouée le temps d'un appel (connexion)

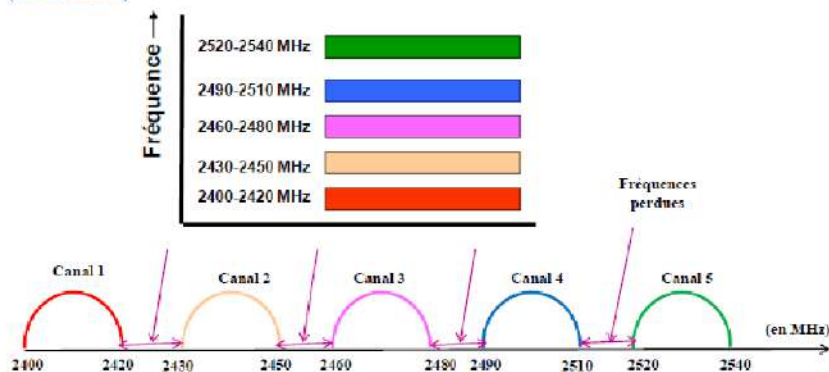


Figure.4. Principe de la FDMA

- ⇒ Comme le montre la figure (4), dans la FDMA, une sous-bande de fréquence est allouée à chaque émetteur pendant le temps d'appel ;
- ⇒ Chaque sous-bande est relativement étroite par rapport à la bande de cohérence du canal de propagation ;
- ⇒ Les sous-bandes (sous-canaux) sont généralement exploités à l'aide de la technique FDD. Dans ce cas, le système est appelé FDMA/FDD ;
- ⇒ Dans la FDMA à bande étroite, un utilisateur se voit attribuer un sous-canal particulier qui n'est pas partagé par d'autres utilisateurs à proximité ;
- ⇒ Si un sous-canal n'est pas utilisé, il reste inactif → perte de ressources ;
- ⇒ La norme de téléphonie mobile analogique américaine de 1^{ère} génération AMPS est basée sur la FDMA (Voir la figure (5)).
- ⇒ Dans la FDMA appliquée à l'AMPS, le nombre total de canaux, N , est donné par :
$$N = \frac{B_t - 2B_{guard}}{B_c}$$

Avec :

B_t : Bande spectrale totale ;

B_{guard} : Bande de garde allouée au bord de la bande de fréquences ;

B_c : largeur de bande du canal.

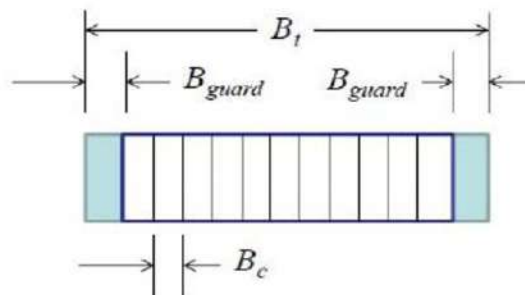


Figure.5 Exemple 1 du Système FDMA - AMPS.

FDMA appliquée au GSM (Bande 890-960 MHz)

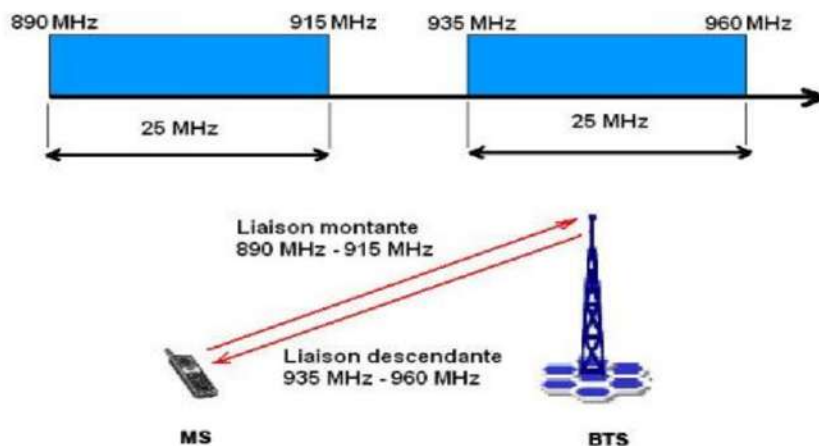


Figure.6. Exemple 2 du Système FDMA - GSM (Bande 890-960 MHz)

- ⇒ Comme le montre la figure (6), dans la FDMA-GSM, la bande subdivisée en deux types de canaux (2 X 25 MHz) ;
 - Liaison montante Uplink (Multiple Access Channel – « MAC ») : Plusieurs émetteurs vers un seul récepteur ;
 - Liaison descendante Downlink (Broadcast Channel « BC ») : Un émetteur vers plusieurs récepteurs ;
- ⇒ Largeur de chaque canal : 200 KHz ;
- ⇒ 124 canaux (duplex) sont répartis entre les différents opérateurs ;
- ⇒ Les deux liaisons montante et descendante sont séparées par 20 MHz ;
- ⇒ La différence entre deux fréquences correspondantes UpLink et Downlink, appelée « Ecart duplex », est égale à 45 MHz.

Technique TDMA

- ⇒ Dans cette technique, une fréquence porteuse est partagée entre différents abonnés en « Time slots » (intervalles de temps) ;
- ⇒ Chaque utilisateur utilise un time slot ;
- ⇒ La transmission est discontinue (en bursts = Rafales) les données et les modulations utilisées doivent être numériques ;
- ⇒ Ceci peut diminuer la consommation de puissance ;
- ⇒ Pour la TDMA à bande étroite, il y a généralement un grand nombre de canaux qui sont alloués en utilisant soit la FDD ou la TDD. On parle dans ce cas des techniques TDMA/FDD ou TDMA/TDD.

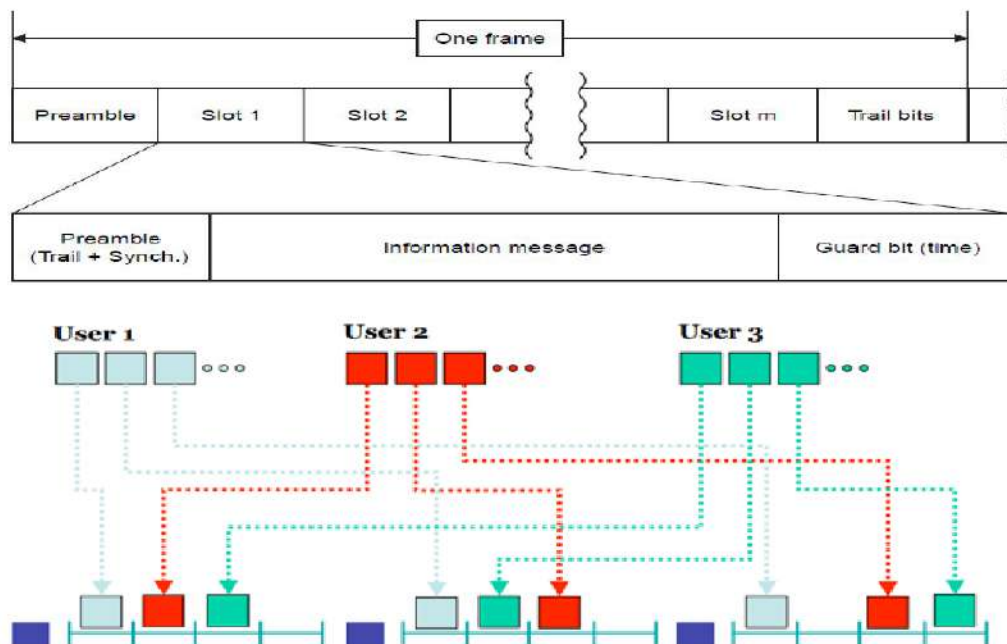


Figure.7. Trame TDMA

La trame TDMA est donnée comme suit (Voir la figure (7)) :

- Un Préambule : Informations sur les adresses et la synchronisation du BTS et des abonnés ;
- Un temps de garde (Guard time) : Pour la synchronisation des abonnés entre différents slots. Ce temps est utilisé pour éviter les cross-talk (Diaphonie : interférence d'un premier signal avec un second).

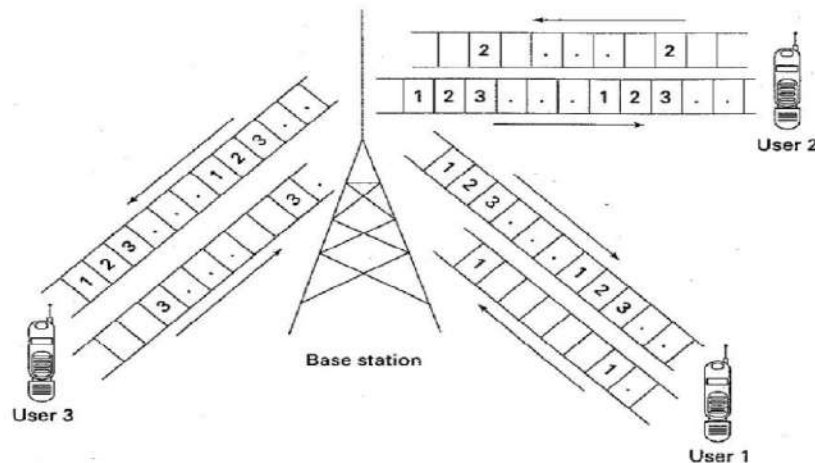


Figure.8. TDMA Uplink et Downlink

- ⇒ Pour augmenter le nombre de canaux de communication et permettre une plus grande souplesse d'affectation de ceux-ci, la TDMA est combinée avec la FDMA (Voir la figure (9)) ;
- ⇒ Ici, le nombre de canaux temporel (égal au nombre de slots multiplié par les canaux fréquentiels disponibles) est donné par :

$$N = \frac{m(B_{tot} - 2B_{guard})}{B_c} \quad (1)$$

Avec :

m : le nombre d'utilisateurs TDMA maximal dans chaque canal fréquentiel ;

B_{tot} : Bande passante totale du système ;

B_{guard} : Bande de garde dans chaque côté de la bande passante ;

B_c : largeur de bande de chaque canal.

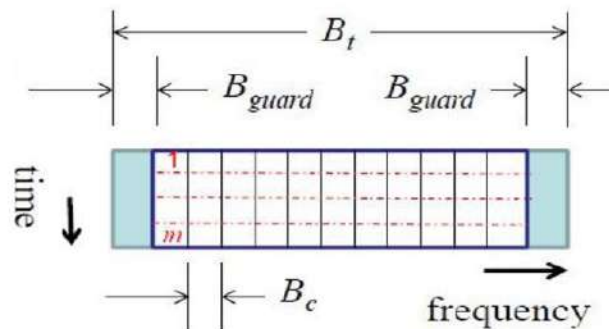


Figure.9. Canaux en TDMA + FDMA

Technique CDMA

- ⇒ La CDMA pour Code Division Multiple Access est basée sur l'étalement de spectre ;
- ⇒ C'est une technique de communication utilisée pour le partage de ressources (l'accès multiple) ;
- ⇒ Pourquoi étaler le spectre ?

La capacité C d'un canal est donnée par :

$$C = B_s \cdot \log \left(1 + \frac{P_s}{P_b} \right) \quad (2)$$

C en $[b/s]$, caractérise le nombre maximum de bits par seconde qu'il est possible de transmettre avec une erreur aussi faible que possible ;

B_s est la bande, en Hz , occupée par le signal émis;

P_s est la puissance, en Watt (W), du signal émis ;

P_b est la puissance, en W , du bruit.

Pour transmettre une quantité d'information C donnée (Voir figure (10)), il est possible d'utiliser :

- Soit une bande B_s étroite et un fort rapport $\frac{P_s}{P_b}$
- Soit une bande large B_s et un faible rapport $\frac{P_s}{P_b}$.

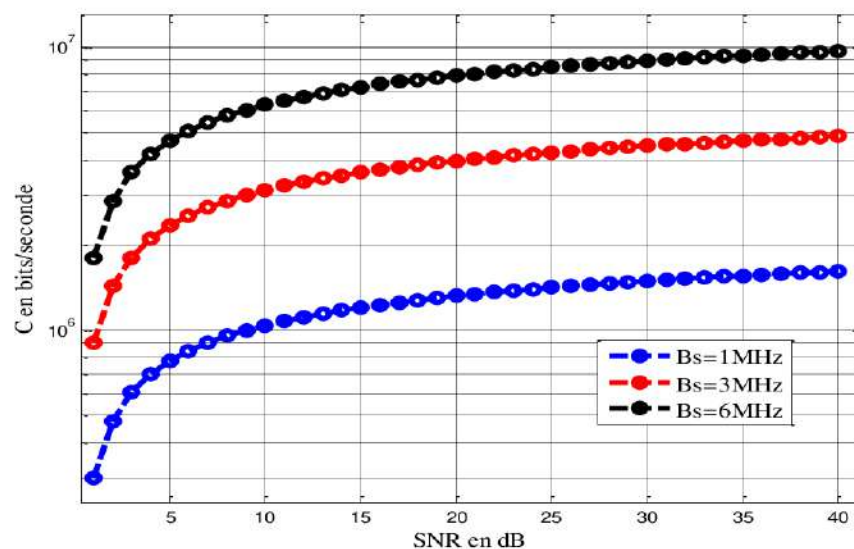


Figure.10. Capacité du canal en fonction du SNR « $\frac{P_s}{P_b}$ »

- ⇒ L'idée de l'étalement de spectre consiste donc à émettre un signal de bande largement supérieure à celle du signal utile afin d'obtenir de bonnes performances à la réception avec un SNR réduit au minimum.

Motivation I :

- ⇒ La FDMA : un utilisateur = une bande de fréquence distincte de celles des autres ;
⇒ La TDMA : un utilisateur = un intervalle de temps différent de ceux alloués aux autres.

Motivation II :

Dans les techniques TDMA et FDMA, il est difficile de gérer les ressources de façon optimale.

- ⇒ FDMA : pas bien adaptée à quelques types de communications comme la parole ;
⇒ TDMA : nécessite une parfaite synchronisation entre utilisateurs, ce qui n'est pas si simple à gérer.

Motivation III :

- ⇒ Permettre aux utilisateurs d'émettre dans la même bande au même instant (ce qui implique plus de problème pour gérer l'allocation des ressources – Voir la figure (11)).

Question de fond : comment peut-on séparer les différents signaux correspondants aux différents utilisateurs ?

- ⇒ Utiliser des multiplexeurs d'un type un peu particulier.

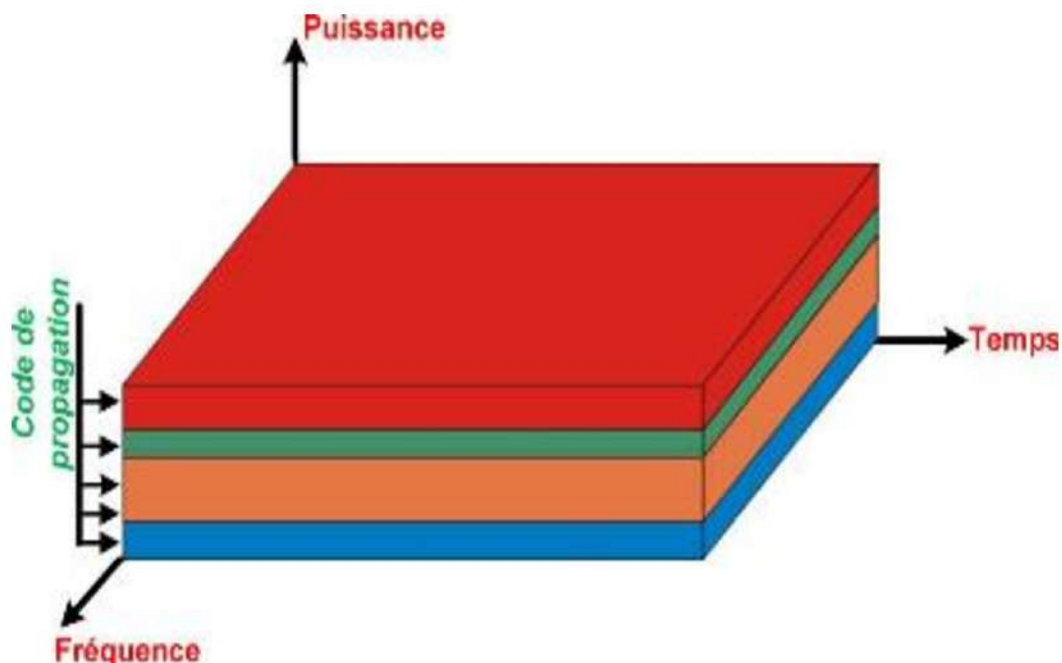


Figure.11. Répartition temps-fréquence

- ⇒ La CDMA consiste à étaler le spectre en utilisant une famille de codes orthogonaux ou pseudo-orthogonaux ;
- ⇒ DS-SS (pour Direct Sequence Spread Spectrum) est l'abréviation anglaise de l'étalement de spectre par séquence directe ;
- ⇒ La CDMA permet la transmission simultanée de plusieurs canaux, chacun étant étalé en fréquence ;
- ⇒ Le principe de l'étalement de spectre repose sur le codage de l'information à transmettre avec une séquence pseudo-aléatoire, connue seulement par les utilisateurs ;
- ⇒ La conséquence directe de ce codage est l'étalement de la densité spectrale de puissance du signal informatif sur une plus grande largeur de bande (figure (12)). Le signal transmis se comporte alors comme du bruit pour les autres utilisateurs.

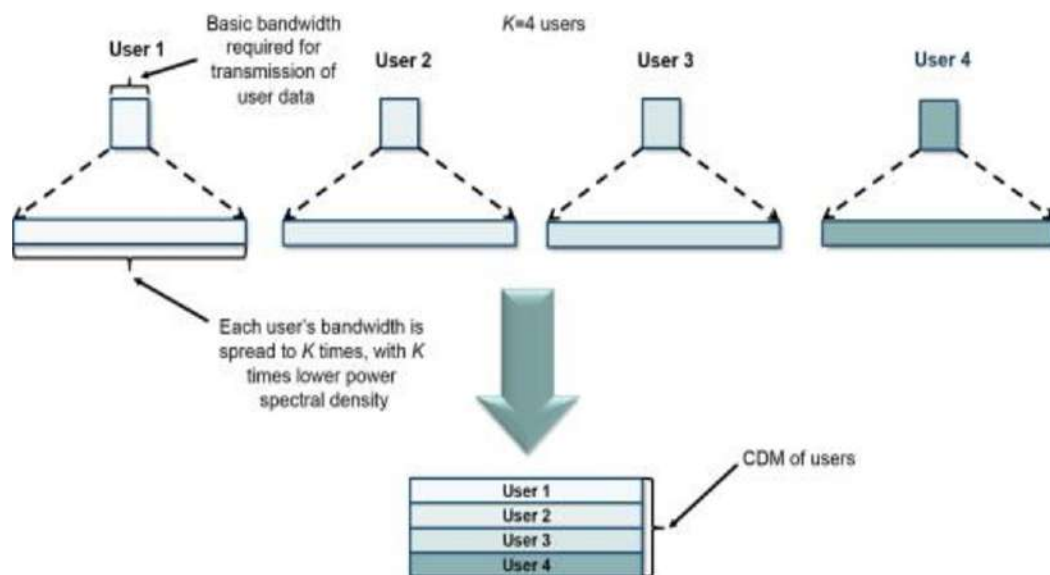


Figure.12. Principe d'étalement de spectre

Avantages de l'étalement de spectre

- ⇒ **Un canal unique pour tous les utilisateurs** : Les utilisateurs ne se voient plus attribuer un canal physique, c'est-à-dire une bande de fréquence, mais un code. Cela simplifie l'organisation des bandes de fréquence et change fondamentalement la notion de canal ;
- ⇒ **Une densité spectrale de puissance plus faible** : la puissance moyenne du signal reste la même, mais elle est étalée sur toute la bande de fréquence. Cette propriété entraîne une densité spectrale de puissance (qui représente la répartition de la puissance en fonction de la fréquence) plus faible. Ainsi, les autres systèmes de communication seront moins gênés par ce type de communication ;
- ⇒ **L'immunité aux interférences** : le système ne verra pas les autres signaux (codés différemment) et ne sera pas gêné par les signaux en bande étroite ;

- ⇒ **L'immunité aux effets de trajets multiples** : si l'on considère que les ondes retardées arrivant sur le récepteur sont des interférences, le système ne verra pas non plus ces ondes ;
- ⇒ **Un accès aléatoire** : les utilisateurs pourront transmettre à tout moment. (Méthode d'accès aléatoire codée CDMA) ;
- ⇒ **Le caractère privé de l'information** : l'information ne pourra pas être interceptée par un utilisateur ne possédant pas le code ;
- ⇒ **Un adressage par code** : en donnant un code à un seul récepteur, il sera adressé individuellement vis-à-vis des autres utilisateurs.

Tous ces avantages n'ont lieu qu'au détriment d'un seul facteur, l'efficacité spectrale. En effet, le même signal va occuper plus de bande ce qui signifie que le débit, pour une même bande donnée, sera plus faible.

Il existe deux principales techniques :

- **La Technique d'Étalement par séquence directe**, appelée aussi codage directe est bien connue dans la littérature sous le sigle DS-SS. Elle est réalisée en utilisant un signal ou une séquence pseudo-aléatoire, dont le débit numérique est supérieur à celui du signal contenant l'information.
- **La Technique d'Étalement par saut de fréquence** qui, comme son nom l'indique, consiste en une variation de la fréquence de transmission par sauts discrets pseudo-aléatoires. Elle est encore connue dans la littérature sous l'abréviation FH-SS pour Frequency Hopping Spread Spectrum.

Étalement de spectre par séquence directe (DS-SS)

- ⇒ L'étalement de spectre par séquence directe (Figure (13)) se fait par la multiplication de l'information à transmettre de débit R_b par un code pseudo-aléatoire, aussi appelé signature, ayant un débit R_c .
- ⇒ On définit le gain de traitement N donné par :

$$N = \frac{R_c}{R_b} = \frac{T_b}{T_c} \quad (3)$$

Où : T_b , T_c représentent respectivement la durée d'un bit d'information et la durée d'une impulsion rectangulaire du code, appelée chip.

- ⇒ N est habituellement un entier, supérieur à 1 puisqu'il mesure l'étalement du spectre et représente le nombre de chips par bit d'information ;
- ⇒ On appelle également ce rapport gain de traitement (Processing gain) ;
- ⇒ La valeur de ce paramètre représente la capacité des systèmes à étalement de spectre à rejeter l'interférence. C'est-à-dire que plus N est grand plus le système résiste au bruit.

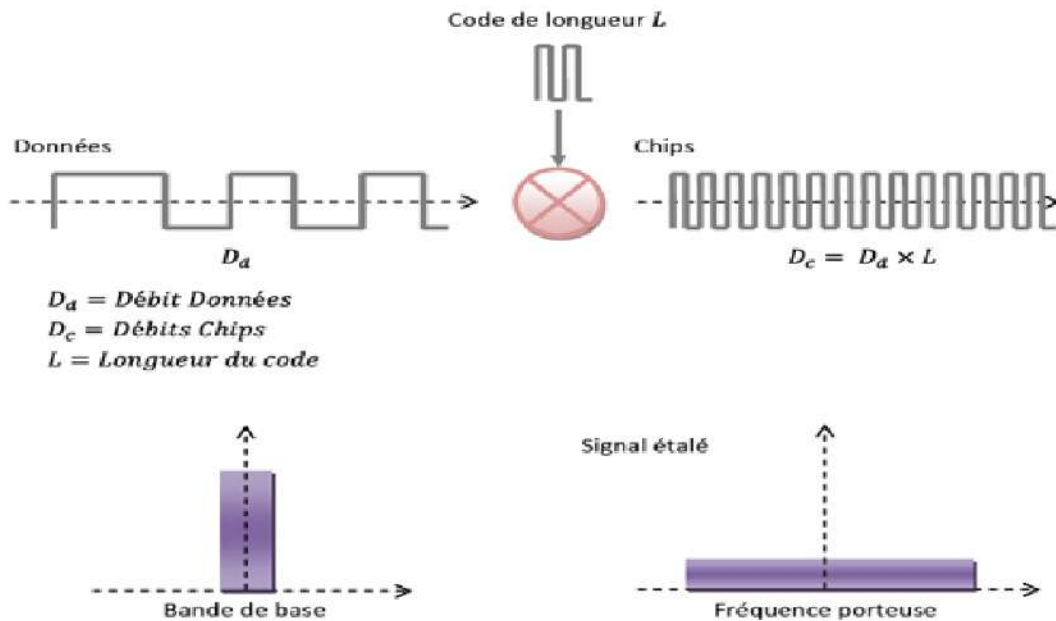


Figure.13. Opération de l'étalement réalisée au niveau de l'Emetteur

- ⇒ Au niveau du récepteur, en multipliant le signal reçu $r(t)$ par un code pseudo-aléatoire $(c(t))$ similaire à celui appliqué à l'émission, on récupère l'information transmise lorsque les deux signaux multipliés sont synchronisés ;

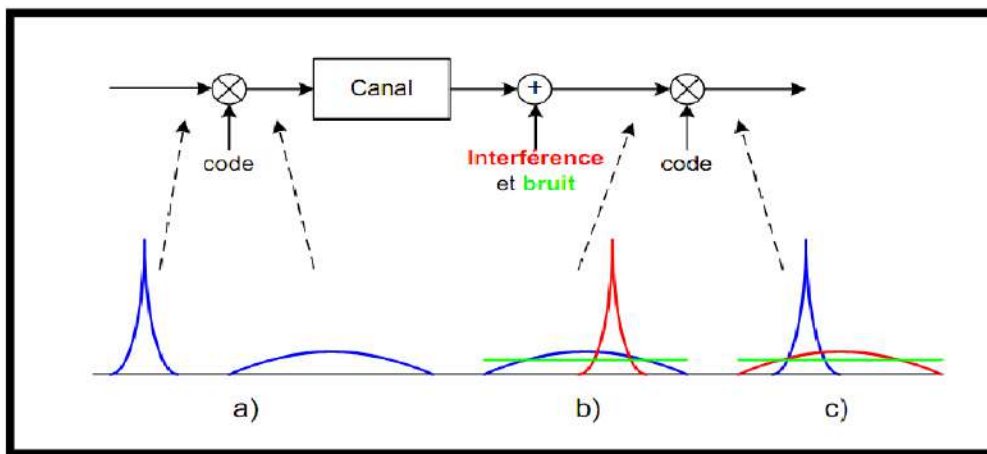


Figure.14. Représentation fréquentielle du principe d'étalement spectral

- ⇒ Du point de vue spectral, la multiplication des données avec la séquence de code produit un étalement du spectre du signal transmis (figure (14)) ;
- ⇒ Le signal reçu par le récepteur sera donc composé de trois éléments (figure (14)), soit le signal transmis étalé, le bruit thermique et l'interférence à bande étroite ;
- ⇒ En multipliant une nouvelle fois par le code lors de la réception, le signal désiré est déséparé ;
- ⇒ Le spectre du bruit thermique demeure intouché par la multiplication par le code, c'est -à-dire qu'il n'est ni étalé ni comprimé ;

- ⇒ L'interférence à bande étroite, par contre, subit une première multiplication par le code lors de la réception, ce qui cause un étalement et réduit considérablement son impact sur le signal désiré (voir figure (14)).

Codes d'étalement

- ⇒ En communication synchrone, les messages des utilisateurs sont émis dans le canal sans retard relatif ;
- ⇒ Lorsque le récepteur est synchronisé sur le message reçu, la séparation des utilisateurs peut être faite grâce à ces codes orthogonaux, les codes de Walsh-Hadamard sont dans ce cas les codes les plus utilisés ;
- ⇒ Lorsque la communication est asynchrone, cas de communication le plus délicat, les messages sont émis avec des retards relatifs qui ne sont pas connus à priori. Dans ce cas, ces codes ne sont plus utilisés, car ils perdent leurs propriétés d'orthogonalité quand ils sont décalés les uns par rapport aux autres. Parmi les codes les plus utilisés pour ce type de communications asynchrones : les codes Gold, les codes de Kasami, spécifiés pour la liaison montante du système UMTS ;
- ⇒ Les codes orthogonaux utilisés en DS-SS sont choisis d'après un ensemble de fonctions proposées en 1923 par le mathématicien américain Walsh. Du fait que les séquences de Walsh sont orthogonales, les communications sont immunisées par rapport aux interférences des utilisateurs entre eux si la synchronisation est correctement réalisée ;
- ⇒ Il existe plusieurs manières de générer les séquences de Walsh. La génération par des matrices de Hadamard est l'une des plus communes. Les matrices de Hadamard peuvent être générées de manière récursive :

On part d'un motif $W_1 = [1]$ et l'on ne considère que les matrices carrées d'une dimension L multiple de 2. Ainsi, la matrice W_L s'écrit :

$$W_L = \begin{pmatrix} W_{L/2} & W_{L/2} \\ W_{L/2} & \overline{W_{L/2}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$\overline{W_{L/2}}$ Correspondant au complément de $W_{L/2}$ par rapport à 1.

Exemples :

$$W_1 = (1), \quad W_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad W_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

On remarque que les lignes des matrices de Walsh sont orthogonales entre elles et correspondent de ce fait aux séquences de codes qui nous intéressent. Ces codes ont une période $M = 2^m$ (m étant le nombre d'itérations).

Exemple de codage CDMA

Il existe plusieurs variantes : on décrit ci-dessous la CDMA DS-SS.

- ⇒ Comme l'illustre la figure (15), le message « A » de l'émetteur A, représenté par une séquence de +1, -1 traduisant la séquence de bits 1 et 0 logiques, est multiplié par le code de Hadamard C_A ;

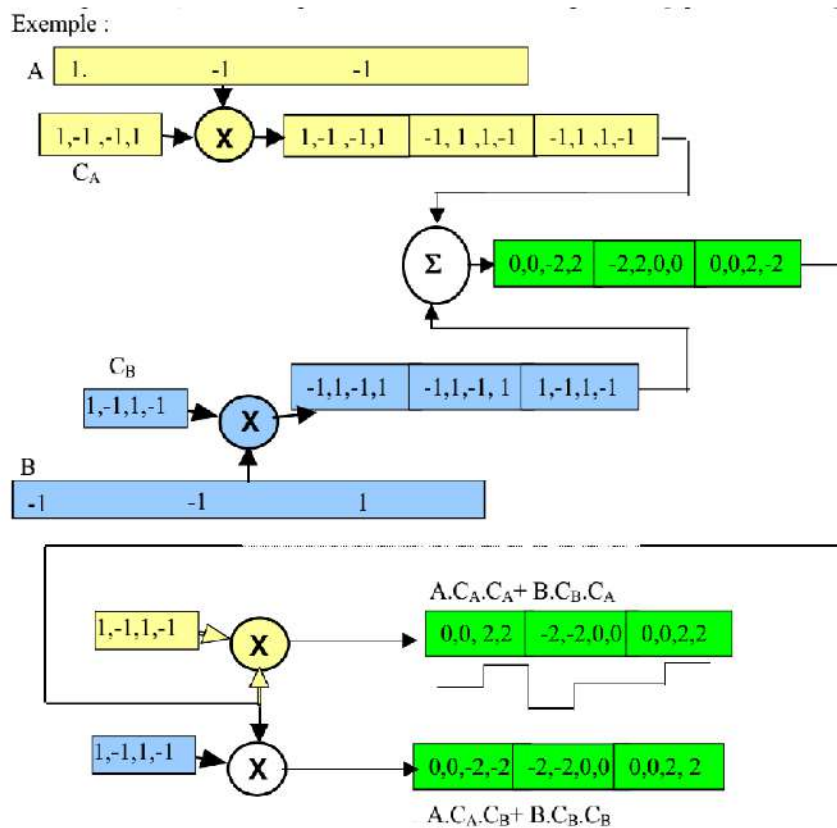


Figure 15 Exemple de codage CDMA

- ⇒ Idem pour l'émetteur du message « B », il est multiplié par le code C_B ;
- ⇒ Les séquences produites $A \times C_A$ et $B \times C_B$ seront ajoutées ensuite et transmises vers le canal de transmission ;
- ⇒ A la réception, le destinataire du message A multiplie la séquence reçue par le code C_A ;
- ⇒ Idem pour le destinataire du message B ;
- ⇒ En l'absence du bruit, la moyenne de $C_A \times C_A$ et de $C_B \times C_B$ est égale à ∓ 1 , tandis que $C_A \times C_B$ a une moyenne nulle : Les codes C_A et C_B sont dits « orthogonaux ».

Etallement de spectre par saut de fréquence (FH-SS)

- ⇒ Lors de la communication utilisant la technique FH-SS, le récepteur et l'émetteur changent de fréquence porteuse selon un ordre et une cadence qui sont prédéfinis ;
- ⇒ Ces derniers doivent rester secrets pour tout le monde sauf pour l'émetteur et le récepteur, concernés par cette communication ;
- ⇒ Le changement de fréquence porteuse est contrôlé par un générateur de séquence pseudo-aléatoire ;
- ⇒ Le schéma bloc d'un modulateur FH-SS est montré dans la figure (15).

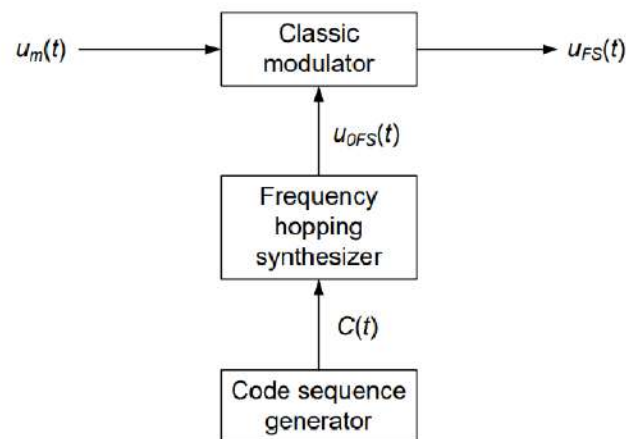


Figure 16 Modulateur FH-SS

<https://www.redalyc.org/journal/6617/661773214005/661773214005.pdf>

- ⇒ Comme le montre cette figure, ce modulateur de signal FH-SS est composé d'un générateur de séquence de code, d'un synthétiseur à sauts de fréquence et d'un modulateur, sur lequel certaines des modulations analogiques ou numériques classiques sont appliquées.
- ⇒ Le bloc le plus important des modulateurs de signal FH-SS est le synthétiseur de fréquence. Sous le contrôle du générateur de séquences de codes, un signal $u_{0FS}(t)$ est généré à sa sortie. Ce signal a une fréquence porteuse variable ;
- ⇒ Le taux de changement de fréquence porteuse varie de quelques sauts par seconde à 100 000 sauts par seconde. Le synthétiseur de fréquence génère le modèle de sauts de fréquence connu à la fois de l'émetteur et du récepteur ;
- ⇒ Lorsque la technique FH-SS est utilisée, la bande passante, pour la transmission du signal, est nettement plus large que celle nécessaire pour transmettre le même message avec une modulation classique à porteuse fixe ;
- ⇒ Le taux d'étalement des modulations FH-SS est défini comme suit :

$$\eta = \frac{B_{FS}}{B_m} \quad (6)$$

B_{FS} est la bande passante de fréquence de la transmission FH-SS ;

B_m est la bande passante du canal.

- ⇒ S'il n'y a pas de bandes de garde entre les canaux adjacents, le rapport d'étalement est égal au nombre de canaux. Soit :

$$\eta = N \quad (7)$$

- ⇒ Si un autre signal est présent dans l'un des canaux dans la bande passante de fréquence BFS, ce signal et le signal FH-SS interfèrent l'un avec l'autre ;

- ⇒ Cette interférence est de très courte durée et se produit dans l'intervalle de temps pendant lequel le signal FH-SS est présent dans ce canal ;
- ⇒ Le schéma bloc du démodulateur de signal FH-SS est présenté à la figure (17) ;
- ⇒ Comme le montre cette figure, ce démodulateur se compose d'un générateur de séquence de code, d'un synthétiseur à sauts de fréquence, d'un démodulateur et d'un bloc de synchronisation de code.

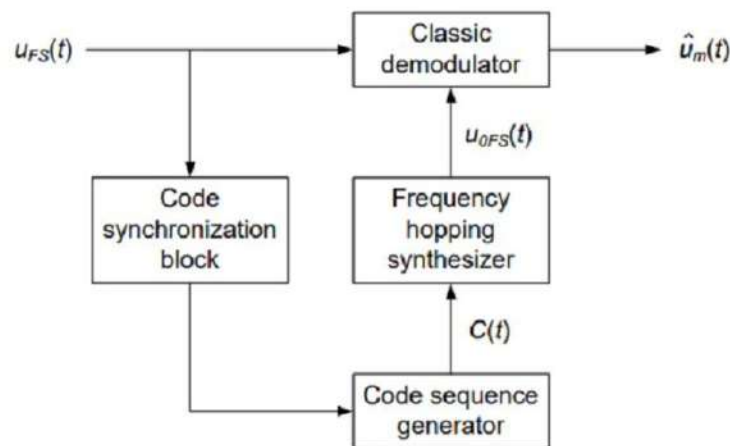


Figure 17 Démodulateur FH-SS

<https://www.redalyc.org/journal/6617/661773214005/661773214005.pdf>

- ⇒ La tâche fondamentale du récepteur FH-SS est de désétaler le spectre du signal entrant ;
- ⇒ Ce processus doit être effectué avant la démodulation. Il est accompli en corrélant le signal entrant avec une séquence de code synchronisée générée localement ;
- ⇒ La synchronisation des codes est une étape nécessaire pour pouvoir désétaler le spectre du signal entrant ;
- ⇒ Cette opération garantie que le changement de fréquence porteuse dans l'émetteur et le récepteur s'effectue en même temps ;
- ⇒ Les systèmes FH-SS peuvent être classés comme rapides ou lents ;
- ⇒ Une transmission FH-SS est rapide, si un symbole d'information est transmis sur plusieurs sauts de fréquence ;
- ⇒ Une transmission FH-SS est lente, si un ou plusieurs symboles d'information sont transmis dans un saut de fréquence.

Technique OFDM

- Quel est le problème majeur des Télécoms ?
 - L'adaptation de l'information à transmettre au canal de propagation.
- Quelles sont les contraintes physiques qui limitent les transmissions dans les communications hauts débits ?
 - Le bruit dû aux imperfections des systèmes et la nature physique des composants ;

- La déformation du signal au cours de la propagation. La transmission d'un train de symboles s'accompagne presque inévitablement d'une dispersion des données dans le temps. Elle est à l'origine de l'interférence entre symboles.
 - Affaiblissement par trajets multiples. En effet, le canal est caractérisé par 03 phénomènes : l'atténuation, l'effet de masque (shadowing), les multitrajets et l'effet Doppler pour le cas d'un récepteur mobile.
- Pourquoi transmettre un signal numérique ?
- Les erreurs de transmission sont réduites en numérisant le signal. Comme un bit ne prend que deux valeurs, la numérisation réduit la probabilité d'erreur...mais ne l'annule pas !
- Qu'est-ce qu'un canal sélectif en fréquence ?
- Il exprime le fait que le signal à transmettre a des composantes fréquentielles qui sont atténuées différemment par le canal de propagation. En d'autres termes, ce phénomène apparaît si le signal possède une bande de largeur de fréquence plus large que la bande de cohérence du canal de propagation. Le signal sera alors déformé lors de la transmission : les données seront dispersées dans le temps, pouvant mener à des interférences entre symboles.
- Que signifie la bande de cohérence ?
- La bande de cohérence d'un canal est définie comme la largeur de bande pour laquelle la réponse fréquentielle du canal peut être considérée comme constante.
- Que signifie le phénomène des trajets multiples ?
- Le problème des multi-trajets est un phénomène par lequel le signal arrive au récepteur par trajectoires multiples attribuables aux réflexions et aux diffractions. Ce phénomène est illustré sur la figure (18).

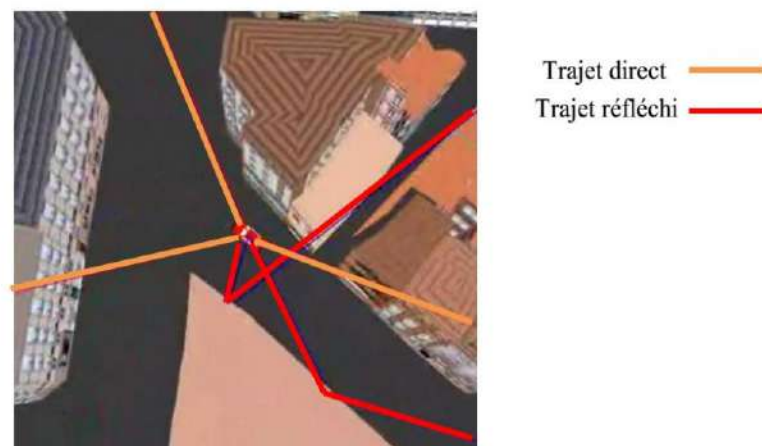


Figure.18. Phénomène des trajets multiples

- Quel est l'effet des Multitrajets ?
 - Modification de l'effet du filtre de mise en forme ;
 - Interférence entre symboles.

- Quel est, dans ce cas, la solution ?
 - Estimer les coefficients du canal de transmission ;
 - Utiliser des filtres égaliseurs.

- Que signifie l'égalisation ?
 - L'égalisation est le procédé qui consiste à compenser l'effet des distorsions des multi-trajets. Pour cela, il faut identifier les coefficients d'atténuation qui modélisent l'effet du canal de propagation $c(t)$, puis retrouver le signal en résolvant le système.

- De quoi dépend la complexité d'un égaliseur ?
 - Elle dépend du nombre de trajets du canal de propagation mais également du type de constellation émis : en effet, les bits sont transmis sous forme de symboles. Le nombre de bits inclus dans chaque symbole désigne la taille de la constellation. Plus cette taille sera grande et plus le débit sera élevé.

- Pourquoi ne peut-on pas augmenter indéfiniment les débits en augmentant la taille de la constellation ?
 - On peut effectivement augmenter le débit (en tant que vitesse de transmission) en augmentant la constellation. Par contre, si l'on parle de débit en tant que nombre de bits par seconde arrivant sans erreur au niveau du récepteur, alors ceci n'est pas possible. En effet, plus la taille de la constellation augmente (à puissance fixée, la puissance est toujours normalisée pour des questions de coût de transmission) et plus les symboles émis ont des valeurs de plus en plus proches. Il est alors difficile au niveau du récepteur de discriminer entre 2 valeurs entachées d'erreurs dues au bruit. Les performances du système en seront alors affectées.

- Par quoi le débit est limité ?
 - Le débit a une limite déterminée par un seuil que l'on appelle la capacité du canal. Le fait de pouvoir transmettre à un débit non nul sans erreur était une idée à contre-courant des travaux scientifiques avant 1949. Il était alors naturel à l'époque de réduire la probabilité d'erreur d'une transmission en réduisant le débit. Ce n'est qu'avec les travaux de Shannon que le codage est apparu comme une issue à cette alternative.

Modulations Multi-porteuses

- ⇒ Dans le cas d'un canal à trajets multiples, les techniques de modulation classiques sont très sensibles à l'interférence entre symboles ISI.

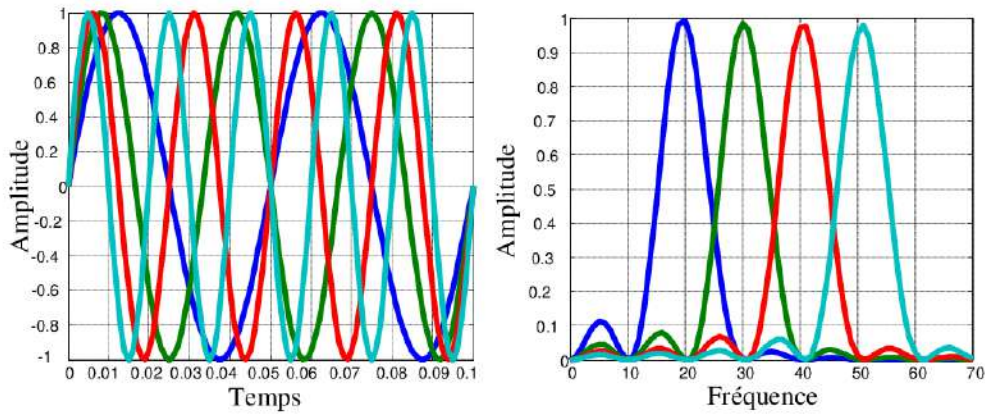
- ⇒ Cette interférence est d'autant plus importante que la durée d'un symbole est petite par rapport à l'étalement du retard (Delay spread) du canal.
- ⇒ L'intérêt des modulations multi-porteuses (Multi-Carrier Modulation - MCM) est de placer l'information dans une fenêtre temps-fréquence telle que sa durée soit bien plus grande que le Delay spread du canal de propagation.
- ⇒ Cette avantage, primordial pour les communications sans-fils, représente en fait une solution pour les différents types de réseaux haut débit sans-fils : réseaux cellulaires, réseaux locaux sans-fils et boucle locale radio.

Utilisation des techniques de modulation multiporteuses

- ⇒ Ces techniques utilisées dans les transmissions à grande vitesse dans les systèmes 3G et 4G et les systèmes de communication sans-fil.
- ⇒ Le principe d'un système de modulation multi-porteuse est de transmettre des données sur plusieurs fréquences porteuses.
- ⇒ Les fréquences sont choisies de manière à ce que l'espacement fréquentiel entre deux porteuses successives soit identique pour toutes les porteuses.
- ⇒ Lorsque le multiplexage fréquentiel obtenu est orthogonal en temps et en fréquence, on parle de modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).

Principe de l'OFDM

- ⇒ L'idée de base de l'OFDM est de partager un signal à large bande en multiples signaux bandes étroites.
- ⇒ Ces signaux bandes étroites sont mathématiquement orthogonaux, c'est-à-dire que l'information est transmise parallèlement en utilisant M recouvrements fréquentiels orthogonaux des bandes étroites. Ainsi, les M données qui étaient auparavant transmises consécutivement à un débit élevé de $\frac{1}{T_d}$, vont être, émises simultanément sur M sous-canaux fréquentiels élémentaires ou sousporteuses modulés à bas débit $\frac{1}{T_0}$;
- ⇒ Chacune des M données est transmise par un symbole de durée T_0 au lieu de $T_d = \frac{T_0}{M}$. La durée d'un symbole est donc multipliée par un facteur M dont le bon dimensionnement doit permettre de minimiser les interférences entre symbole (ISI) tout en conservant le débit de la modulation mono-porteuse initiale de $\frac{1}{T_d}$. Dans le domaine temporel, le signal obtenu se décompose en symboles de durée T_0 résultant de la superposition de M signaux sinusoïdaux de fréquences différentes (figure 19.a).
- ⇒ Dans le domaine fréquentiel, les distorsions du signal introduites par le canal seront limitées car chaque sous-bande sera suffisamment étroite pour pouvoir considérer le canal comme localement plat (figure 19.b).



(a) Domaine temporel

(b) Domaine fréquentiel

Figure 19 Signal OFDM pour 4 sousportuses.

- ⇒ Le signal OFDM peut être facilement généré en utilisant une transformée de Fourier discrète inverse (IDFT).
- ⇒ A la réception, les symboles émis peuvent être retrouvés en appliquant de la même manière une transformée de Fourier discrète directe (DFT) aux échantillons reçus.
- ⇒ Les algorithmes de transformée de Fourier rapide directe (FFT) et inverse (IFFT) permettent une implémentation efficace des DFTs.
- ⇒ La structure du modem OFDM en temps discret est donc simple du point de vue conception car cela revient à mettre dos à dos une IFFT et une FFT comme l'illustre la figure (20).

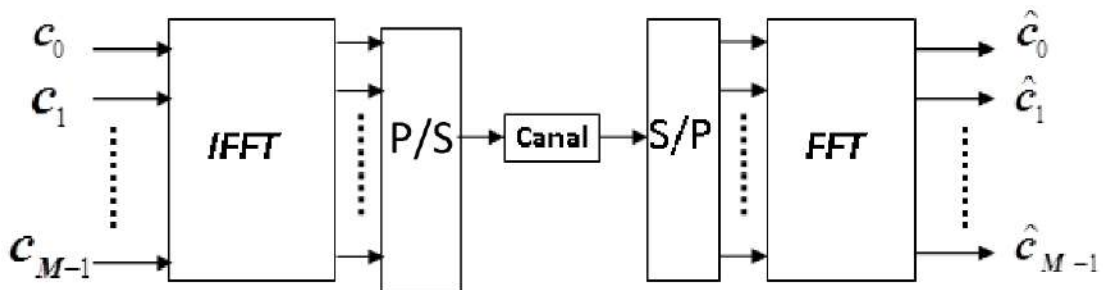


Figure.20. MODEM OFDM

Technique OFDMA

- ⇒ OFDMA est la variante « multi-utilisateurs » du schéma OFDM ;
- ⇒ Dans la OFDMA, un accès multiple est obtenu en attribuant des sous-ensembles de ressources temps-fréquence à différents utilisateurs ;
- ⇒ Cette configuration permet la transmission simultanée de données à partir de plusieurs utilisateurs ;
- ⇒ Dans ce cas, un seul utilisateur n'a pas nécessairement besoin d'occuper toutes les sous-portuses à un moment donné ;

- ⇒ En OFDMA, les ressources radio sont des régions 2D qui sont fonction du temps (un nombre entier de symboles OFDM) et de la fréquence (un nombre de sous-porteuses adjacentes ou non) ;

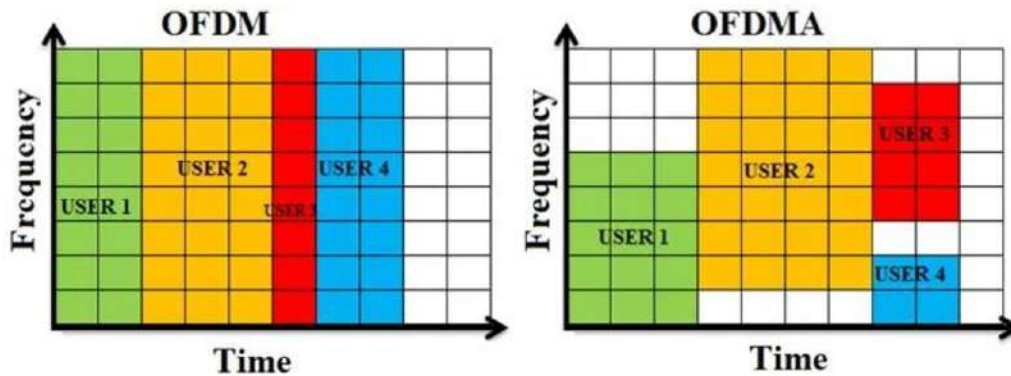


Figure.21. OFDMA Versus OFDM

- ⇒ La figure (22) montre un schéma fonctionnel de transmission OFDMA pour « U » utilisateurs.
- ⇒ Comme cette figure, l'OFDM prend en charge plusieurs utilisateurs (accès multiple) via TDMA uniquement, tandis que l'OFDMA peut prendre en charge les deux en même temps ;
- ⇒ En OFDMA, un symbole OFDM est constitué de sous-porteuses dont le nombre est déterminé par la taille de la FFT ;

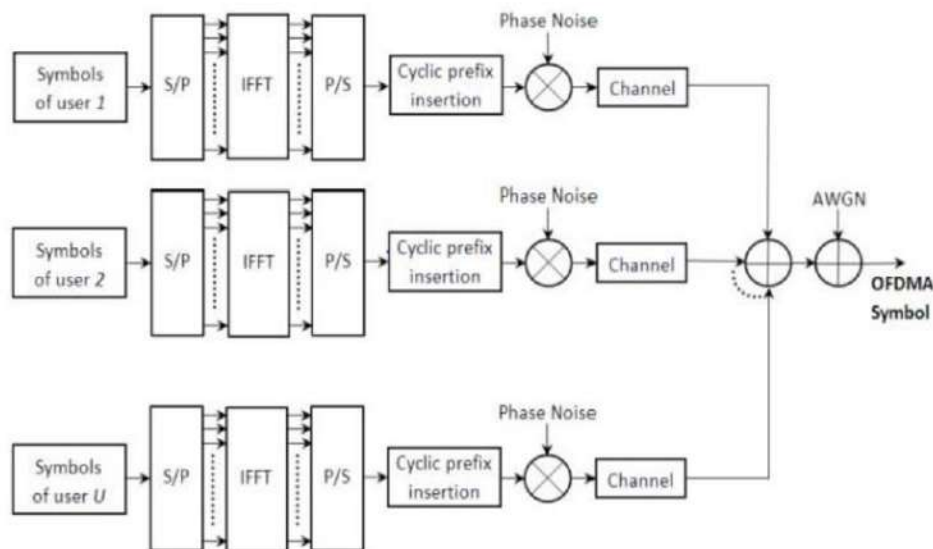


Figure.22. Schéma fonctionnel d'une transmission OFDMA

- ⇒ Il existe plusieurs types de sous-porteuses :

- (1) les sous-porteuses de données utilisées pour la transmission de données,
 - (2) les sous-porteuses pilotes ou de signal de référence utilisées pour l'estimation du canal et la détection cohérente,
 - (3) les sous-porteuses nulles utilisées pour créer des bandes de garde. Ces dernières sont utilisées pour permettre le partage du spectre et pour réduire les interférences des canaux adjacents.
- ⇒ Le nombre de sous-porteuses utilisées (ou occupées) est toujours inférieur à la taille de la FFT ;

Systemes sans-fil et techniques d'accès multiple

Dans le tableau (1), on montre les techniques d'accès utilisées dans les différents systèmes de communications sans-fil.

Tableau 1 Techniques d'accès multiple & systèmes de communications sans-fil

Systeme de communication	Technique d'accès
AMPS	FDMA/FDD
GSM	TDMA/FDD
US Digital Cellular (USDC)	TDMA/FDD
Personal Digital Cellular (Japan)	TDMA/FDD
Cordless Telephone2 (Sans-fil)	FDMA/FDD
DECT (Digital European Cordless Telephone)	FDMA/FDD
W-CDMA (3GPP)	CDMA/FDD CDMA/TDD
CDMA2000 (3GPP2)	CDMA/FDD CDMA/TDD
4G	OFDMA
5G	Combination of OFDMA and CDMA

Avantages du sans-fil

- ⇒ Absence de câbles ;
- ⇒ Facile à configurer ;
- ⇒ Meilleure couverture ou couverture mondiale : il offre une couverture mondiale en fournissant le réseau dans des endroits tels que les zones où le câblage n'est pas possible ;
- ⇒ Flexibilité : le réseau sans-fil est plus flexible et adaptable en comparaison avec le réseau câblé ;
- ⇒ Rentabilité : comme il est facile à installer et ne nécessite pas de câbles, le réseau sans fil est relativement moins cher et est par conséquent très rentable ;
- ⇒ Mobile et transportable : le réseau sans-fil est facile à transporter et à réinstaller à un autre endroit ;
- ⇒ Mobilité : Il a une bonne mobilité d'utilisation.

Inconvénients

- ⇒ Comme la communication se fait à travers un espace ouvert, elle est moins sécurisée ;-
- ⇒ Le réseau manque de fiabilité ;
- ⇒ Réseau plus ouvert aux interférences ;
- ⇒ Augmentation des risques de brouillage ;
- ⇒ La vitesse de transmission est comparativement inférieure ;
- ⇒ Bande passante limitée ;
- ⇒ Les réseaux sans fil peuvent être facilement piratés ;

Allocation du spectre de fréquence

- ⇒ Les ressources spectrales sont limitées ;
- ⇒ Chaque pays a une agence gouvernementale pour contrôler et allouer les ressources spectrales ;
- ⇒ Les ressources spectrales sont contrôlées par plusieurs commissions, les plus importantes sont données comme suit :
 - ❖ L'ITU : International Telecommunications Union ;
 - ❖ FCC: Federal Communications commission ;
 - ❖ ETSI: European Telecommunications standards Institute ;
 - ❖ ANF : Agence Nationale de la fréquence. Pour atteindre ses objectifs et remplir sa mission, l'ANF est dotée des deux (02) commissions spécialisées qui sont :
 - La Commission d'Attribution des bandes de Fréquences (CAF) ;
 - La Commission de Brouillage (CB).

Bandes de fréquences sans Licence

- ⇒ Des bandes de fréquences utilisées gratuitement pour encourager l'innovation et les implémentations de faible coût ;
- ⇒ Des systèmes sans fils ont vu succès grâce à cette bande. Exemple : Bluetooth, Wireless LAN, téléphones sans fils (Voir la figure (23)).



Figure.23. Technologies sans-fil et bande ISM.