

Chapitre2 : Réseaux cellulaires et mobiles : bases des systèmes cellulaires

- Réseaux mobiles : ondes et propagation
- Méthodes d'accès
- Méthodes de transfert des données

Introduction

La téléphonie cellulaire n'est rien d'autre qu'un système de communication sans support matériel ayant pour but d'assurer la communication entre les abonnés mobiles par la présence des stations radios formant ainsi des cellules.

La téléphonie révolutionna nos moyens de communiquer permettant enfin de dialoguer à longue distance. Malgré des débuts difficiles, la téléphonie était devenue au même titre que l'eau courante ou l'électricité un service de base.

Avec les progrès de l'informatique et des codages numériques, une nouvelle génération se profile ; la télécommunication mobile devenant ainsi un service de masse.

Tout au long de ce chapitre, nous allons essayer d'expliquer les généralités et bases des réseaux cellulaires.

1. Réseau cellulaire

Par définition, un réseau cellulaire est un système de télécommunication qui doit répondre aux contraintes de la mobilité de l'abonné dans le réseau, par l'étendue du réseau et par les ondes radio qui lui sont allouées.

Un système de réseau cellulaire couvre l'ensemble d'infrastructures spécialement destinées aux équipements d'acheminement de communication vers les mobiles et où les ondes radio, dans le cas d'un réseau cellulaire servent de lien entre le terminal de l'abonné et l'infrastructure de l'opérateur.

2. Concepts cellulaires**2.1. Définition**

Le concept de cellule est introduit comme une solution à la contrainte de la limitation de la ressource radio (spectres de fréquences).

Une cellule = zone géographique couverte par un émetteur et utilisant une plage de fréquences pour les communications qu'elle couvre.

Ce concept consiste à diviser un territoire en cellules dont chacune est couverte par une station radio ou station de base (BTS) du réseau. Un ensemble de cellules reliées à des stations de contrôle BSC (Base Station Controller). Et ainsi la réutilisation d'une même fréquence que celle des cellules différentes, c'est-à-dire qui sont adjacentes ou sécantes afin d'éviter les phénomènes d'interférences sur le signal utile reçu par le terminal mobile pour la station de base.

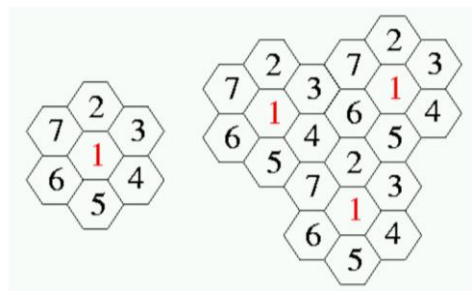


Figure.1: Figure représentant un motif élémentaire (à gauche) et un ensemble de motifs dans un réseau (à droite).

2.2. Représentation des cellules

Le problème est que les cellules circulaires ne peuvent pas être superposées sur une carte sans laisser des zones incouvertes ou sans créer des zones de chevauchement.

L'hexagone est la forme régulière qui ressemble le plus au cercle et que l'on peut juxtaposer sans laisser de zones vides.

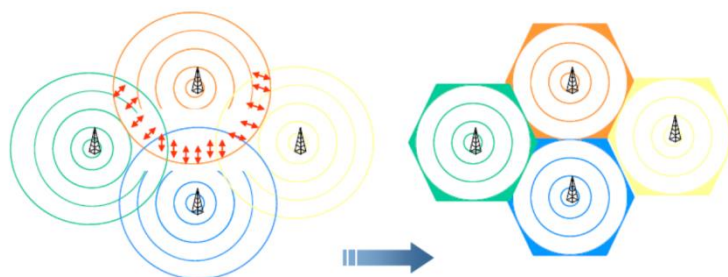


Figure 2 : représentation des cellules circulaires et hexagones

La grille hexagonale permet de respecter les conditions suivantes :

- Taille de cellules identique, donc couverture homogène et répartition à priori homogène du trafic sur chacune des cellules.
- Meilleure couverture et qualité de service .

3. Mécanisme de propagation des ondes radio mobiles

L'onde électromagnétique se propageant rencontre un ou plusieurs obstacles qui vont la réfracter, la réfléchir, la diffracter, la diffuser. Il découle une multitude d'onde retardée, atténuée et déphasée au niveau du récepteur. Les obstacles rencontrés par le signal lors de son trajet de l'antenne d'émission à l'antenne réceptrice agissent différemment sur le signal. En effet la taille des obstacles vis-à-vis de la longueur d'onde du signal, sa nature et sa forme engendre différents phénomènes.

Les trois principaux qui perturbent le signal sont : la réflexion, la diffraction, la diffusion.

a) Réflexion des ondes radio

Une onde peut se réfléchir sur une surface comme le sol, la surface de l'eau, un mur ou une voiture.

On parle de réflexion spéculaire lorsque l'onde se réfléchit comme un rayon lumineux comme elle le ferait sur un miroir.

Une onde dont la fréquence est de l'ordre de quelques mégahertz peut se réfléchir sur une des couches ionisées de la haute atmosphère.

La réflexion d'une onde est plus généralement diffuse, l'onde se réfléchissant dans plusieurs directions ainsi qu'un rayon lumineux frappant une surface mate.



b) Réfraction des ondes radio

Comme un rayon lumineux est dévié lorsqu'il passe d'un milieu d'indice de réfraction n_1 à un autre d'indice n_2 , une onde radio peut subir un changement de direction dépendant à la fois de sa fréquence et de la variation de l'indice de réfraction. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas de la propagation ionosphérique, la réflexion que subit une onde décimétrique dans l'ionosphère est en fait une suite continue de réfractions.

c) Diffraction des ondes radio

Lorsqu'une onde rencontre un obstacle de grande dimension par rapport à la longueur d'onde, celle-ci pourra être arrêtée par cet obstacle. Ce sera le cas d'une colline, d'une montagne, etc... Cependant, dans une certaine mesure, l'onde pourra contourner l'obstacle et continuer à se propager derrière celui-ci, à partir des limites de cet obstacle. Ainsi, une onde ne sera pas entièrement arrêtée par une montagne, mais pourra continuer à se propager à partir du sommet de la montagne, vers la plaine qui se trouve derrière... Ce franchissement de l'obstacle se fera avec une atténuation, parfois très importante.

d) Diffusion des ondes radio

Le phénomène de diffusion peut se produire quand une onde rencontre un obstacle dont la surface n'est pas parfaitement plane et lisse. C'est le cas des couches ionisées, de la surface du sol dans les régions vallonnées (pour les longueurs d'ondes les plus grandes) ou de la surface des obstacles (falaises, forêts, constructions...) pour les ondes ultra-courtes (au-dessus de quelques centaines de mégahertz). Comme en optique, la diffusion dépend du rapport entre la longueur d'onde et les dimensions des obstacles ou des irrégularités à

la surface des obstacles réfléchissants. Ces derniers peuvent être aussi variés que des rideaux de pluie (en hyperfréquences) ou les zones ionisées de la haute atmosphère lors des aurores polaires.

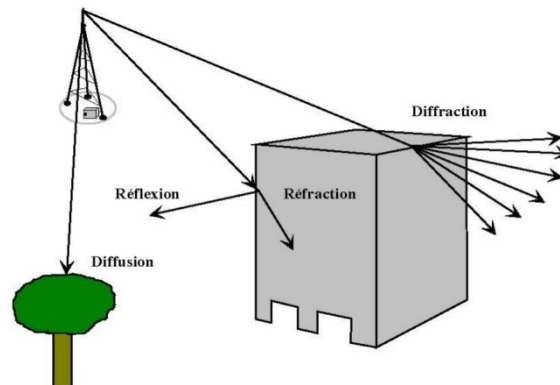


Figure 3: Schéma des différents obstacles lors d'une propagation d'onde.

3.1. Propriétés du canal radio

Entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception le signal subi des pertes de grande, moyenne et petite échelle :

3.1.1. Pertes à grande échelle

Elles définissent les fluctuations de la puissance moyenne mesurée sur un déplacement ou sur un intervalle de temps suffisamment grand. Ce sont des atténuations dues à la puissance parcourue par l'onde : on les appelle Affaiblissement de parcours (AEL "Affaiblissement en Espace Libre") ou Pathloss.

3.1.2. Les pertes à moyenne échelle

Ce sont des variations du canal radio mobile ou atténuation de la puissance du signal due aux obstacles rencontrés : on les appelle "effets de masque " (Shadowing effect).

3.1.3. Les pertes à petite échelle

Ces pertes sont les fluctuations observées sur un intervalle de temps et ou un déplacement suffisamment petit pour négliger les évanouissements à grande échelle. Ce sont des atténuations sont liées au trajet multiple : on les appelle Evanouissements (Fading rapide).

3.2. Les dégradations subies par l'onde radio

L'onde radioélectrique au fur et à mesure qu'elle se propage dans son environnement. Les principales caractéristiques sont :

- Atténuation due à la distance parcourue : **Pathloss(PL)**
- Effets de masques : **Shadowing effect**
- Evanouissements : **Fading rapide** par propagation multi-trajet
- Brouillage dû aux bruits ambiants (provenant d'émissions d'autres systèmes)
- Brouillage dû aux interférences (co-canal et canal adjacent).

On a 2 types d'interférences dans un système radio mobile :

1. **Interférences co-canal** : dues aux émissions d'autres équipements sur la même bande de fréquence.

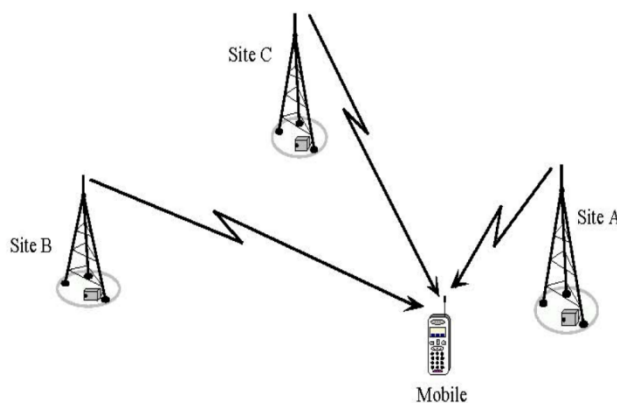


Figure.4 : interférences co-canal

2. **Interférences sur canal adjacent** : dues aux émissions d'autres équipements sur des fréquences adjacentes.

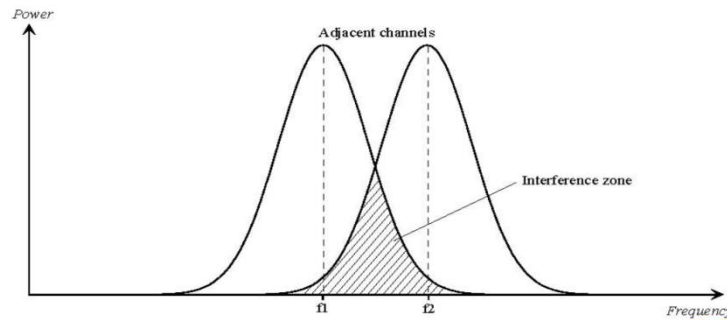


Figure.5:interférences sur canal adjacent

Les caractéristiques de la propagation dépendent :

- Morphologie du terrain
- La hauteur, la nature, la densité des bâtiments
- La densité de la végétation
- et les conditions météorologiques

La plus forte atténuation subie par la puissance est due aux obstacles soient naturelles (sol, arbres), soient artificiels.

Il existe deux conditions de propagation entre émetteur et récepteur :

- **La propagation avec la visibilité directe (line-of-sight : los)** : il n'y a aucun obstacle entre émetteur et récepteur
- **La propagation sans vision directe (non line-of-sight : NLos)** : il s'agit de la propagation d'un ou plusieurs obstacles entre émetteur-récepteur.

4. Méthodes d'accès

Les systèmes de télécommunication mobile étaient initialement conçus en affectant, à chaque couple station de base-terminal mobile, un canal de transmission physique, donc une ressource fréquentielle. Le spectre radio constitue une ressource tellement rare et précieuse, qu'on ne permet pas de garder une connexion permanente entre le terminal mobile et la station de base. La solution est d'utiliser une stratégie de partager cette ressource entre les divers usagers, ce partage doit être optimisé en vue de maximiser la capacité des usagers supportés.

Des techniques d'accès multiple sont alors mises en place pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager efficacement la bande radio disponible. Ces techniques sont divisées en :

– Accès Multiple à Répartition en Fréquence (FDMA)

Accès Multiple à Répartition dans le Temps (TDMA)

Accès Multiple à Répartition de Code (CDMA).

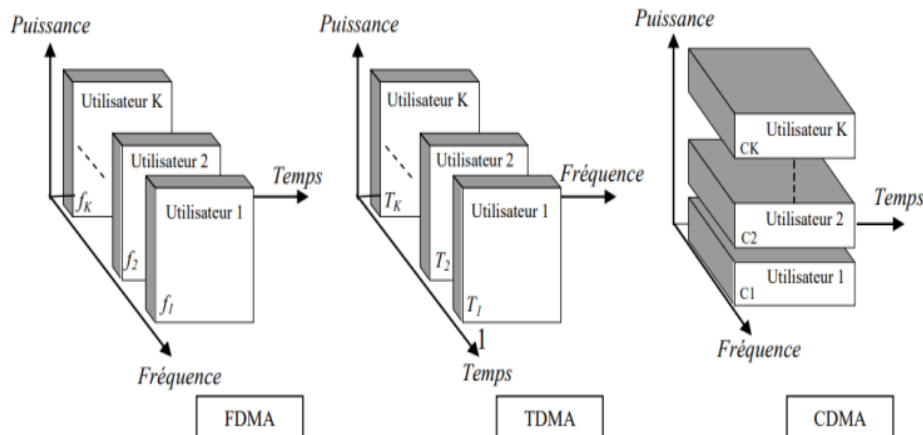
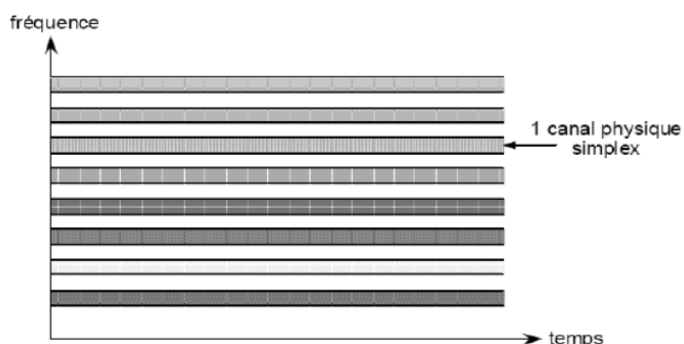


Figure 6: Les différentes techniques d'accès multiple

4.1. Accès Multiple par Répartition de Fréquence (FDMA)

Basée sur la technique de multiplexage, largement utilisée dans les systèmes de communication 1G, le FDMA permet d'allouer à chaque utilisateur un canal avec une bande de fréquence unique. Dans ce cas, un seul utilisateur peut se servir de ce canal pendant la durée d'une communication. La suppression d'Interférence d'Accès Multiple (IAM) est assurée par l'utilisation de fréquences porteuses différentes et séparées par un intervalle fréquentiel prédéfini.



*La bande passante est divisée en sous-bandes (canaux)
 *Un canal supporte 1 seul utilisateur
 * Si un canal FDMA n'est pas utilisé par son utilisateur assigné, il reste idle. \Rightarrow perte de ressources.

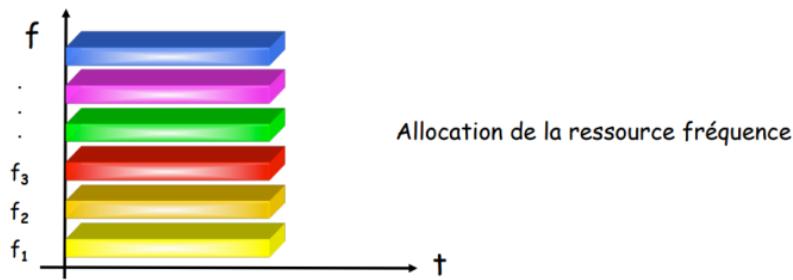


Figure.7 : Accès Multiple par Répartition de Fréquence (FDMA)

Exercice :

Un organisme de régulation des télécommunications doit attribuer des canaux FDMA à trois opérateurs de téléphonie mobile dans une bande de fréquences de 5 MHz. L'opérateur A nécessite 2 MHz de bande passante, l'opérateur B a besoin de 1,5 MHz, et l'opérateur C nécessite 1 MHz. Chaque canal FDMA doit avoir une bande passante de 200 kHz et une garde de bande de 10 kHz de chaque côté pour éviter les interférences.

Questions :

1. Quelle est la bande passante totale disponible pour les canaux FDMA en tenant compte des gardes de bande ?
2. Quel est le nombre maximum de canaux FDMA pouvant être utilisés dans la bande de fréquences allouée ?
3. Proposez un plan de fréquences FDMA pour attribuer des canaux aux trois opérateurs en respectant leurs besoins et en minimisant les gaspillages de fréquences.

4.2. Accès Multiple par Répartition dans le Temps (TDMA)

Beaucoup de systèmes de communication numérique comme le GSM européen utilisent cette technique, le multiplexage en temps consiste à répartir la transmission d'une porteuse sur des intervalles de temps distincts, appelés Times slots, de durée T_{slot} pendant lequel une station mobile (MS) peut communiquer avec la station de base (BS). L'allocation des intervalles de temps aux différents usagers se fait périodiquement (T_{TDMA}) est chacun est affecté un certain

nombre d'intervalle par trame TDMA numérotés par un indice TN . Par conséquent, un canal physique est constitué par la répartition périodique d'un intervalle dans la trame TDMA sur une fréquence donnée. Afin de ne pas engendrer d'IAM il faut respecter strictement l'intervalle de temps accordé pour la transmission.

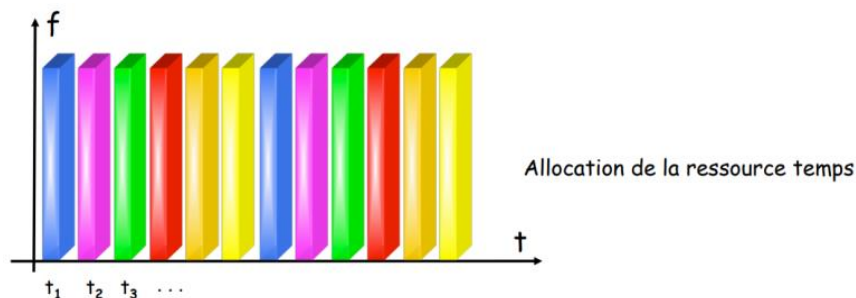
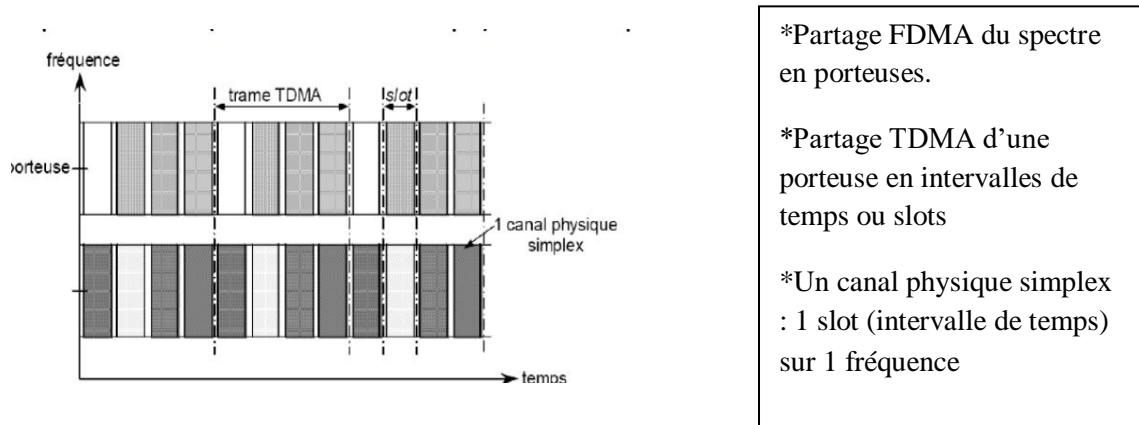


Figure.8 : Accès Multiple par Répartition dans le Temps (TDMA)

Exemple Système GSM :

Une liaison entre un téléphone mobile et une antenne-relais utilise deux canaux de transmission : un pour la voie montante et un pour la voie descendante. Un canal est constitué d'une onde radio (la porteuse) dont la fréquence varie dans une plage de 200 kHz de largeur et pendant un huitième du temps. La figure 9 illustre le principe utilisé : une antenne-relais transmet vers 3 téléphones mobiles, notés P1, P2 et P3, avec une fréquence nominale est de 950 MHz dans l'exemple de la figure 9.

Durant un premier intervalle de temps T1, d'une durée de 577 μ s, la porteuse est utilisée pour transmettre vers le téléphone P1 ; cet intervalle de temps est appelé « time slot » dans la terminologie GSM. Ensuite, le téléphone P2 reçoit pendant le second « time slot » T2. De la même manière, le téléphone P3 recevra les informations qui lui sont destinées pendant le troisième « time slot » T3, et ainsi de suite s'il y a d'autres téléphones mobiles dans la cellule.

Une porteuse peut ainsi être partagée par 8 téléphones mobiles. A la fin du « time slot » T1, le téléphone P1 devra attendre pendant 7 « time slots » avant de recevoir à nouveau. La transmission d'un canal (c'est-à-dire une conversation) se fait donc de manière discontinue ; ce procédé est appelé « multiplexage temporel » (TDMA)

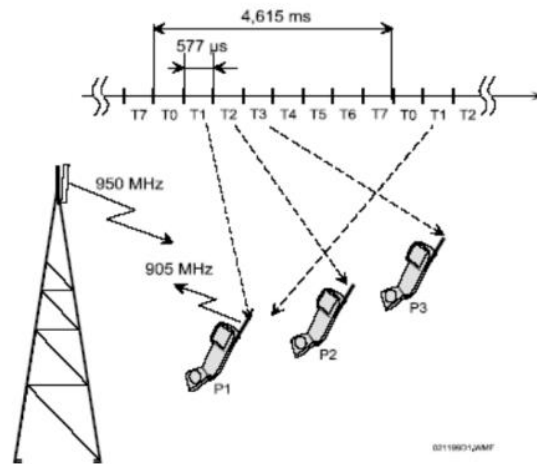


Figure.9 : Etablissement d'une communication entre des mobiles et la station.

Il est à noter que cette transmission « saccadée » n'est pas perceptible pour l'utilisateur, car la transmission pendant un « time slot » s'effectue à un débit 8 fois supérieur à celui correspondant à la restitution du signal, autrement dit, la transmission vers le téléphone P1 s'effectue pendant le « time slot » T1 et la restitution du signal vocal occupe 8 « time slots » (c'est-à-dire 4,615 ms). La figure 10 illustre ce processus.

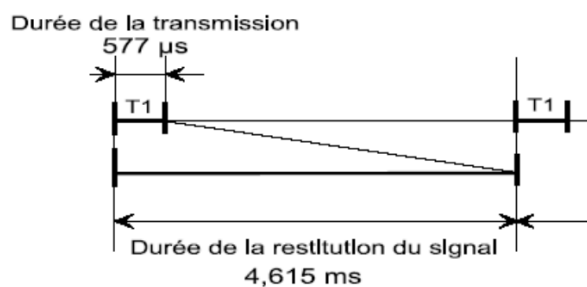


Figure.10: Durée d'une IT (Time slot)

Exercice

Un réseau cellulaire utilise le TDMA avec un canal de fréquence de 200 kHz. Chaque trame TDMA est composée de 8 intervalles de temps (IT) de 0,577 ms chacun. Le trafic vocal est codé à 32 kbps.

Questions :

1. Quelle est la durée d'une trame TDMA ?
2. Quel est le nombre d'utilisateurs pouvant partager simultanément le canal en utilisant le TDMA ?
3. Quelle est la capacité maximale du réseau en termes de nombre d'appels vocaux simultanés par canal ?
4. Quelle est la capacité du réseau en termes de débit binaire total si on suppose que tous les IT sont utilisés pour la transmission vocale ?

4.3. Accès Multiple à Répartition de Code (CDMA)

L'AMRC, plus fréquemment désigné par le signe anglais CDMA, cette technique est basée sur la technologie d'étalement du spectre.

Le CDMA (Code Division Multiple Access) est considéré comme une technologie d'étalement du spectre car il utilise une technique appelée **étalement de spectre par séquence directe (DS-SS)** pour partager la bande passante radio entre plusieurs utilisateurs simultanément. **Cette technique** permet de multiplexer les signaux de plusieurs utilisateurs et de les transmettre sur la même bande et les mêmes intervalles temporels.

Le signal produit par un utilisateur est multiplié par un code, dit code d'étalement, code unique par utilisateur, qui lui permet de transmettre des informations en évitant d'interférer avec les messages provenant d'autres utilisateurs, la réduction de IAM n'est obtenue que dans le cas de l'utilisation de codes strictement orthogonaux.

En effet, contrairement aux techniques TDMA, FDMA, la capacité de multiplexage du CDMA n'est pas limitée par des paramètres physiques (intervalle de temps disponible, fréquence ou bande passante) mais par la capacité à générer un maximum de codes sous la contrainte d'orthogonalité.

La technique d'étalement de spectre est utilisée pour affecter à chaque utilisateur un code, ou séquence, qui permet d'étaler le spectre du signal, après codage, sur toute la largeur de la bande de fréquence disponible.

De ce fait deux caractéristiques importantes caractérisent le CDMA :

- Le signal CDMA peut être confondu avec le bruit du canal et sera donc difficilement détectable par un utilisateur non concerné,

- Le signal étalé est résistant aux évanouissements sélectifs en fréquence

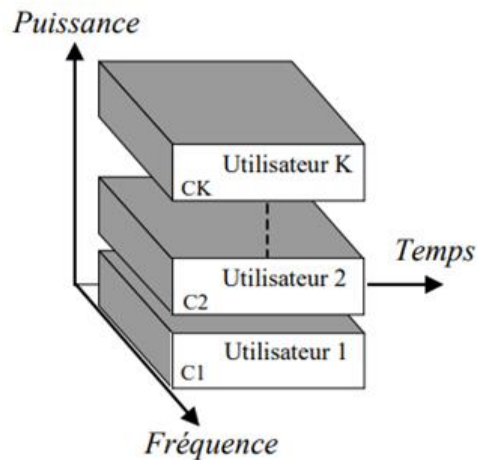


Figure.11 : Accès Multiple à Répartition de Code (CDMA).

Principe de l'étalement de spectre par séquence directe :

1. **Signal original:** Chaque utilisateur commence avec un signal d'information à transmettre, généralement constitué de voix ou de données numériques.
2. **Étalement du spectre:** Le signal d'information est ensuite multiplié par une séquence de code pseudo-aléatoire unique à chaque utilisateur. Cette séquence de code "étale" le signal original sur une bande de fréquences beaucoup plus large que nécessaire pour sa transmission.
3. **Superposition des signaux:** Les signaux étalés de plusieurs utilisateurs sont ensuite superposés et transmis simultanément sur la même fréquence porteuse.
4. **Réception et décodage:** À la réception, le signal reçu est corrélé avec la séquence de code unique de l'utilisateur prévu. Cette corrélation permet d'extraire le signal d'information original de l'utilisateur souhaité tout en supprimant les signaux des autres utilisateurs.

Exemple

Considérez un système CDMA fonctionnant dans une bande passante de 1 MHz. Chaque utilisateur dispose d'un code d'étalement unique de longueur 64 bits et le débit d'information par utilisateur est de 64 kbps.

- Calculez la capacité maximale du système CDMA en nombre d'utilisateurs.

Sachant que:

Le facteur d'étalement d'un système CDMA est égal à la longueur du code d'étalement.

Exercice

Considérons un système DS-CDMA (Direct Sequence Code Division Multiple Access). 4 utilisateurs (A, B, C, D), transmettent simultanément les trains binaires suivants : A {-1} bits, B {1} bits, C {1} bits, D {-1} bits.

Les codes pour chaque utilisateur sont donnés comme les suivants :

A : (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)

B : (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)

C : (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)

D : (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)

Questions :

1. Vérifier l'orthogonalité des codes d'étalement pour les utilisateurs A et B ?
2. Déterminer les messages à envoyer pour chaque utilisateur
3. Trouver le message final étalé à envoyer
4. Retrouver les bits envoyés par les quatre utilisateurs

5. Méthodes de transfert des données

En télécommunication, un circuit de transmission de données représente les moyens (matériel et logiciel) de transférer des informations entre des équipements terminaux .

Un circuit de transmission de données peut transférer de l'information dans :

- a. un sens seulement (**simplex**),
- b. dans n'importe quel sens mais dans un seul sens à la fois (**half duplex**),
- c. dans les deux sens simultanément (**full duplex**).

5.1. Mode de transmission

5.1.1. Transmission en simplexe

Dans certains cas d'échange d'information une partie est toujours émettrice et l'autre est toujours réceptrice. Les données circulent toujours dans le même sens. L'exploitation du canal de transmission est appelée dans ce cas en simplexe.

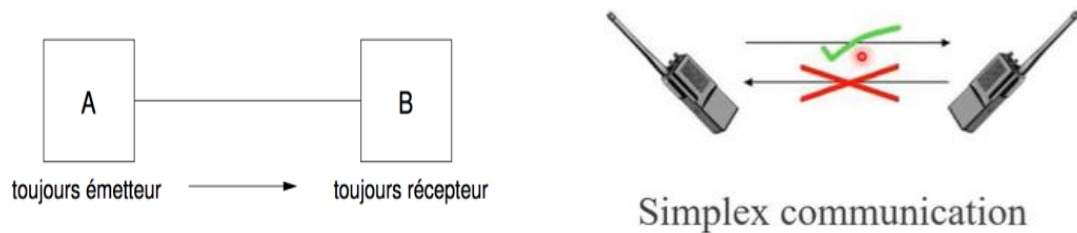


Figure.12 : Transmission en simplexe.

Un exemple de canal simplexe est la radiodiffusion telle la radio FM. Les informations sont envoyées à partir d'une station émettrice et reçues sur un poste. Les auditeurs ne peuvent pas répondre.

5.1.2. Transmission en half duplex

Dans la transmission en semi-duplex (half-duplex), le canal est exploité à l'alternat pour l'émission : les deux parties émettent tous les deux mais pas en même temps.

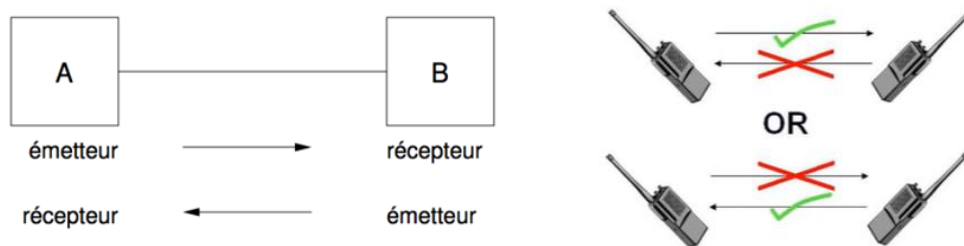


Figure.13 : Transmission en half duplex.

La liaison half-duplex peut être comparée à une communication avec des talkies-walkies, l'un parle (l'autre ne peut parler en même temps) et lorsqu'il lâche le bouton (signal de fin de conversation) l'autre peut parler à son tour.

5.1.3. Transmission en full duplex

La transmission en full-duplex est bidirectionnelle simultanée. Cela est possible en partageant la bande passante et affecter une partie pour un sens et l'autre pour l'autre sens.

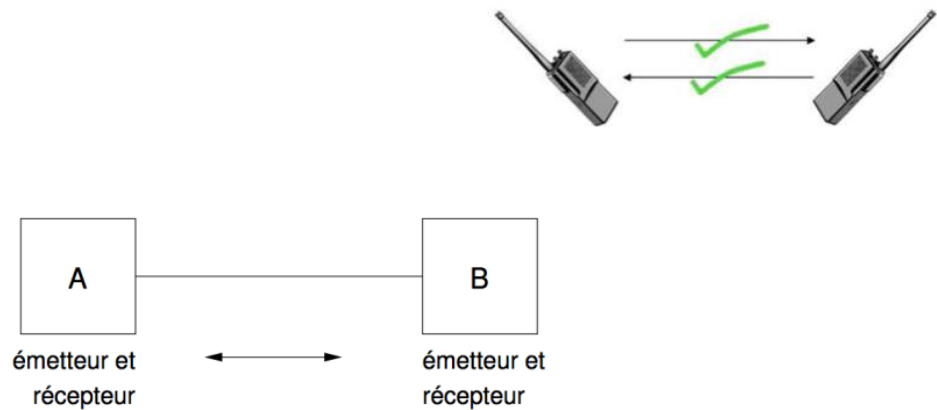


Figure.14 : Transmission en Full duplex

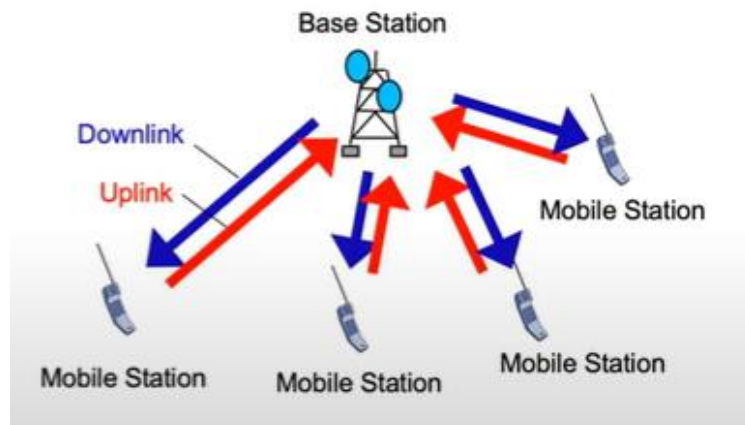
La liaison full-duplex peut être comparée à une conversation téléphonique : les deux interlocuteurs peuvent parler en même temps.

5.1.4. Duplexing

❖ FDD : Frequency Division Duplexing

FDD, signifie que la communication est effectuée sur deux fréquences indépendantes et que les données d'émission et de réception sont simultanées. C'est un système de communication Duplex typique.

FDD offre deux bandes fréquentielles pour chaque utilisateur.
Communication Duplex = 2 canaux Simplex.



Parmi les technologies exploitant le duplexage fréquentiel, on peut citer :

- l'ADSL
- plusieurs protocoles de téléphonie mobile : GSM/DCS 1800, UMTS, CDMA2000 et le LTE (variante FDD) ;

➤ **Avantages:**

- Offre une bonne qualité de voix et de données.
- Technologie mature et fiable.

➤ **Inconvénients:**

- Nécessite deux fois plus de spectre que le TDD.
- Moins flexible pour l'allocation des ressources.

Exemple:

- Imaginez que vous êtes en train de passer un appel téléphonique sur votre smartphone. Pendant que vous *parlez* (uplink), vous transmettez votre voix sur la bande de fréquences uplink. Simultanément, vous *entendez* la voix de la personne à l'autre bout (downlink) qui vous est transmise sur la bande de fréquences downlink.

❖ **TDD : Time Division Duplexing**

TDD offre des times slots (au lieu de bandes fréquentielles) pour le Downlink et l'Uplink. La communication est faite sur une seule fréquence, mais les données d'émission et de réception sont faites à des moments différents. Cette méthode de communication utilise le système Half Duplex. Utilisé en Bluetooth et Mobile WiMAX.

En résumé, TDD est une technologie de duplexage plus souhaitable qui permet aux opérateurs de système de tirer le meilleur parti de leur investissement dans l'équipement de spectre et de télécommunication, tout en répondant aux besoins de chaque client individuel.

- La bande de fréquence est **divisée en trames temporelles** (time slots).
- Les **trames impaires** sont allouées à la **liaison montante (uplink)**, permettant à l'équipement utilisateur (UE) de transmettre des données vers la station de base (BS).

- Les **trames paires** sont allouées à la **liaison descendante (downlink)**, permettant à la station de base de transmettre des données vers l'équipement utilisateur.



Exemple de TDD:

- Imaginez que vous êtes en train de naviguer sur internet sur votre téléphone portable.
- Pendant la **trame impaire**, vous envoyez une requête au serveur (uplink).
- Pendant la **trame paire suivante**, vous recevez les données du serveur (downlink).

Applications du TDD:

Le TDD est de plus en plus utilisé dans les **réseaux mobiles de nouvelle génération (5G)** et dans d'autres applications telles que les communications machine-à-machine (M2M) et l'internet des objets (IoT) en raison de son efficacité spectrale et de sa flexibilité