

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

* DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE *



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

Mémoire de fin d'études

*En vue de L'obtention du Diplôme de MASTER en Electronique
Option : Télécommunications*

Thème

**Etude et simulation de la technique
TDOA pour la géolocalisation dans le
réseau CDMA**

Réalisé par :

M^r. BENHAMOUCHE Mourad

Encadré par :

Mme MEZHOUD Naima

Soutenu devant le jury composé de:

Mme BELLAHCENE Nora

Melle BOUZERA Naima

Remerciements

Je remercie dieu pour le courage, la patience et la santé qui m'a été utiles tout le long de mon parcours.

Je tiens avant d'aborder le développement de ce rapport, à remercier ma promotrice Madame MEZHOUD pour les efforts qu'elle a déployés, les conseils qu'elle n'a cessés de me prodiguer.

Je n'aurai garde d'oublier dans ces remerciements les membres du jury qui m'ont honorés par leur présence, et d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à faciliter la tâche de mon travail, en prodiguant généralement leur aide accompagnée de sympathie et d'encouragements trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.



Je tiens à dédier ce travail :

À mes très chers parents.

À mes deux frères.

À mes grands parents.

À mes oncles, tantes, cousins et cousines.

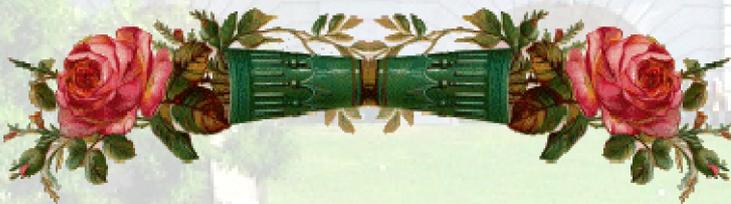
À mes chers Amis (e) qui m'ont énormément aidé. SIMONE WEIL a écrit : « L'amitié ne se cherche pas, ne se rêve pas, ne se désire pas, elle s'exerce » chose qu'ils aient su faire, merci.

À tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

À tous les enseignants du département génie électrique en particulier ma promotrice, président et les membres de jury.

À toute personne qui a contribué de près ou de loin à réaliser ce travail.

MOURAD



Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I: Le réseau CDMA

I.1	Introduction	2
I.2	Propagation dans un environnement radio mobile	2
I.2.1	Atténuation due aux effets de masques	3
I.2.1.1	Vision direct (in-line-of-sight).....	3
I.2.1.2	Non-visibilité (non-line-of-sight)	3
I.2.2	Atténuation due aux arbres	3
I.2.3	Trajets multiples (multipaths).....	3
I.2.4	Brouillages (bruits).....	4
I.3	CDMA et étalement de spectre.....	4
I.3.1	Principe de l'étalement de spectre	4
I.3.2	Principe du CDMA.....	5
I.3.3	Introduction aux différentes techniques CDMA et à leurs caractéristiques	8
I.3.3.1	Accès multiple par répartition de codes à saut de fréquence	9
I.3.3.2	Accès multiple par répartition de code à séquences directes.....	10
I.4	Les codes d'étalement	11
I.4.1	Les Codes orthogonaux	12
I.4.1.1	Les codes de Walsh	12
I.4.2	Les séquences pseudo-aléatoires PN	13
I.4.2.1	Les séquences de Gold	13
I.4.3	La modulation de l'information.....	14
I.5	Conclusion.....	16

Chapitre II : Les techniques de géolocalisation

II.1	Introduction	17
II.2	Les Techniques de localisation et positionnement	17
II.2.1	Les Techniques basés sur les systèmes satellitaires	18
II.2.1.1	Le système GPS.....	18
II.2.1.2	Les alternatives au système GPS	19
II.2.1.2.1	GLONASS.....	19
II.2.1.2.2	GALILEO.....	20
II.2.2	Les Techniques basée sur les réseaux mobiles	20
II.2.2.1	Localisation par réseaux GSM	21
II.2.2.2	Localisation par réseaux UMTS	22
II.2.2.3	Les techniques de localisations associés aux réseaux GSM et UMTS	23
II.2.2.3.1	La localisation à la cellule ou « Cell ID »	23
II.2.2.3.2	La localisation par temps d'arrivée ou trilatération.....	24
II.2.2.3.3	La technique de localisation Uplink Time of Arrival (U-TDAO).....	24
II.2.2.3.4	La technique Enhanced Observed Time Difference (O-OTD).....	25
II.2.2.3.5	La localisation par direction d'arrivée.....	27
II.2.2.3.6	La localisation par fingerprinting	28
II.2.3	Synthèses sur les principales techniques de localisations.....	29
II.3	Les principales sources d'erreurs de localisation	30
II.3.1	Phénomène de multi-trajets	30
II.3.2	La propagation NLOS (sans visibilité directe)	31
II.3.3	Interférences Co-canal.....	31
II.4	Conclusion.....	32

Chapitre 3 : Simulation de la technique TDOA

III.1	Introduction	33
III.2	Localisation par les temps de retards.....	33
III.2.1	Temps d'arrivée du signal (TOA- Time Of Arrival).....	33
III.2.2	La différence de temps d'arrivée du signal (TDOA)	35
III.2.3	Modèle mathématique de la technique de corrélation croisée généralisé	36
III.2.4	Formulation mathématique des équations hyperboliques.....	37
III.2.5	Algorithmes proposées pour la résolution du système d'équations hyperboliques	38
III.2.5.1	Méthode de Chan.....	38
III.2.5.2	Méthode des séries de Taylor	38
III.2.5.3	Méthode de Fang	39
III.3	Etude du Modèle de simulation	39
III.3.1	Modèle du simulateur CDMA (liaison montante).....	39
III.3.2	Configuration des stations de base	40
III.3.3	Modèle du signal reçu	41
III.3.4	Procédure de localisation de position	42
III.4	Résultats de simulations	42
III.4.1	Simulation dans un environnement macro et micro-cellulaire	43
III.4.1.1	Effet de la distance entre le mobile et la station de base principale	43
III.4.1.2	Effet du taux d'échantillonnage (Nsamp).....	44
III.4.1.3	Effet de la période binaire (Tb)	45
III.4.2	Analyse des résultats obtenus	46
III.4.2.1	Méthode de Taylor	46
III.4.2.2	Méthode de Chan.....	47
III.5	Conclusion.....	47
	Conclusion générale	48

Abréviations

3GPP	:	3rd Generation Partnership Project
A-GPS	:	Assisted GPS
AOA	:	Angle Of Arrival
AWGN	:	Additive White Gaussian Noise
BPSK	:	Binary Phase Shift Keying
BS	:	Base Station
BSC	:	Base Station Controller
BSS	:	Base Station Subsystem
BTS	:	Base Transceiver Station
CAN	:	Convertisseur Analogique Numérique
CDMA	:	Code Division Multiple Access
Cell-ID	:	Cell Identification
D-GPS	:	Differential Global Positioning System
DS	:	Direct Sequence
E112	:	Enhanced 112
E911	:	Enhanced 911
E-OTD	:	Enhanced Observed Time Difference
FDMA	:	Frequency Division Multiple Access
FFH	:	Fast Frequency Hopping
FH	:	Frequency Hopping
GCC	:	Group Call Control
GLONASS	:	Global Navigation Satellite System
GMLC	:	Gateway Mobile Location Centre
GPS	:	Global Positioning System
GSM	:	Global System for Mobile Communication
HLR	:	Home Location Register
IS-95	:	Interim Standard 95
LCS	:	LoCation Service
LMU	:	Location Measurement UNIT
MAI	:	Multiple Access Interface
MLLSR	:	Maximal Length Linear Shift Register Sequences
MS	:	Mobile Station
NLOS	:	Non-Line-Of-Sight

Abréviations

NoI	:	N umber O f I nterferer
NSS	:	N etwork S ecurity S ervices
OVSF	:	O rthogonal V ariable S preading F actor
PA	:	P ower A mplifier
PLMN	:	P ublic L and M obile N etwork
PN	:	P seudo N oise
QoS	:	Q uality of S ervice
QPSK	:	Q uadrature P hase S hift K eys
RTD	:	R ound T ime D ifference
RTT	:	R ound T ime T rip
SF	:	S preading F actor
SFH	:	S low F requency H opping
SMLC	:	S erving M obile L ocation C entre
SNR	:	S ignal-to- N oise R atio
SRNC	:	S erving R adio N etwork C ontroller
TDMA	:	T ime D ivision M ultiple A ccess
TDOA	:	T ime D ifference O f A rrival
TEB	:	T aux d' E rreurs B inaires
TOA	:	T ime O f A rrival
UE	:	U ser E quipment
UMTS	:	U niversal M obile T elecommunications S ystem
U-TOA	:	U plink- T ime O f A rrival
UTRAN	:	U niversal T errestrial R adio A ccess N etwork
VLR	:	V isitor L ocation R egister
WDM	:	W avelength- D ivision M ultiplexing

LISTES DE FIGURES

Figure I.1	:	Propagation par trajets multiples	4
Figure I.2	:	Transmission numérique classique et à spectre étalé	5
Figure I.3	:	Schéma-bloc d'un émetteur CDMA	6
Figure I.4	:	Le CDMA vu comme un filtrage linéaire	6
Figure I.5	:	Illustration du principe de l'étalement (SF=8)	7
Figure I.6	:	Autocorrélation d'un fragment de séquence de Gold de 256	8
Figure I.7	:	Effet de l'étalement de spectre sur la présence d'un brouilleur	8
Figure I.8	:	les différentes techniques CDMA	9
Figure I.9	:	Schéma d'un codage SFH-CDMA (à saut de fréquence lent ^o)	9
Figure I.10	:	Schéma d'un codage FFH-CDMA (à saut de fréquence rapide)	10
Figure I.11	:	Schéma d'un codage CDMA par séquence directe (DS-CDMA)	11
Figure I.12	:	Schéma générique d'un registre à décalage à n états	13
Figure I.13	:	Configuration d'un générateur de codes Gold	14
Figure I.14	:	Voie montante UMTS	15
Figure I.15	:	Exemple d'une chaîne d'émission utilisant la modulation QPSK	15
Figure II.1	:	Structure du réseau GSM pour les applications de localisation	21
Figure II.2	:	Structure du réseau UMTS pour les applications de localisation	22
Figure II.3	:	Principe de la localisation à la cellule	23
Figure II.4	:	détecteur TDOA	25
Figure II.5	:	classes de LMU	26
Figure II.6	:	Schéma de description de la technique E-OTD	27
Figure II.7	:	Principe de la localisation AOA	28
Figure II.8	:	Synthèse des principales techniques de localisation en espace libre	30
Figure II.9	:	Illustration de la propagation multi-trajets	30
Figure II.10	:	Multi-trajets en environnement NLOS	31
Figure II.11	:	Interférences co-canal	32
Figure III.1	:	Temps d'arrivée du signal (TOA)	34
Figure III.2	:	synchronisation de la technique TOA	34
Figure III.3	:	Différence de temps d'arrivée du signal (TDOA)	36
Figure III.4	:	schéma simplifié d'une chaîne de transmission CDMA	40
Figure III.5	:	configuration trois stations de base	41
Figure III.6	:	calcul des retards de propagations	42
Figure III.7	:	procédure d'estimation de position	42
Figure III.8	:	Effet de la distance entre le mobile et la station de base principale	44
Figure III.9	:	Effet du taux d'échantillonnage(N_{samp})	45
Figure III.10	:	Effet de la période binaire (T_b)	46

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation étendue des réseaux téléphoniques sans fil a donné naissance naturellement à l'idée de fournir des services en fonction de la position de l'utilisateur : un besoin de localisation est donc apparu. L'information sur la position a été, dans un premier temps, utilisée pour la sécurité des usagers (par exemple, l'assistance aux personnes en danger). Elle a, ensuite, servi pour une utilisation optimale des services proposés sur le réseau tels que l'aide à la navigation. La qualité de ces services est étroitement liée à la précision de positionnement. Un intérêt considérable s'est alors développé au sein des communautés scientifique et industrielle pour les techniques de géolocalisation.

De nos jours le partage du spectre et le partage temporel des ressources font partie intégrante du dimensionnement du réseau. Ces partages résultent de procédés de multiplexage qui consistent à combiner plusieurs signaux pour les transmettre sur un même support. La technique d'accès multiple par répartition de code ou Code Division Multiple Access (CDMA) est déjà largement utilisée dans le domaine radiofréquences où elle apporte un accès multiple et un partage des ressources.

La méthode TDOA est une technique de géolocalisation, qui a été utilisée à des fins de radiolocalisation dans certaines applications de défense et, plus récemment, dans certaines applications spécifiques comme la localisation de téléphones cellulaires mobiles pour des interventions urgentes (incendie, ambulance, etc.).

Dans ce mémoire nous allons décrire les principales étapes de geolocalisation dans un système CDMA avec la méthode TDOA, et mettre en œuvre la simulation. Notre étude s'est donc structurée autour de trois chapitres que nous allons détailler par la suite.

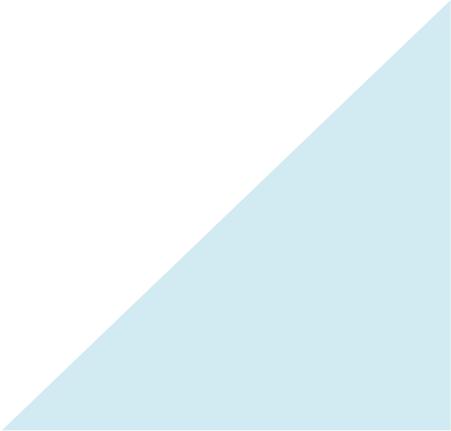
Le premier chapitre est consacré à l'étude d'une chaîne de transmission CDMA, cela inclut le principe de l'étalement de spectre par séquence directe 'DS-CDMA'.

Le deuxième chapitre présente les différentes techniques de géolocalisation, on distingue deux types de geolocalisation, par satellites, et par réseaux cellulaires, les principales sources d'erreurs dans les systèmes sans fil seront décrites a la fin du chapitre.

Dans troisième chapitre on présente une structure du modèle de simulation pour la localisation de position avec la technique TDOA dans un réseau CDMA, puis on effectue plusieurs simulations sous différentes conditions.

Chapitre I

Le réseau CDMA



I.1 Introduction

Les systèmes de téléphonie mobile de la troisième génération (3G) utilisent la technique d'accès multiples CDMA basée sur l'étalement de spectre. Cette technique offre une solution plus flexible, par rapport à celles des deux techniques TDMA et FDMA, et surtout un débit utilisateur beaucoup plus important, due à la largeur de bande allouée au signal émis, permettant ainsi des services multimédia très attractifs. En plus, l'étalement du spectre possède des qualités très avantageuses, telles que la résistance au brouillage intentionnel et surtout une parfaite protection contre l'interception de la communication par des intrus [1].

Dans ce chapitre, nous présentons les notions essentielles permettant de comprendre et d'appréhender le comportement du canal radio-mobile, puis nous allons présenter le principe de l'étalement de spectre, les différentes techniques CDMA et leurs caractéristiques

À la fin du chapitre une liste de codes d'étalements seront examiner, et on va inclure le modèle de modulation pour les systèmes DS-CDMA [2].

I.2 Propagation dans un environnement radio mobile

Le canal de transmission radio-mobile est sans doute l'un des supports médias de communication les plus variables et les plus incontrôlables. Les ondes radioélectriques, parce qu'elles se propagent en traversant l'espace, sont sujettes aux nombreuses irrégularités de morphologie du terrain, des caractéristiques électromagnétiques, de température, d'humidité, du milieu traversé... etc. C'est pour cela que, contrairement aux transmissions sur lien fixe (câble en cuivre ou fibre optique par exemple) où les caractéristiques du milieu sont contrôlées, les transmissions sur lien radio-mobile ont pour propriété de fluctuer en temps et en espace, souvent avec des variations très importantes.

En parcourant un trajet entre l'émetteur et le récepteur, le signal transmis est sujet à de nombreux phénomènes dont la plupart ont souvent un effet dégradant sur la qualité du signal. Cette dégradation se traduit en pratique par des erreurs dans les messages reçus qui entraînent des pertes d'informations pour l'utilisateur ou le système. Les dégradations du signal dues à la propagation en environnement mobile peuvent être classées en différentes catégories dont les principales sont :

- Les pertes de propagation dues à la distance parcourue par l'onde radio, ou l'affaiblissement de parcours (pathloss).
- Les atténuations de puissance du signal dues aux effets de masques (shadowing) provoqués par les obstacles rencontrés par le signal sur le trajet parcouru entre l'émetteur et le récepteur.
- Les atténuations de puissance du signal dues aux effets induits par le phénomène des trajets multiples.
- Les brouillages dus aux interférences créées par d'autres émissions. Ce type de pertes est très important dans les systèmes à réutilisation de fréquences.

- Les brouillages dus au bruit ambiant provenant d'émissions d'autres systèmes, par exemple.

I.2.1 Atténuation due aux effets de masques

L'atténuation la plus forte que peut subir la puissance du signal est due aux obstacles naturels ou artificiels. Cet effet a pour dénomination « effet de masque » (shadowing effect). La puissance du signal va donc varier en fonction du milieu de propagation. Plus le trajet entre l'émetteur et le récepteur contient des obstacles, plus l'atténuation du signal à la réception sera importante.

Une distinction importante apparaîtra donc selon que l'ensemble émetteur- récepteur est en condition de :

I.2.1.1 Vision direct (in-line-of-sight)

Cas où aucun obstacle n'est rencontré sur le trajet direct (ou ligne droite) entre l'émetteur et le récepteur.

I.2.1.2 Non-visibilité (non-line-of-sight)

Cas de l'inexistence de trajet direct. L'effet de masque donne lieu à des évanouissements du signal qualifiés de lents (slow fading) car variant lentement dans le temps et dans l'espace.

I.2.2 Atténuation due aux arbres

Les arbres ont un effet atténuant important sur le signal radio. Dans les zones urbaines où les arbres sont peu nombreux, leurs effets sont négligeables. L'atténuation due aux arbres varie en fonction de leur hauteur, forme et densité, de la saison, de l'humidité ambiante, etc.

I.2.3 Trajets multiples (multipaths)

Comme schématisé par la figure (I.1), une onde radio se propage dans tout l'espace, elle va être réfléchié ou absorbée par les obstacles rencontrés. En zone urbaine, les ondes réfléchies seront naturellement en nombre beaucoup plus important qu'en zone rurale car le nombre de réflecteurs y est plus important. L'onde radio peut en effet se réfléchir sur tout type d'obstacle : montagne, bâtiment, camion, avion, discontinuité de l'atmosphère ...etc.

La réflexion sur un bâtiment dépend de la hauteur, de la taille, de l'orientation du bâtiment et des directions des trajets de l'onde radio. Dans certains cas, le signal réfléchi est très fortement atténué alors que dans d'autres, presque toute l'énergie radio est réfléchié et très peu est absorbée (cas d'un réflecteur quasi parfait), Les réflexions multiples peuvent provoquer donc plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur (multipath propagation). Elles ont pour conséquences deux effets : l'un positif, l'autre négatif [5].

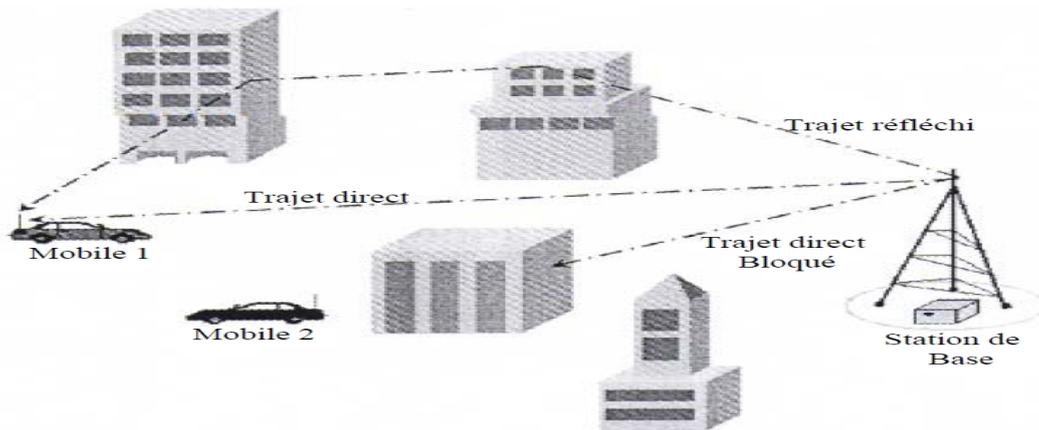


Figure I.1 : Propagation par trajets multiples

I.2.4 Brouillages (bruits)

Les sources de bruit peuvent être classées en deux catégories principales, les sources de bruit situées à l'extérieur du système de traitement d'une part et les sources de bruit interne au système, créant un bruit propre indépendant des conditions extérieures, d'autre part. Parmi les sources de bruit internes, on distingue les perturbations de type impulsionnel engendrées par des commutations de courant dans les circuits logiques, les comparateurs, les interrupteurs électroniques etc..., et le bruit de fond produit dans les câbles et les composants électroniques par des mécanismes statistiques électriques.

Alors que les influences des bruits du premier groupe peuvent être réduites, voire éliminées, le bruit de fond est malheureusement irréductible. Il résulte pour l'essentiel du déplacement brownien des particules électriques en équilibre thermodynamique ou sous l'influence des champs appliqués. Ce type de bruit est assimilable à un processus stationnaire qui est caractérisé par trois composantes principales qui sont :

- Le bruit thermique (thermal noise).
- Le bruit de grenaille (shot noise).
- Le bruit additif de basse fréquence.

I.3 CDMA et étalement de spectre

Le CDMA est une méthode d'accès multiple à un médium de communication par répartition de code. C'est-à-dire, plusieurs usagers ont accès à un canal commun et peuvent l'utiliser simultanément jusqu'à une certaine limite d'usagers actifs définie par la tolérance (capacité) du système. Il existe deux autres systèmes d'accès multiples très commun:

- FDMA: l'accès multiple par répartition en fréquence.
- TDMA: l'accès multiple par répartition dans le temps.

I.3.1 Principe de l'étalement de spectre

Le principe de l'étalement de spectre, quelle que soit la méthode utilisée, repose sur le codage de l'information à transmettre avec une séquence pseudo-aléatoire, connue seulement des utilisateurs.

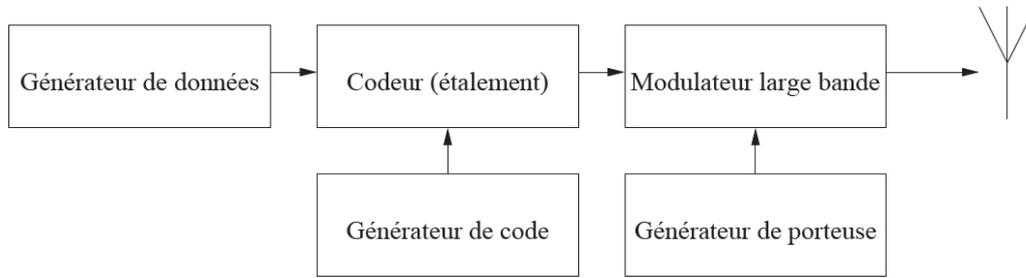


Figure I.3 : Schéma-bloc d'un émetteur CDMA

L'opération effectuée est la suivante :

$$\forall k \in [0, N - 1], \forall i \in [0, SF - 1], C_{k \times SF + i} = b_k \cdot d_i$$

Cette opération est appelée étalement, et avec des formes d'onde en lieu et place des séquences binaires, elle s'écrit :

$$U_T(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq t < T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.1)$$

$$b(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} b_k \cdot U_T(t - kT) \quad (1.2)$$

$$d(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{SF-1} d_n \cdot U_{Tc}(t - nTc - kT) \quad (1.3)$$

$$c(t) = b(t) \cdot d(t) \quad (1.4)$$

La même opération peut être perçue comme un filtrage linéaire. En effet, il suffit d'une part de remplacer la suite de créneaux $b(t)$ par une suite de Diracs $b'(t)$ et d'autre part de considérer un filtre G dont la réponse impulsionnelle $g(t)$ est égale à une période du code $d(t)$ pour retrouver un processus de filtrage linéaire, comme indiqué figure (I.4).

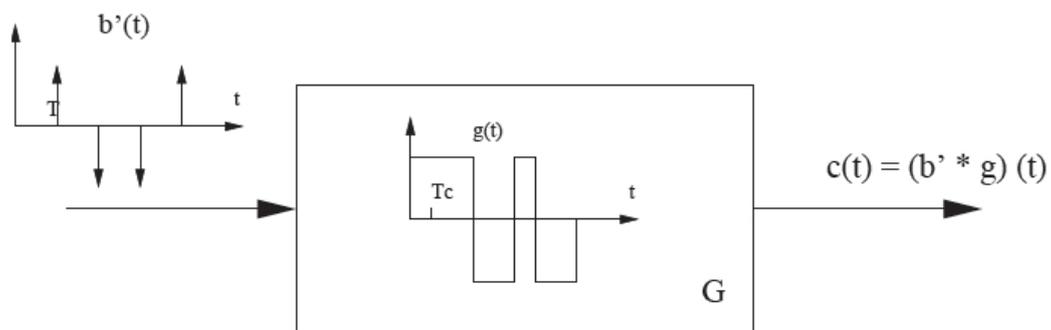


Figure I.4 : Le CDMA vu comme un filtrage linéaire

L'équation d'un tel filtrage est la suivante :

$$b'(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} b_k \cdot \delta(t - kT) \quad (1.5)$$

$$g(t) = \sum_{n=0}^{SF-1} d_n \cdot U_{Tc}(t - nTc) \quad (1.6)$$

$c(t) = (b' * g)(t)$, représente la convolution.

SF est appelé le facteur d'étalement, car à un symbole correspondent SF chips. La séquence $\{d_n\}_{n [0, SF-1]}$ est appelée séquence d'étalement, ou encore séquence étalante. Un exemple de passage des symboles aux chips avec un facteur d'étalement $SF = 8$ est donnée figure (I.5).

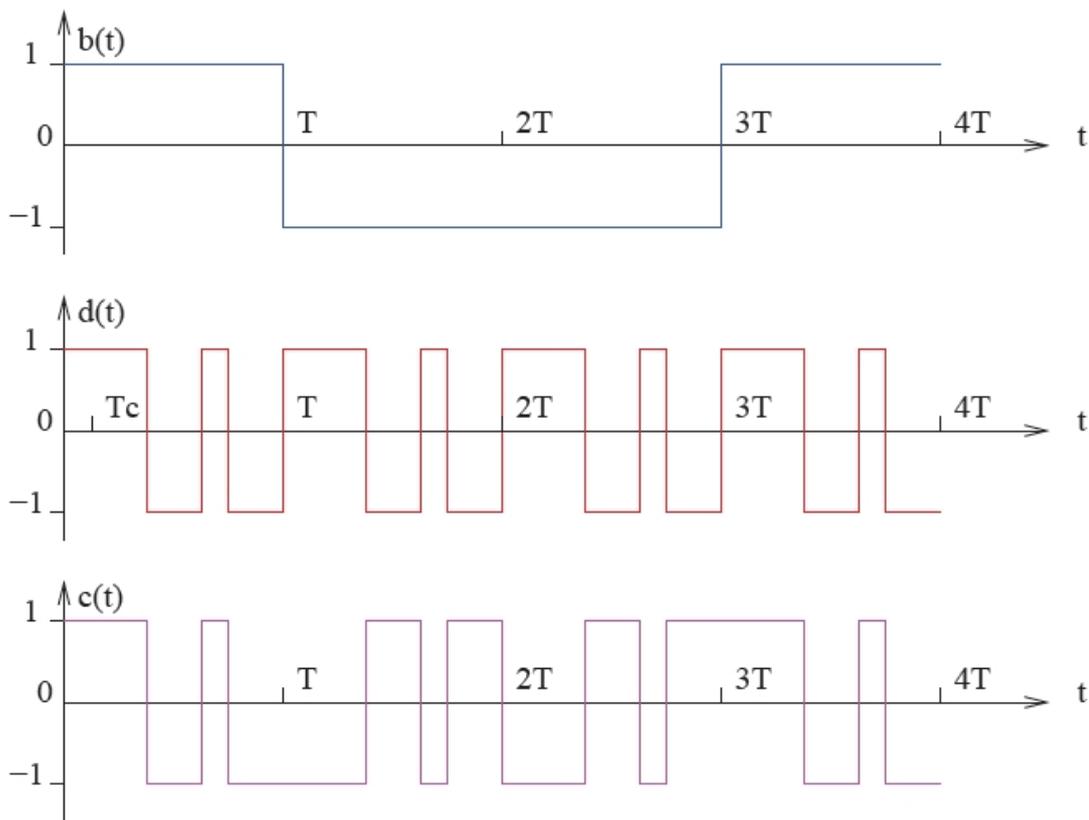


Figure I.5 : Illustration du principe de l'étalement ($SF=8$)

Le choix des séquences d'étalement n'est pas anodin. En effet, pour conférer au signal étalé les caractéristiques spectrales d'un bruit blanc, il est d'usage de choisir des séquences pseudo-aléatoires particulières. Les séquences de longueur maximale, ou séquences MLLSR (*Maximal Length Linear Shift Register Sequences*).

D'autres familles de séquences binaires utilisables dans le cadre du CDMA les séquences de Gold, de Kasami ou encore de Walsh-Hadamard sont utilisées. Ces

familles de séquence ont en commun des fonctions d'autocorrélation très étroites, présentant un pic élevé en 0, et des fonctions d'intercorrélation très faibles relativement à la hauteur du pic d'autocorrélation, comme indiqué figure (I.6).

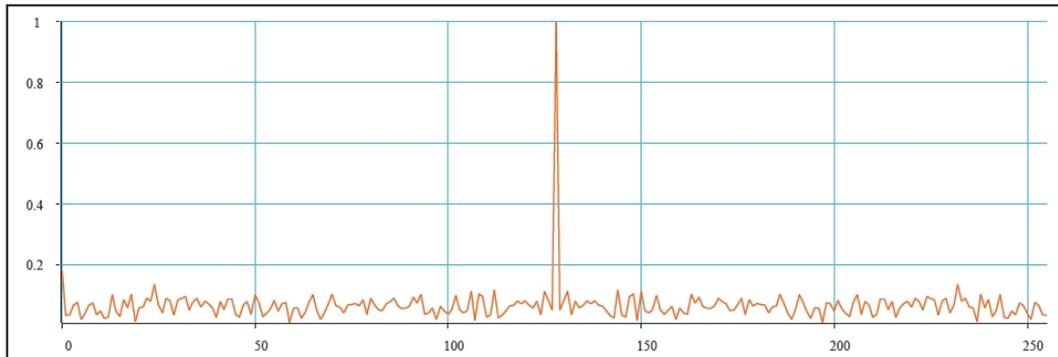


Figure I.6 : Autocorrélation d'un fragment de séquence de Gold de 256

I.3.3 Introduction aux différentes techniques CDMA et à leurs caractéristiques

Le CDMA était destiné, initialement, aux systèmes de communications numériques sur radiofréquences dans le cadre d'applications militaires. Profitant ainsi d'une augmentation de la capacité de multiplexage tout en utilisant les propriétés d'étalement de spectre propre à cette technique, l'objectif était de rendre les transmissions plus robustes à l'apparition de brouilleurs et moins vulnérable aux interceptions éventuelles comme la montre la figure (I.7).

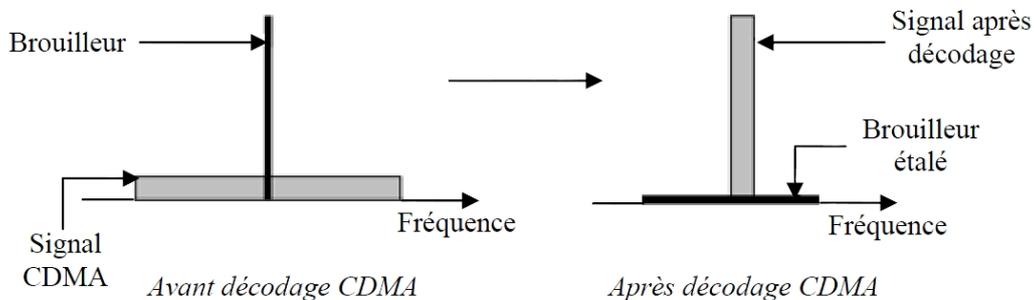


Figure I.7: Effet de l'étalement de spectre sur la présence d'un brouilleur

Le CDMA permet de coder et de transmettre autant de signaux qu'il est possible de générer de séquences de code à la seule condition que ces séquences satisfassent à des propriétés d'auto et d'intercorrélation adaptées. Ces conditions sur les fonctions de corrélation permettent de contrôler et de minimiser les MAI responsables, en partie, de l'augmentation du Taux d'Erreurs Binaires (TEB) lors de la détection et du décodage.

Pour obtenir de meilleures performances, plusieurs études ont associé le CDMA aux autres techniques de multiplexage (TDMA, FDMA, WDM ...etc.). Deux grandes catégories de codage CDMA se dégagent.

La première, sous le nom de CDMA directe, regroupe le CDMA à séquences directes, le CDMA à saut de fréquence (lent ou rapide) et le CDMA à saut de temps.

La seconde, appelée CDMA hybride, associe le multiplexage par code aux autres techniques de multiplexage de manière plus hiérarchisée. L'arbre représenté dans la figure (I.8) regroupe l'ensemble de cette classification.

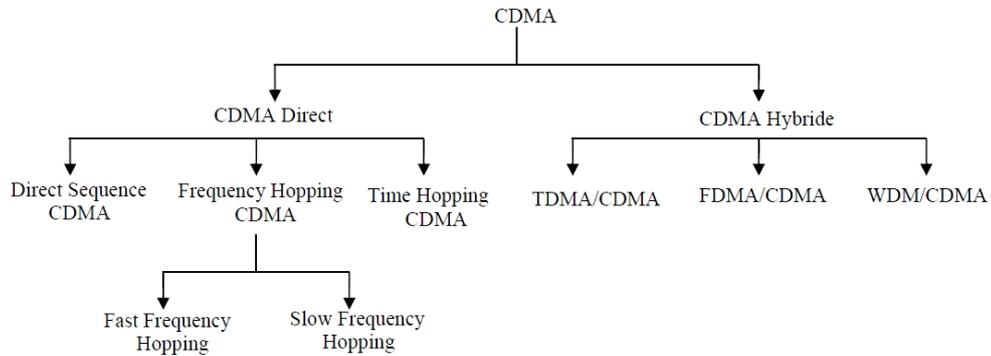


Figure I.8 : les différentes techniques CDMA

Le principe de base du CDMA est une modulation directe du message à transmettre par une séquence de code affectée à un utilisateur donné. Cette manière de faire a donné naissance à ce qui est communément appelé CDMA à étalement de spectre à Séquence Directe ou Direct - Sequence CDMA (DS - CDMA) [3].

I.3.3.1 Accès multiple par répartition de codes à saut de fréquence

Dans un système d'étalement de spectre par saut de fréquence (FH - CDMA), les "chips" qui composent la séquence de code associée à chaque utilisateur, sont émis à des fréquences différentes, le choix de ces fréquences pouvant se faire de manière aléatoire.

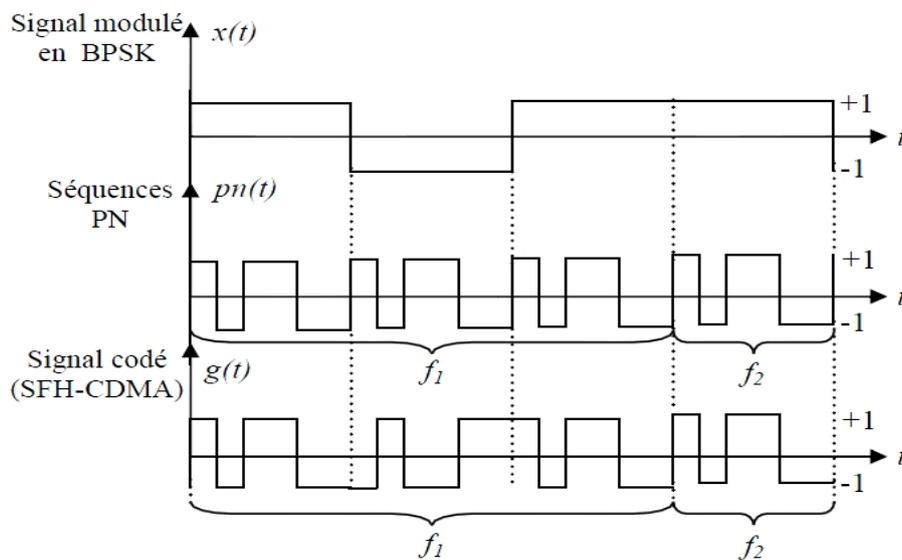


Figure I.9 : Schéma d'un codage SFH-CDMA (à saut de fréquence lent)

Un signal $x(t)$ est codé par une séquence pseudo aléatoire $pn(t)$, mais les chips de cette séquence sont émis à des fréquences différentes $1, 2, \dots, K$ (f_1, f_2, \dots, f_K). Le signal $g(t)$ qui en résulte sera, par conséquent, composé de chips se situant à des fréquences distinctes.

Le modèle de saut de fréquence est dit "lent" (SFH - CDMA: Slow Frequency Hopping - CDMA) Figure (I.9) lorsque plusieurs séquences de codes sont émises à la même fréquence, le changement de fréquence ne s'effectue qu'après plusieurs bits de données transmis.

Le modèle de saut de fréquence est dit "rapide" (FFH - CDMA : Fast Frequency Hopping - CDMA) lorsque l'émission des chips d'un même code se fait sur plusieurs fréquences, comme le montre la figure (I.10).

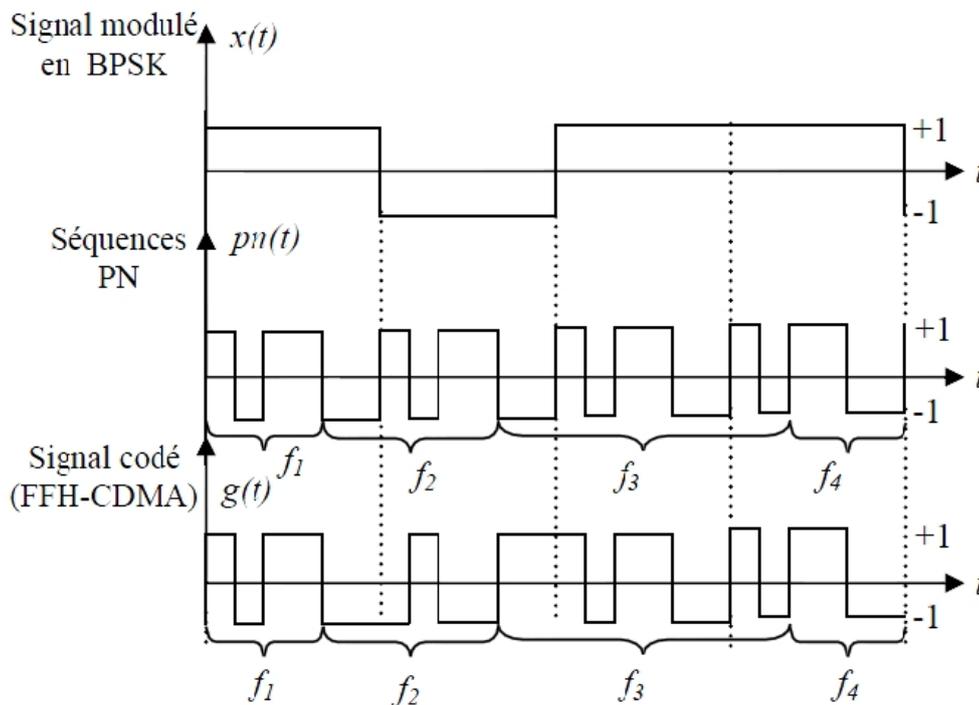


Figure I.10: Schéma d'un codage FFH-CDMA (à saut de fréquence rapide)

I.3.3.2 Accès multiple par répartition de code à séquences directes

Dans le CDMA à séquence directe (DS-CDMA), les données associées à un utilisateur sont modulées en phase, en fréquence ou en amplitude. Le signal résultant est par la suite codé par une séquence de code, par exemple une séquence pseudo aléatoire, puis superposé aux autres signaux traités de la même manière.

Comme le montre la figure (I.11), un signal binaire modulé en phase BPSK (Binary Phase Shift Keying) $x(t)$ est codé par une séquence pseudo - aléatoire ou Pseudo Noise (PN) $pn(t)$. Le résultat de ce codage est représenté par le signal $g(t)$.

Ce dernier est superposé aux autres signaux provenant des autres émetteurs et ayant subi un traitement similaire et est transporté par le canal de transmission.

Le codage des données s'effectue donc de manière "directe", sans faire intervenir d'autres paramètres comme la fréquence ou la longueur d'onde.

Il est, bien sûr, tout à fait possible de coder les données avant d'appliquer la modulation, d'amplitude, de phase ou de fréquence souhaitée.

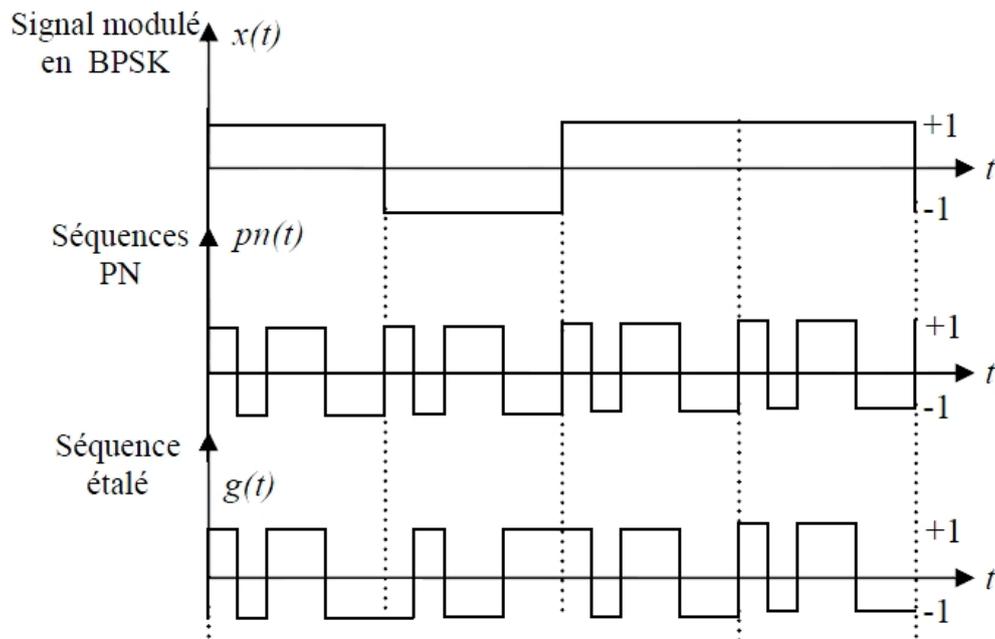


Figure I.11 : Schéma d'un codage CDMA par séquence directe (DS-SS)

I.4 Les codes d'étalement

Les communications qui nous intéressent sont les communications radio-mobile. Suivant les caractéristiques de la communication, un choix sur les codes doit être fait.

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 a 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 [5].

I.4.1 Les Codes orthogonaux

I.4.1.1 Les codes de Walsh

Dans la technique d'accès multiple, les utilisateurs partagent le même espace fréquentiel et transmettent sur les mêmes intervalles temporels, alors qu'ils occupent la même bande Radio fréquence. Afin d'éviter les interférences mutuelles 'inter-utilisateurs', les codes Walsh dans IS- 95 sont utilisés pour séparer les utilisateurs, avec un ensemble de 64 séquences binaires orthogonales. Ces séquences sont orthogonales les unes aux autres, et elles sont générées en utilisant la matrice de Hadamard. La récursivité est utilisée pour générer des matrices d'ordre supérieur de rang inférieur; qui est :

$$H_{2N} = \begin{pmatrix} H_N & H_N \\ H_N & \bar{H}_N \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

\bar{H}_N contient les mêmes éléments de H_N , mais inversé. La matrice devient (pour $N = 1$):

$$H_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Par conséquent, pour tirer une série de quatre séquences orthogonales du code Walsh, $c_0 c_1 c_2 c_3$ nous avons seulement besoin de générer une matrice de Hadamard d'ordre 4, ou :

$$H_4 = \begin{pmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & \bar{H}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Les quatre séquences orthogonales dans cette série de codes de Walsh sont les lignes tirées de la matrice H_4 , donc :

$$C_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$C_1 = (0 \ 1 \ 0 \ 1)$$

$$C_2 = (0 \ 0 \ 1 \ 1)$$

$$C_3 = (0 \ 1 \ 1 \ 0)$$

Pour DS-CDMA trois conditions doivent être remplies par un ensemble de séquences orthogonales. Ces trois conditions sont :

1. L'intercorrélacion devrait être nulle ou très faible.
2. Chaque séquence dans l'ensemble a un nombre égal de 1s et -1s, ou le nombre de 1s diffère du nombre de -1s.
3. Les codes sont choisis tels que leur produit scalaire doit être égal à 1.

En changeant le 0 à -1 dans chacune des quatre séquences ci-dessus, donnera :

$$C_0 = (-1 \quad -1 \quad -1 \quad -1)$$

$$C_1 = (-1 \quad +1 \quad -1 \quad +1)$$

$$C_2 = (-1 \quad -1 \quad +1 \quad +1)$$

$$C_3 = (-1 \quad +1 \quad +1 \quad -1)$$

On peut facilement vérifier que toutes les séquences ci-dessus, sauf C_0 remplissent les conditions.

En général, la séquence C_0 du code Walsh se compose uniquement de -1 et ne peut donc pas être utilisées pour la canalisation. Dans le standard IS-95 CDMA, C_0 n'est pas utilisé pour transmettre des informations de base.

I.4.2 Les séquences pseudo-aléatoires PN

Comme leur nom l'indique, ces codes ne sont pas complètement aléatoires, car il est possible de les régénérer à la réception pour récupérer l'information transmise, pourvu que l'émetteur et le récepteur soient parfaitement synchronisés. Un registre à décalage binaire, comme celui décrit à la figure (I.12), représente l'une des manières les plus courantes pour générer des codes pseudo-aléatoires. Son fonctionnement est le suivant : une fois que les différents états du registre sont initialisés, le bit en sortie est calculé à chaque coup d'horloge en additionnant en modulo 2 tous les bits présents à chaque état. Les bits sont ensuite décalés de manière circulaire pour réinitialiser les états et calculer le bit en sortie suivant.

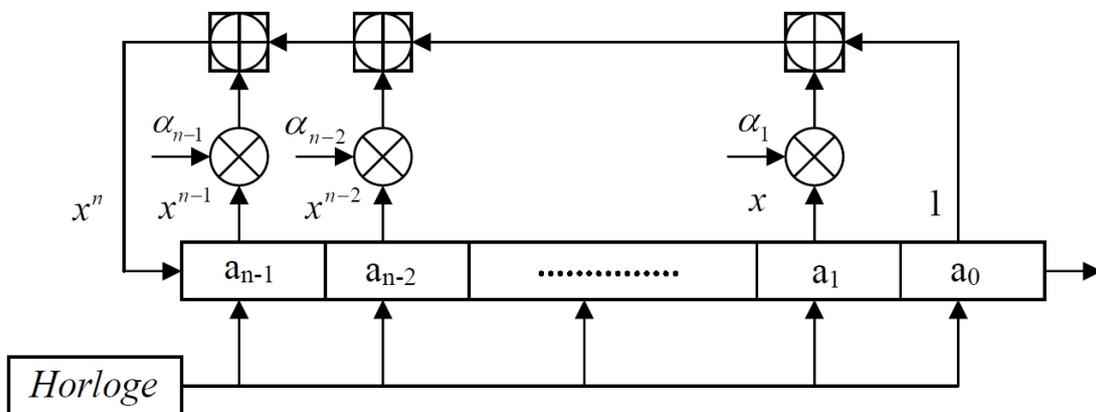


Figure I.12 : Schéma générique d'un registre à décalage à n états

I.4.2.1 Les séquences de Gold

Les codes Gold sont générés à partir de deux séquences maximales obtenues à partir de n bascules, tel que montré à la figure (I.13). Quoique ces codes soient dérivés de séquences maximales, ils ont des corrélations croisées bornées contrairement à ces séquences et ces corrélations croisées sont connues et uniformes. Elles ne peuvent prendre que 3 valeurs : -1 , $-t(n)$, $-t(n) - 2$.

$$t(n) = \begin{cases} 2^{n+1/2} + 1, & n \text{ est impair} \\ 2^{n+2/2} + 1, & n \text{ est pair} \end{cases} \quad (1.8)$$

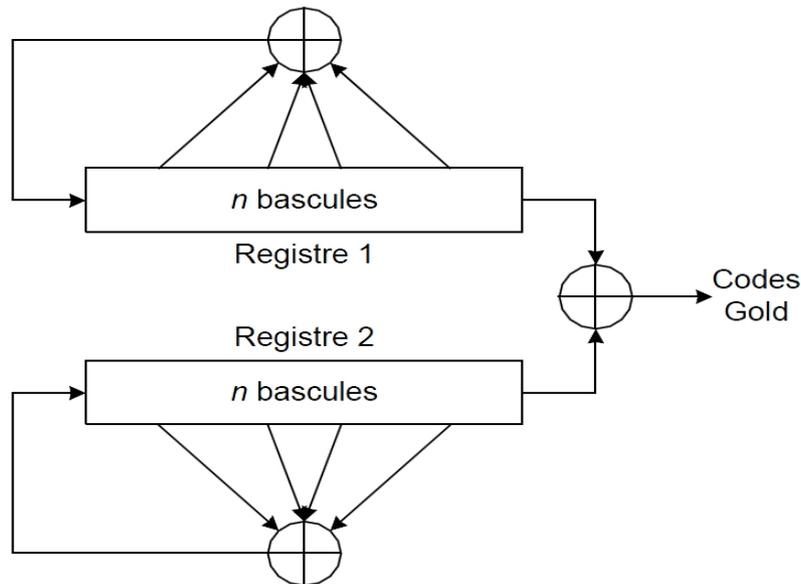


Figure I.13 : Configuration d'un générateur de codes Gold

Avec n égal au nombre de bascules des registres à décalage des deux séquences maximales d'origine. Contrairement aux séquences maximales, la fonction d'autocorrélation des codes Gold peut prendre plus que deux valeurs et présente donc des pics secondaires en plus du pic principal. Toutefois, on peut affirmer que les pics secondaires de l'autocorrélation de ces codes sont bornés supérieurement par $t(n)$. Plus les codes utilisés sont longs, plus le rapport de $t(n)$ sur le pic d'autocorrélation principal est faible, donc plus les propriétés des codes Gold sont intéressantes. Ces rapports sont beaucoup plus faibles que leur équivalent pour des séquences maximales ayant la même longueur N . De plus, ces codes, qui présentent de très bonnes propriétés de corrélation, sont nombreux, ce qui permet de concevoir des systèmes comportant beaucoup d'utilisateurs. Les codes Gold sont aussi particulièrement efficaces pour l'acquisition dans le processus de synchronisation [6].

I.4.3 La modulation de l'information

Dans le système DS-CDMA, un certain nombre d'utilisateur du signal $U_i(n), i = 1, 2, \dots, k$ cohabitent sur une bande de canal commun et chaque utilisateur est défini par une séquence d'étalement individuelle. La modulation se décompose en deux phases :

- **Première phase** : l'étalement (ou spreading) avec un code OVVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor Codes) est alloué à chaque service d'un utilisateur. Après la phase d'étalement, les signaux des différents canaux sont additionnés.
- **Deuxième phase** : le brouillage (ou scrambling) avec une séquence pseudo aléatoire de brouillage est allouée à chaque utilisateur d'une même cellule, la

suite de chips issue du multiplexage interservices est multipliée par le code de brouillage avant d'être envoyée sur l'interface radio.

Ce mécanisme est résumé sur la figure (I.14), où $C_{i,j}$ est le code orthogonal utilisé par le j^{ieme} utilisateur pour le multiplexage du i^{ieme} service et S_k est la séquence pseudo aléatoire allouée à l'utilisateur k .

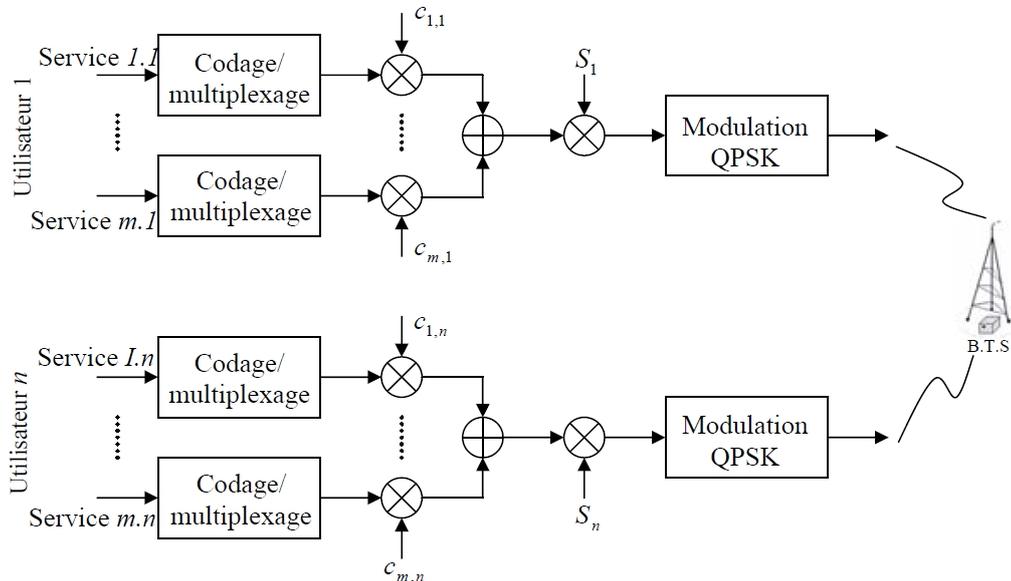


Figure I.14 : Voie montante UMTS

Après avoir été étalé, et embrouillé, le signal complexe de chaque utilisateur qui en résulte, composé de chips, est réparti sur une voie réelle et sur une voie imaginaire appelées respectivement « voie I » et « voie Q ». Puis, il est filtré avec un filtre numérique et converti en un signal analogique à l'aide d'un convertisseur numérique/analogique (CAN). Le signal passe encore par un filtre analogique avant d'être modulé en quadrature et transposé sur une fréquence ω .

Une fois filtré, le signal analogique est ensuite modulé suivant le principe de la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Ce type de modulation permet la transmission de deux chips par symbole. La phase du signal modulé prend différentes valeurs qui représentent une paire unique de chips [7].

La figure (I.15) donne un exemple de modulation effectuée au niveau de l'émetteur de la station mobile et de la station de base.

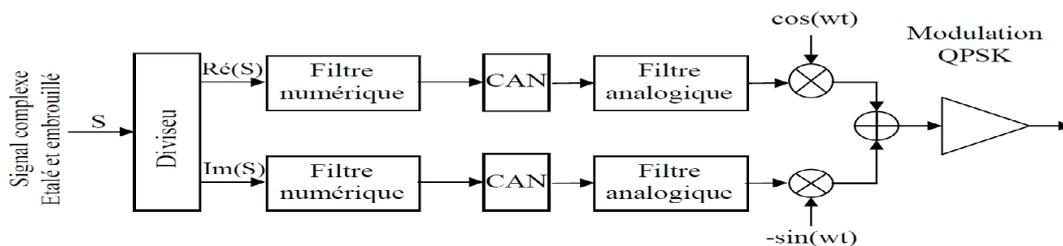


Figure I.15 : Exemple d'une chaîne d'émission utilisant la modulation QPSK

Dans le schéma simplifié de la figure (I.15), le signal modulé est amplifié à l'aide d'un amplificateur de puissance PA (Power Amplifier) avant d'être transmis. Le choix de la modulation QPSK a été effectué précisément avec le souci d'améliorer son efficacité. En effet, l'efficacité de l'amplificateur de puissance est particulièrement importante dans la station mobile, car elle a une influence directe sur la consommation d'énergie du terminal [8].

I.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons rappelé les différentes techniques d'accès multiple couramment employées dans le domaine des communications radio fréquences.

On a tout d'abord décrit le canal de transmission radio-mobile, qui peut avoir plusieurs effets sur le signal transmis de l'émetteur au récepteur, souvent symbolisé comme une source de bruit additif.

Ensuite une présentation formelle de l'étalement de spectre et l'élaboration analytique du signal temporel étalé sont données.

A la fin de ce chapitre, nous avons rappelé les différents types de codes, regroupant les séquences de Walsh-Hadamard, les séquences PN ou les codes de Gold utilisés dans les systèmes DS-CDMA.

La méthode d'accès CDMA est définie de manière à être étudiée et intégrée dans le modèle développé aux chapitres suivants.

Chapitre II

Les techniques de géolocalisation

II.1 Introduction

la géolocalisation est une nouvelle technologie qui sert à déterminer la position géographique d'un individu dans un environnement bien déterminé, les premiers services de géolocalisation commencent à faire leur apparition sur le marché depuis quelques années dans le secteur satellitaire et terrestre.

L'utilisation étendue des réseaux téléphoniques sans fil a donné naissance naturellement à l'idée de fournir des services en fonction de la position de l'utilisateur : un besoin de localisation est donc apparu. L'information sur la position a été, dans un premier temps, utilisée pour la sécurité des usagers (par exemple l'assistance aux personnes en danger). Elle a ensuite, servi pour une utilisation optimale des services proposés sur le réseau tels que l'aide à la navigation. La qualité de ces services est étroitement liée à la précision de positionnement. Un intérêt considérable s'est alors développé au sein des communautés scientifique et industrielle pour les techniques de localisation [9].

Diverses méthodes permettent d'estimer la position des appareils mobiles à partir des signaux reçus des réseaux auxquels ils sont rattachés. A partir de la puissance du signal reçu, du temps de propagation ou l'angle d'incidence, une triangulation permet de localiser le mobile.

II.2 Les Techniques de localisation et positionnement

La réalisation d'un système de localisation implique une infrastructure contenant un ensemble de capteurs permettent d'acquérir les informations nécessaires sous diverses forme (acoustique, électrique, etc.), une référence par rapport à laquelle la position de l'objet à localiser est déterminé est une partie intelligence permettent de traiter les échantillons acquis et d'extraire l'information nécessaire pour déterminer la position.

Le traitement de données peut être effectué à un emplacement dédié du réseau ou au niveau de l'objet mobile souhaitant se localiser. Dans le premier cas le procédé est appelé localisation tandis que dans le deuxième il est connu sous le nom de positionnement. Si l'information est calculée au niveau du réseau et retransmise à l'objet mobile ou inversement, les deux notions peuvent être inter-changées [10].

Plusieurs classifications des systèmes de localisation sont possibles en fonction de critère choisi, comme le type de réseau déployé, la nature des signaux utilisés, les algorithmes exploités, etc.

En prenant comme critère le type de réseau utilisé, deux approches peuvent être distinguées. La première approche consiste à exploiter l'infrastructure et l'équipement d'un réseau sans fil existant et la deuxième à réaliser des systèmes spécifiques destinés principalement à la localisation. Chacune de ces approches présente ses avantages et inconvénients.

La première méthode permet d'éviter les coûts de développement et de déploiement du réseau nécessaire pour collecter l'information mais nécessite en revanche des méthodes de traitement de signal plus sophistiquées, capables de compenser les éventuelles faibles précisions des mesures liées à la bande passante réduite. La deuxième méthode permet beaucoup plus de liberté à l'ingénieur pour proposer et concevoir le système en fonction de l'application souhaitée tout en respectant les normes de rayonnement et de la bande passante autorisées, mais les coûts liés aux aspects recherche et développement ne sont pas négligeables et doivent être pris en compte dans la décision.

Globalement, ils existent trois approches utilisées pour localiser ou positionner des objets mobiles en espace libre :

- ✓ Positionnement basé sur les satellites : l'objet mobile est localisé à l'aide de récepteur de signaux satellitaires. On peut citer système américain GPS, le système européen Galileo ou le système russe GLONASS.
- ✓ Localisation/positionnement basé sur les réseaux cellulaires (ou solution terrestre) : l'objet mobile est localisé à l'aide des signaux qu'il transmet au réseau cellulaire GSM par exemple ou trouve sa position à l'aide des signaux reçus.

Les méthodes hybrides ou coopératives associent les réseaux cellulaires terrestres et satellitaires.

II.2.1 Les Techniques basés sur les systèmes satellitaires

II.2.1.1 Le système GPS

Actuellement, le monde de la localisation en espace libre est dominé par le système GPS. Ce système a été développé par le département de la Défense des Etats-Unis au début des années 70 pour des applications militaires, l'objectif étant de permettre aux combattants de connaître leur position sur le terrain avec une haute précision. Les spécifications concernant la sécurité et la disponibilité sur toute la surface du globe ont conduit à l'implémentation d'un système passif de réception des signaux provenant d'une constellation de satellites. En 1990, le signal des satellites GPS est devenu disponible pour le secteur public à des fins commerciales.

La technologie comporte trois sous-ensembles : le segment spatial comportant les satellites, le segment utilisateur composé du système de réception et le segment de contrôle qui assure la synchronisation entre les satellites. Le système comporte actuellement 24 satellites opérationnels, dont la configuration a été achevée en décembre 1993. Les satellites sont équipés d'horloge très précises leur permettent de garder une synchronisation avec une dérive maximale de 3ns. Pour avoir une visibilité d'au moins 4 satellites nécessaires dans le procédé de localisation, à tout moment partout dans le monde, la constellation comporte six plans orbitaux, chaque plan contenant quatre satellites. Les satellites se trouvent sur les des trajectoires quasi-circulaires à une distance d'environ 20200 Km de la surface de la terre.

Différentes techniques exploitent les signaux satellitaires, notamment :

- ✓ **Le GPS** : le système mesure le temps nécessaire à un signal pour se propager d'un point de l'espace à un autre. Comme dans le cas général, la vitesse du signal est connue avec une précision relative, cette mesure peut être facilement convertie en distance. Pour trouver une position en trois dimensions, le signal d'au moins 4 satellites est nécessaire. Si les distances entre les quatre satellites et le récepteur sont calculés, l'intersection des sphères ayant comme rayon la distance entre 3 satellites et le récepteur GPS conduit à estimer la position du récepteur. Le quatrième satellite est nécessaire pour prendre en compte les erreurs de synchronisation d'horloge et atteindre une meilleure précision au niveau du récepteur. Le système n'est pas bien adapté pour l'utilisation en milieu urbain car, dans ce type d'environnement il est difficile d'avoir la visibilité directe simultanément sur quatre satellites. Notons que la précision du système classique est de l'ordre de 20 mètres.
- ✓ **Le A-GPS (Assisted GPS)** : cette technique est conçue dans le but d'aider l'objet mobile à estimer sa position. Le procédé proposé rend possible la réception des signaux satellitaires même dans le cas où la valeur du signal reçu se situe en-dessous d'une valeur de seuil permettant, dans certains cas, l'estimation de la position à l'intérieur des bâtiments. La méthode hybride ou coopérative est associée aux standards de communication existants GSM, GPRS, UMTS. Elle nécessite des circuits spécifiques au niveau du téléphone mobile lui permettant la réception des signaux GPS et un serveur de calcul au niveau du réseau. Ce dernier va traiter les données renvoyées par le mobile pour calculer sa position. La précision de cette technologie est de l'ordre de 10 mètres.
- ✓ **Le D-GPS (Differential GPS)** : l'idée dans les techniques de positionnement différentiel est de corriger les erreurs à une position quelconque en prenant comme référence les erreurs mesurées à une position connue. Dans le cas du D-GPS, un récepteur référence (Station de base D-GPS) calcule les corrections pour chaque signal satellitaire reçu et renvoie les corrections à tous les récepteurs présents dans sa zone de couverture. Cette information permet d'améliorer l'estimation de la position, l'erreur devenant désormais de l'ordre de 1 mètre.

II.2.1.2 Les alternatives au système GPS

II.2.1.2.1 GLONASS

Glonass est le système satellitaire Russe. Lancé pendant la guerre froide pour concurrencer les projets américains. Il fut lui aussi opérationnel en 1995 avec 24 satellites en orbite.

Suite à la chute de l'Union Soviétique, le projet a subi un manque de financement. Certains satellites n'ont pu être maintenus ou remplacés. Aujourd'hui 22 satellites "Ouragan" répartis sur trois orbites circulaires composent la constellation.

Le système est fonctionnel mais, de fait, moins utilisé que le GPS. Un problème se pose, la question de la compatibilité avec le GPS. Les deux systèmes sont absolument incompatibles. Certains équipements existent avec un double récepteur (GPS et Glonass).

II.2.1.2.2 GALILEO

L'Europe s'est lancée beaucoup plus tard dans les systèmes de positionnement par satellites. Deux projets ont vu le jour : Egnos et Galileo.

Egnos (European Geostationary Navigation Overlay Service) est un projet complétant les systèmes GPS, Glonass en utilisant le système du GPS différentiel¹³. Financé par l'Europe, ce projet a vu le jour en 1998 et est opérationnel depuis 2009. Le but est d'obtenir une précision beaucoup plus fine que les systèmes actuels.

Galileo est un système de positionnement par satellites, similaire à GPS ou Glonass. Il a été lancé en 2001 par un ensemble d'organismes publics et privés principalement européens. Aujourd'hui, beaucoup d'autres pays sont intéressés et contribuent à ce projet, notamment la Chine et l'Inde. Actuellement, le projet en est à sa phase de validation. A terme, il s'agira d'une constellation de 30 satellites sur 3 orbites à une altitude de 23 600 km. Au sol, deux centres de contrôle et cinq stations. Le système devrait être fonctionnel d'ici 2013.

En 2004, un accord a été signé avec les États-Unis pour permettre la compatibilité des récepteurs GPS et Galileo.

II.2.2 Les Techniques basée sur les réseaux mobiles

L'exploitation des réseaux mobiles permet aussi d'obtenir une estimation de la position des équipements mobiles. L'implémentation de méthodes de localisation cellulaire. Nécessite des modifications logicielles et/ou matérielles au niveau de l'objet mobile et /ou du réseau, on peut classer les technologies :

- ✓ Exogènes : modifications au niveau du réseau cellulaire.
- ✓ Endogène : modifications au niveau de l'objet mobile.
- ✓ Hybrides : modifications sur l'ensemble.

Dans le cas de l'approche exogène, une ou plusieurs stations de base effectuent les mesures nécessaires, appliquent certains algorithmes pour déterminer la position de l'objet mobile et renvoient les résultats à l'objet mobile. L'approche endogène donne naissance à deux types d'implémentation :

- ✓ *Mobile based* : l'objet mobile effectue les mesures et les calculs nécessaires, pour déterminer sa position un avantage de cette approche est le positionnement en mode inactif, réalisé par la mesure de canaux de contrôle

qui sont transmis constamment. Cette méthode nécessite des modifications de type matériel et logiciel au niveau de l'équipement mobile.

- ✓ *Mobile assisted* : l'objet mobile effectue les mesures et les envoie à un centre de gestion qui va effectuer les calculs. Ce type d'implémentation nécessite plutôt des modifications de type logiciel.

II.2.2.1 Localisation par réseaux GSM

Les applications de localisation à l'aide du réseau GSM sont apparues au début des années 2000. C'est d'abord au Japon et aux Etats-Unis avec le E911 que ces besoins de localisation ont apparus. L'exploitation du réseau GSM à des fins de localisation a été proposée. Des études ont montré que des revenus peuvent être générés par les services de localisation et de plus en plus d'opérateurs de téléphonie s'y sont intéressés. Ces revenus pouvaient s'élever à quelques 7 ou 8 milliards de dollars.

Plusieurs techniques de localisation existent. On trouve des méthodes d'identification de la cellule dans laquelle se trouve le mobile (méthode Cell-ID), puis des méthodes plus complexes basées sur les mesures temporelles (estimation de la distance entre chacune des stations de base et le mobile) comme la TOA (Time Of Arrival) ou la TDOA (Difference Time of Arrival). Enfin l'utilisation des directions d'arrivée avec la méthode AOA (Angle of Arrival) conduit aussi à l'identification de la position occupée par le mobile. Chaque une de ces méthodes est développée par la suite car elles sont aussi proposées pour les réseaux de nouvelle génération de type UMTS comme le montre la figure (II.1).

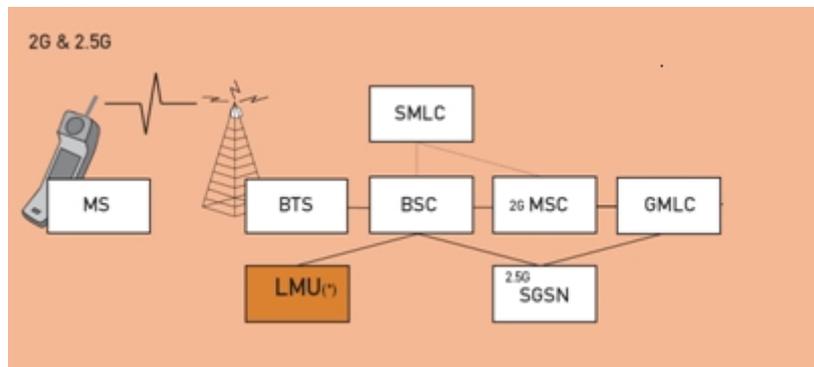


Figure II.1 : Structure du réseau GSM pour les applications de localisation

Il est nécessaire d'ajouter des éléments de synchronisation dans le réseau afin d'employer certaines techniques de localisation citées précédemment. Dans le réseau GSM tel qu'il a été prévu initialement, les stations de base ne sont pas synchronisées entre elles. Or, les méthodes de localisation temporelles nécessitent que les stations de base soient synchrones. Des éléments notés LMU (Location Measurement Unit) sont installés pour fournir une synchronisation entre différentes stations de base. Le type de réseau n'est pas forcément adapté pour les applications actuelles recherchant parfois une localisation à quelques mètres près. Dans certains environnements comme en rural, très peu de stations de base sont disponibles. Ceci rend très difficile une localisation très précise. Si une seule station de base, la meilleure localisation que l'on

peut attendre, est celle à la cellule ou voir au secteur lié à cette station de base. Afin de répondre à ces situations, de nouveaux réseaux sont nécessaires. L'UMTS offre des performances supérieures en qualité de transmission d'informations, mais aussi en termes de localisation car ce service fait partie intégrantes de la norme associé aux réseaux de troisième génération.

II.2.2.2 Localisation par réseaux UMTS

Depuis fin 2004, les opérateurs commencent à proposer à leurs clients en France un service de téléphonie de troisième génération ou UMTS. Des fonctionnalités de localisation sont prévues dans la norme UMTS comme présenté par le 3GPP. Cependant, le type de service de géolocalisation pour l'utilisateur n'est pas imposé dans les spécifications techniques de l'UMTS. Le 3GPP définit un ensemble de méthodes permettant d'estimer la position géographique du terminal à l'aide de l'infrastructure du réseau. Les opérateurs de télécommunications et les fournisseurs de services doivent exploiter la valeur estimée de la position de l'équipement mobile (UE) pour développer et personnaliser eux même les offres.

Les services de localisation dans la terminologie 3GPP sont désignés par le sigle LCS pour LoCation services.

Contrairement au réseau GSM, la notion de localisation est prévue dans ce standard. La structure du réseau mise en place comporte obligatoirement des éléments permettant d'effectuer ces opérations de localisation. La structure typique pour le réseau UMTS est donnée par la figure (II.2).

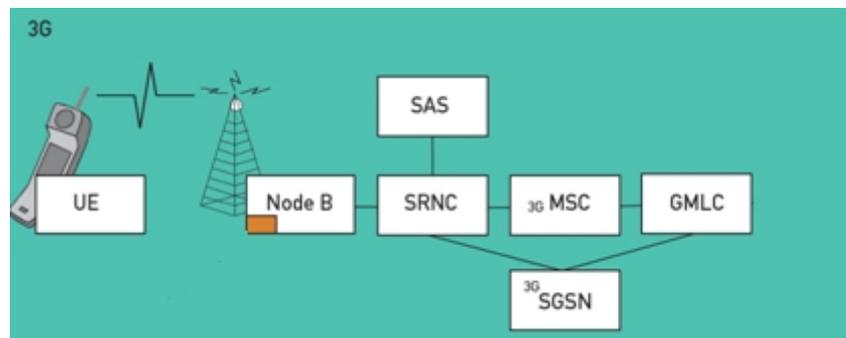


Figure II.2 : Structure du réseau UMTS pour les applications de localisation

Les éléments du réseau participant à la localisation sont :

- ✓ *Le centre de localisation du mobile* (SRNC-Serving Radio Network Controller) qui a la charge d'estimer la position de l'UE, c'est-à-dire ces coordonnées géographiques en 2 ou 3 dimensions. A la différence du réseau GSM ou le SMLC peut être un élément à part, dans le réseau UMTS régi par la *Release 99*, les fonctions du SMLC sont directement intégrées dans le SRNC de l'UTRAN.
- ✓ *Le routeur du centre de localisation du mobile* (GMLC- Gateway Mobile Location Centre) représente le nœud d'entrée au PLMN (Public Land Mobile

Network) qui fournit le service d'estimation de la position des terminaux. En collaboration avec le HLR (Home location Register), il effectue les tâches d'automatisation et d'authentification des serveurs externes qui sollicitent des informations liées à la position géographique de l'abonné. Les serveurs externes à l'origine de ces requêtes sont appelés « clients LCS ». le GMLC est aussi chargé de transmettre aux éléments du réseau concernés la QoS (Quality of Service) requise par le client LCS. en fonction de la QoS, la SMLC choisit la technique la plus adaptée parmi celles supportées par le réseau et suivant les capacités matérielles et logicielles de l'UE.

- ✓ *L'unité de prélèvement de mesures de localisation* (Location Measurement Unit ou LMU) sert de support au SMLC en effectuant les mesures radio requises par la technique de localisation mise en œuvre. Ces mesures concernant principalement les paramètres RTD (Round time Difference) et RTT (Round Time Trip) présentés par la suite lors de la description des méthodes de localisation associés à ce type de réseaux. Lorsque cette unité est intégrée dans le Node B, elle est appelée « LMU type B » sinon elle est appelée « LMU type A ».

Ceci permet d'avoir une vue d'ensemble sur la configuration des entités fonctionnelles impliquées dans l'offre de service de géolocalisation permettant de prédire la position d'un équipement mobile en fonction des données disponibles.

II.2.2.3 Les techniques de localisations associés aux réseaux GSM et UMTS

II.2.2.3.1 La localisation à la cellule ou « Cell ID »

Cette méthode dite « la cellule près » est la plus simple et la moins onéreuse à mettre en place car elle est compatible avec tous les terminaux existants. Elle ne nécessite que l'émission d'un signal aller-retour de signalisation avec l'utilisateur.

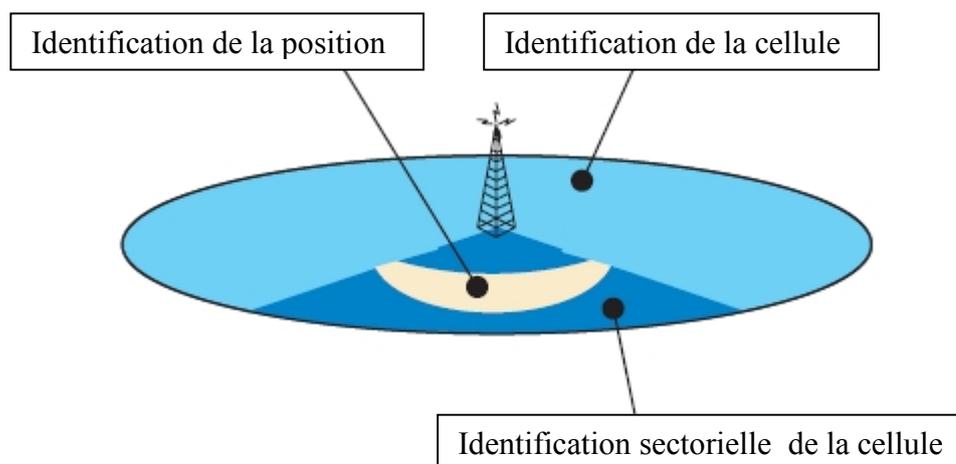


Figure II.3 : Principe de la localisation à la cellule

Le téléphone mobile est localisé par l'identification de la cellule à laquelle appartient l'antenne à travers laquelle la communication est transmise.

Le temps de calcul de position est très court. Il s'agit seulement du temps de recherche dans la base de données de la position à partir de l'identifiant de la cellule. Cette technique n'est toutefois pas très précise, elle situe une personne à 250 mètres près en zone urbaine où le réseau est dense contre une dizaine de kilomètres en milieu rural ce qui correspond à la plus grande taille de la cellule. Des raffinements sont possibles lorsque les antennes des stations de base sont constituées de plusieurs antennes dites sectorielles (secteur de 60°). Il est possible de remonter au secteur dans lequel se trouve le mobile afin de réduire la zone d'incertitude. Cette méthode n'est pas donc très précise dans les zones où une simple BTS couvre un grand territoire. Dans les villes où les opérateurs ont installé plusieurs BTS pour mieux desservir les utilisateurs, les cellules couvrent une zone longue de quelques centaines de mètres, ce qui accroît la précision du système. Malgré son manque de précision, la majorité des opérateurs l'ont toutefois choisie pour le E112 en raison de son faible coût de mise en place.

II.2.2.3.2 La localisation par temps d'arrivée ou trilatération

L'amélioration de la localisation passe par l'obtention d'informations plus précises que le secteur de la station de base à partir duquel les communications transitent. Il est nécessaire de disposer d'informations directement liées à la distance séparant l'équipement mobile de la BTS. Les informations temporelles sont utilisables, comme c'est le cas pour le GPS. Ce mode de localisation par trilatération est applicable aux réseaux GSM et UMTS ; cette technique nécessite une assez bonne synchronisation entre BTS et les mobiles, ce n'est généralement pas le cas. À la place de travailler avec les temps d'arrivée le système travaille avec des différences de temps qui sont équivalentes à des différences de marche, en procédant de cette manière, le problème de synchronisation équipement mobile /BTS est résolu. Pour que la localisation soit possible, il est nécessaire de capter une BTS supplémentaire par rapport à la technique TOA. Cette station supplémentaire sert de référence temporelle. Ces techniques de localisation par différence de temps sont nommées TDOA (Time Difference Of Arrival) et EOTD (Enhanced Observed Time Difference).

II.2.2.3.3 La technique de localisation Uplink Time of Arrival (U-TDOA)

Cette méthode de localisation est utilisée car elle permet de s'affranchir de l'étape de synchronisation entre l'équipement mobile et les stations de base. Ici c'est l'équipement mobile qui émet les trames contenant les slots pour la localisation. Ce type de localisation n'est applicable qu'aux mobiles se trouvant à proximité des stations de base.

La localisation s'effectue en deux étapes. Dans un premier temps, on estime les différences de temps. L'équipement mobile émet un signal qui arrive à des instants différents au niveau de chacune des BTS. Un serveur central récupère ces différents

signaux en provenance des BTS et détermine la différence de temps d'arrivée entre les signaux.

Deux techniques différentes existent pour l'estimation de ces différences de temps :

- ✓ Soustraction des temps d'arrivée (TOA) de chacune des BTS.
- ✓ Corrélation de deux signaux provenant des BTS.

La seconde méthode est généralement connue sous le nom de Cross-Corrélation Généralisée (GCC). Elle est considérée comme plus robuste. La figure (II.4) décrit le principe de fonctionnement de ce détecteur.

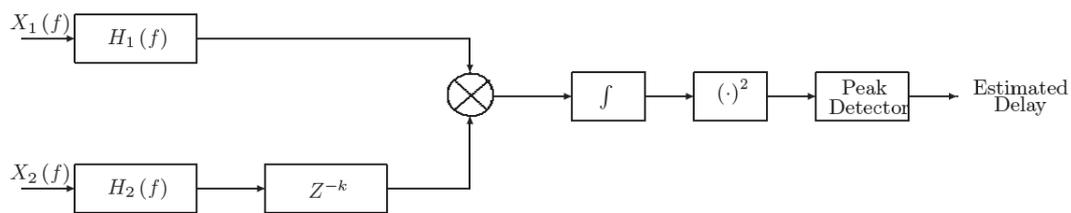


Figure II.4 : détecteur TDOA

La résolution du problème mathématique lié à cette situation, n'est pas aussi simple que celle un problème de TOA. Une méthode consiste à minimiser une fonction d'erreur entre temps d'arrivée réel et temps d'arrivée associé à la position estimée.

L'avantage de cette méthode est que l'équipement mobile ne nécessite aucun changement. Toute la complexité du système est placée au niveau du réseau, la mise en place de cette méthode dépend uniquement de l'opérateur. Si des améliorations de la technique de localisation sont effectuées, dans ce cas, l'opérateur n'a pas besoin de rappeler tous les terminaux distribués à ses abonnés pour effectuer une mise à jour, une telle contrainte n'est pas à négliger pour un opérateur de télécommunication.

II.2.2.3.4 La technique Enhanced Observed Time Difference (E-OTD)

Dans la méthode U-TDOA, c'est l'équipement mobile qui émet des trames, c'est le réseau qui effectue la différence de temps afin de déterminer la position de cet équipement. Ici l'équipement mobile détermine lui-même sa position à partir des signaux reçus de différentes BTS, tout en employant des mesures de différences de temps d'arrivée.

La méthode E-OTD nécessite une remise à niveau du réseau GSM déjà en place avec l'ajout de LMU (Location Measurement Units) pour compenser le fait que les BTS du réseau GSM ne sont pas synchronisées. Ces unités de mesures représentent un coût supplémentaire pour l'opérateur lors de la mise en place du service.

Les LMU sont des éléments hardware supplémentaire rajoutés au réseau GSM pour réaliser des mesures précises de différences de temps entre les signaux provenant des différentes BTS le LMU mesure les différences de temps relatives entre chacune des BTS à partir des burst émis périodiquement et de façon prévisible. Les données remontant des LMU sont utilisées par le système pour déterminer la position du mobile. Le standard GSM définit deux modes de fonctionnement pour ces LMU. il existe deux type de LMU voir la figure (II.5) :

- ✓ Les LMU de type A: les LMU de type A sont des LMU dont les échanges avec le réseau GSM s'effectuent par l'intermédiaire d'une interface radio sans fils.
- ✓ Les LMU de type B : les LMU de type B sont les LMU interrogeables par la BSC (Base Station Controller) à travers l'interface Abis.

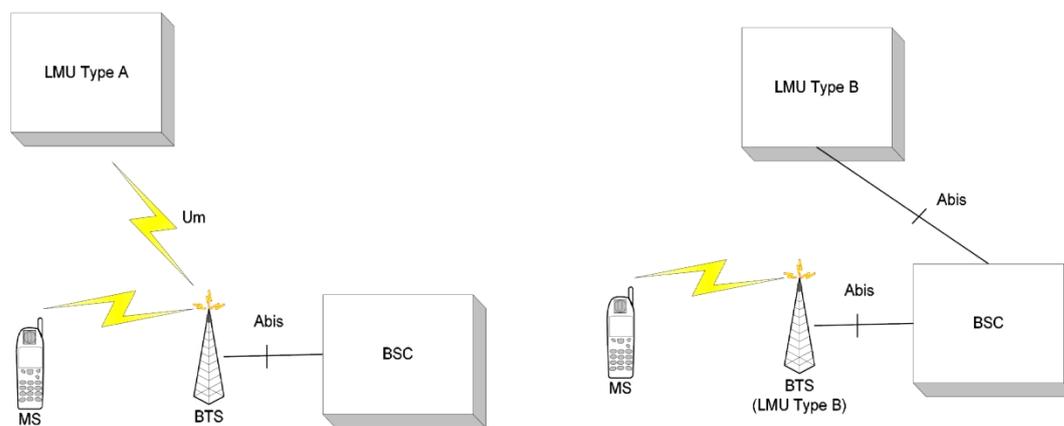


Figure II.5 : classes de LMU

Ces deux types de LMU sont supportés par le standard GSM. Décrit les autres éléments du réseau. L'architecture centrée BSS a comme avantage de ne pas avoir besoin de remonter des informations vers le MSC/VLR ni le HLR. Ceci réduit les flux de signalisation dans le réseau sous-système(NSS).cette configuration nécessite des échanges radios qui sont souvent difficiles.

Pour la solution basée sur les LMU type B, il faut générer des flots de trafics de signalisation entre les LMU et le réseau BTS. Cette solution permet de réduire le nombre d'éléments supplémentaires à introduire une application LCS. Des tests effectués par Nokia sur cette architecture, montrent que les flots de signalisation engendrés sont 50 fois plus importants que pour le réseau normal. Des études sur le cout de la mise en place des différentes architectures réseau montrent que plusieurs BSC peuvent être mis à jour dans une architecture BSS centrée pour le prix de la mise à jour d'un SMLC dans une architecture NSS centrée. En plus l'architecture BSS est l'architecture retenue pour l'UMTS.

La figure (II.1) illustre une situation de localisation par E-OTD.

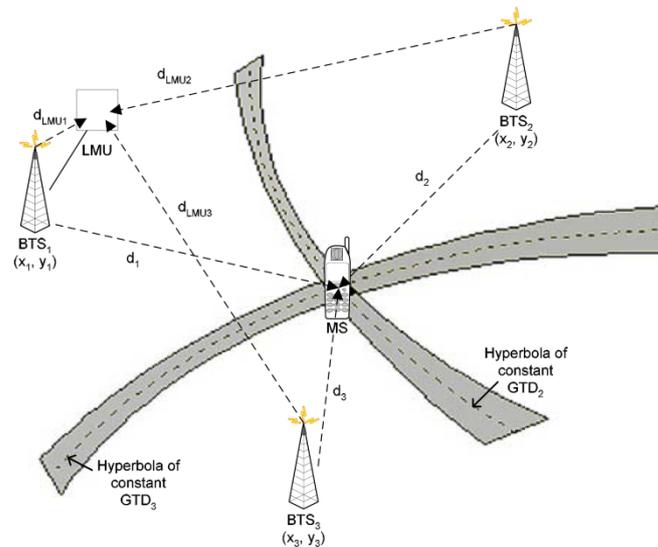


Figure II.2 : Schéma de description de la technique E-OTD

Présente les développements associés à cette technique de localisation. Ces développements prennent en compte les différences de synchronisation existante entre les BTS du réseau. La détermination de la position du mobile s'effectue par un algorithme minimisant l'erreur entre chacune des différences de temps mesurées et la différence de temps associés à la position estimée du mobile. Le processus se déroule itérativement.

De nombreux traitent des méthodes de résolution de ces problèmes. On peut citer la méthode des moindres carrés, ou alors la méthode de Newton par exemple. Les principales sources d'erreurs sont généralement les multi-trajets, ils rendent difficile l'estimation de l'instant d'arrivée du premier trajet. D'un côté, le défaut de synchronisation des stations de bases conduit aussi à une erreur sur l'estimation exacte de ces différences de temps. Cette erreur peut aller de 15 à 60 m si la synchronisation n'est pas correcte. Les LMU permettent de corriger ces erreurs

II.2.2.3.5 La localisation par direction d'arrivée

La technique de localisation par direction d'arrivée ne repose pas sur des mesures de temps d'arrivée mais sur des mesures de directions d'arrivée des ondes au niveau des BTS. Pour effectuer ces mesures, il est nécessaire de disposer de réseaux d'antennes estimant les directions d'arrivée. Le réseau d'antennes placé sur une BTS permet de déterminer une ligne de l'espace sur laquelle se trouve l'équipement mobile. Si au moins deux BTS délivrent chacune une droite dans l'espace sur laquelle se trouve le mobile, alors l'intersection de ces deux lignes est unique et correspond à la position occupée par l'équipement mobile. À cause des fortes dégradations des signaux radio, il faut exploiter les données provenant de deux BTS au moins. La figure (II.3) illustre ce principe de localisation.



Figure II.4 : Principe de la localisation AOA

II.2.2.3.6 La localisation par fingerprinting

La technique de fingerprinting est utilisée pour déterminer la localisation d'un équipement mobile à partir de données brutes provenant de rapports disponibles au niveau du BSC. À la différence des techniques précédentes, cette technique requiert une étape de calibration. Le mot fingerprinting vient du terme "fingerprinting" qui signifie empreinte digitale. Pour fonctionner, cette technique nécessite une base de données qui à certaines positions de l'environnement considéré associe un ensemble d'éléments caractérisant cette position. Ces éléments doivent permettre de différencier chacune des positions par rapport aux autres positions de l'environnement. Si cette condition n'est pas réalisée dans ce cas les éléments considérés pour composer cette "empreinte" ne sont pas significatifs.

Les éléments pouvant être considérés pour composer ces empreintes sont la puissance du signal, la réponse impulsionnelle du canal, les directions d'arrivées, le temps d'arrivée par exemple. Une composition de plusieurs de ces éléments est acceptable.

Une précaution est nécessaire. L'environnement radio doit rester stable durant la période au cours de laquelle on veut proposer le service de localisation. L'exploitation de cette technique de localisation pour les environnements indoor est courante.

Par la suite, les signatures seront composées des puissances du signal reçu. Au niveau du terminal mobile, la puissance du signal reçu possède comme caractéristiques de s'atténuer en fonction de la distance, et de subir des atténuations successives suivants les phénomènes radio (réflexion, diffraction, transmission, scattering) auxquels elle est soumise. Une forme simple de la puissance du signal reçu en une position (X_r, Y_r) de l'espace est donnée par :

$$p(X_r, Y_r) = p(X_e, Y_e) \cdot X_r \cdot Y_r \cdot \frac{\lambda^\alpha}{4\pi \cdot d}$$

Avec λ la longueur d'onde, (X_e, Y_e) la position de l'antenne émettrice, α un terme caractérisant la propagation dans le milieu ($\alpha = 2$) dans le cas de la propagation en espace libre et d la distance séparant l'émetteur du récepteur.

Ces modèles montrent que la puissance du signal est un bon élément pour la constitution de la base de données de fingerprinting, puisqu'elle varie en fonction de la distance. Idéalement, cette décroissance se fait suivant une ligne de niveau ressemblant à un cercle (dans un espace 2D) mais elle est déformée suivant les obstacles présents dans l'environnement. Plusieurs positions de l'espace possèdent la même valeur de puissance captée.

Il est nécessaire de prendre en compte plusieurs puissances provenant d'émetteurs distincts, chacun générant une ligne de niveau. Ces lignes de niveau sont corrélées entre elles, et doivent s'intercepter en un point du plan qui est la position occupée par l'équipement. Comme ces lignes de niveau sont plus ou moins concentriques, deux de ces lignes de niveau vont avoir au moins deux intersections. Il est nécessaire de considérer au moins trois de ces lignes de niveau pour obtenir la position.

II.2.3 Synthèses sur les principales techniques de localisations

Toutes ces techniques ont de bons résultats dans le cas où l'objet mobile se trouve en visibilité directe avec la/les stations de base. Dans le cas où les mobiles ne se trouvent pas en visibilité directe, l'estimation de leur position est fortement dégradée. La précision est très sensible aux conditions de propagation du signal et les phénomènes tels que la dispersion, la diffraction et les trajets multiples vont introduire des erreurs. Ces conditions de propagations sont à l'image du canal intra bâtiment et limitent, en conséquence, l'utilisation des techniques mentionnées auparavant dans ce type d'environnement. Les systèmes ayant transposés ces techniques en environnement indoor ont montré des précisions de localisation médiocre [11].

Une représentation qui permet de mettre en relation les principales techniques de localisation en espace libre et leurs performances est donnée dans la figure (II.5).

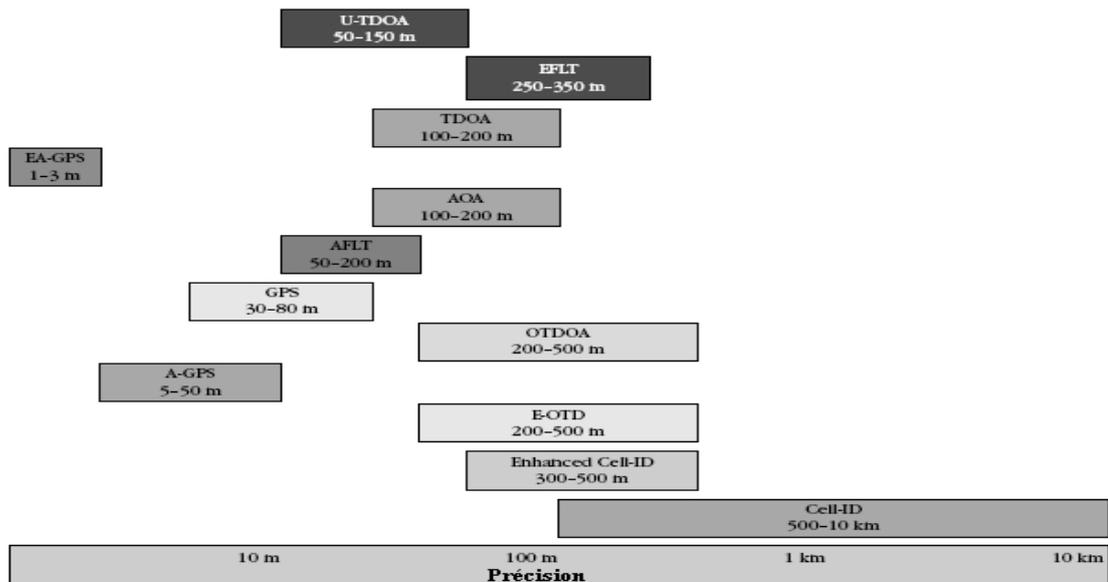


Figure II.6 : Synthèse des principales techniques de localisation en espace libre et leurs performances

II.3 Les principales sources d'erreurs de localisation

II.3.1 Phénomène de multi-trajets

Le canal radio électrique est le siège de la propagation, par multi-trajets, Des ondes électromagnétiques voir la figure (II.7). Les multi-trajets se manifestent lorsque le signal émis par un capteur arrive au récepteur après réflexions et diffractions sur un obstacle: murs, surfaces vitrées ou métalliques en zone urbain, troncs d'arbres, branche et feuillage en foret. Ces interactions électromagnétiques modifient des paramètres intrinsèques de l'onde comme sa polarisation et sa phase.

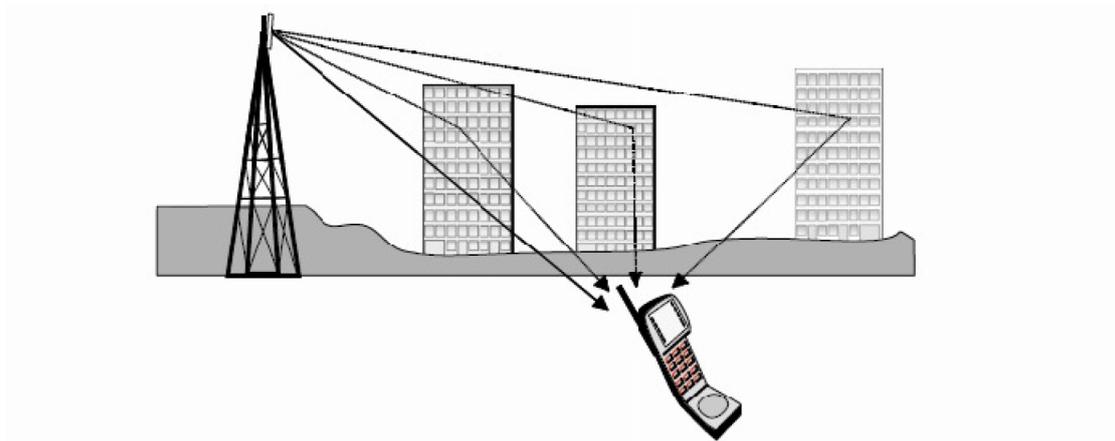


Figure II.8 : Illustration de la propagation multi-trajets

Le signal est donc affecté par de nombreuses distorsions possibles :

- de fréquence (effet Doppler : mouvement des émetteurs-récepteurs).
- d'amplitude (évanouissement de Rayleigh ou fading dû aux trajets multiples).
- de phase (dispersion des temps de propagation sur les trajets multiples).

Ces phénomènes sont déterministes si les différents trajets sont bien identifiés.

Cependant, ils se fluctuent dans le temps et dépendent d'une multitude de paramètres qui ne sont pas maîtrisables : l'environnement urbain évolue (construction ou destructions d'immeubles), les véhicules et les personnes en déplacement ont également une influence, de même que les saisons et les feuilles mortes qui se ramassent à la pelle. Il n'est donc pas possible, connaissant la place et la puissance de l'émetteur, de prédire avec précision le niveau de champ reçu en un point donné.

Les équations de propagation utilisent donc des lois de probabilité pour intégrer une incertitude sur les prédictions [12].

II.3.2 La propagation NLOS (sans visibilité directe)

En environnement NLOS (non-line-of-sight), le signal arrivant à la BTS en provenance de la station mobile MS est réfléchi, réfracté, dispersé ou absorbé créant des multiples signaux arrivant au récepteur à des temps différents, de différents chemins et avec des différentes puissances.

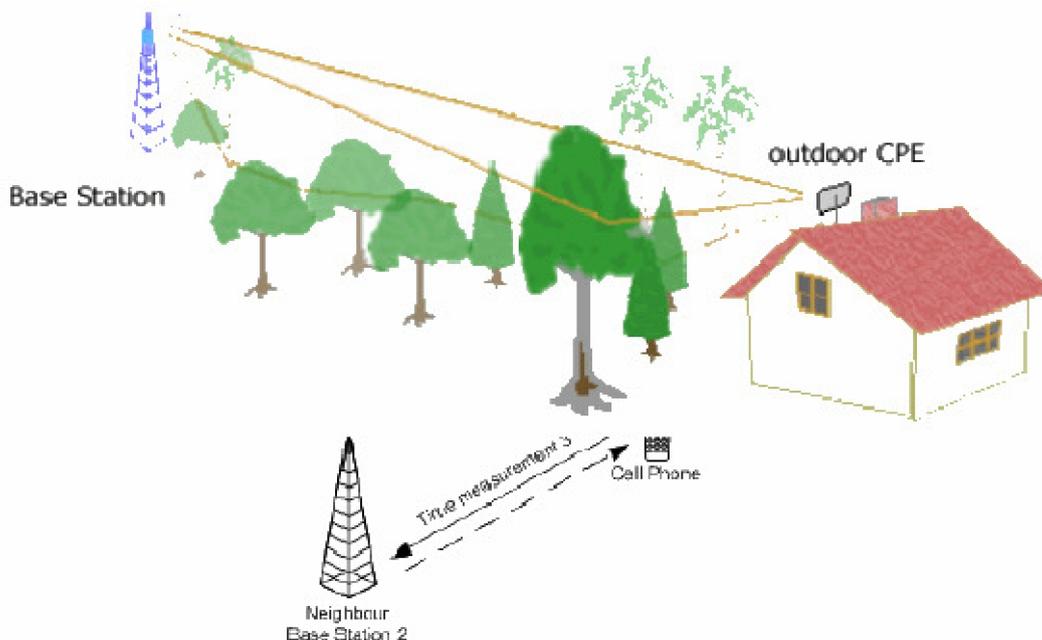


Figure II.9 : Multi-trajets en environnement NLOS

Par exemple l'erreur typique introduite par la propagation NLOS dans GSM est entre 400 et 700 m.

II.3.3 Interférences Co-canal

Lorsque des émetteurs radio émettent sur la même fréquence que l'émetteur que l'on souhaite capter, et même si ils sont très éloignés, ils peuvent perturber la réception. C'est ce défaut que l'on appelle l'interférence de co-canal.

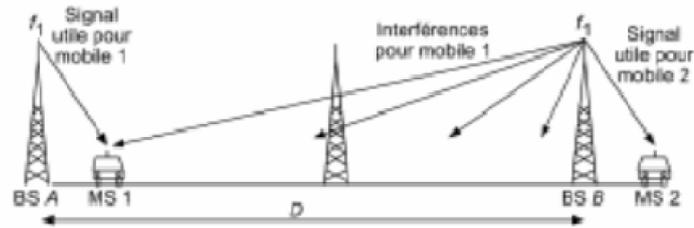


Figure II.10 : Interférences co-canal

On utilise la même fréquence sur des stations de base différentes : Diffusion des ondes ce qui donne des Interférences co-canal [13].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir brièvement rappelé le concept des systèmes de localisation et de positionnement, et leurs principes de fonctionnement.

Nous avons plus particulièrement insisté sur les principales méthodes de localisation des utilisateurs mobiles, On a distinguée deux types de geolocalisation, par satellites, et par réseaux cellulaires, Une représentation qui permet de mettre en relation les principales techniques de localisation en espace libre et leurs performances est donnée. Les principales sources d'erreurs dans les systèmes sans fil ont été présentées à la fin du chapitre.

Chapitre III

Simulation de la technique TDOA

I.1 Introduction

La technique TDOA consiste à mesurer l'instant d'arrivée d'un signal RF en plusieurs points de l'espace et à comparer la différence entre les instants mesurés à chaque récepteur.

Dans ce chapitre nous allons décrire les principales étapes de géolocalisation dans un système CDMA avec la méthode TDOA, cela consiste à calculer la corrélation croisée d'un signal arrivant dans deux récepteurs. Cette estimation correspond au délai qui maximalise la fonction de corrélation croisée.

Nous allons aussi présenter les différents algorithmes pour la résolution des équations hyperboliques, donner un modèle d'une chaîne de transmission CDMA, et élaborer la simulation sous différentes conditions, pour déterminer les différents paramètres agissant sur la précision de localisation de position.

I.2 Localisation par les temps de retards

I.2.1 Temps d'arrivée du signal (TOA- Time Of Arrival)

La technique du temps d'arrivée du signal est basée sur la mesure de la différence du temps t entre le signal émis par la station de base et le signal reçu par la cible pour calculer la distance entre eux, comme indique l'équation (3.1) ci-dessous :

$$d = c * t \quad (3.1)$$

La distance d séparant un émetteur d'un récepteur est facilement calculée en connaissant le temps t pris par le signal direct pour passer de l'émetteur au récepteur et $c=3*10^8$ m/s (vitesse de la lumière) est la vitesse de l'onde électromagnétique dans l'espace libre.

Cette technique est basée encore sur une triangulation de trois stations de bases au minimum pour localiser la cible sans ambiguïté. Leurs intersections donnent une zone de position du mobile et cette technique est illustrée dans la figure (III.1).

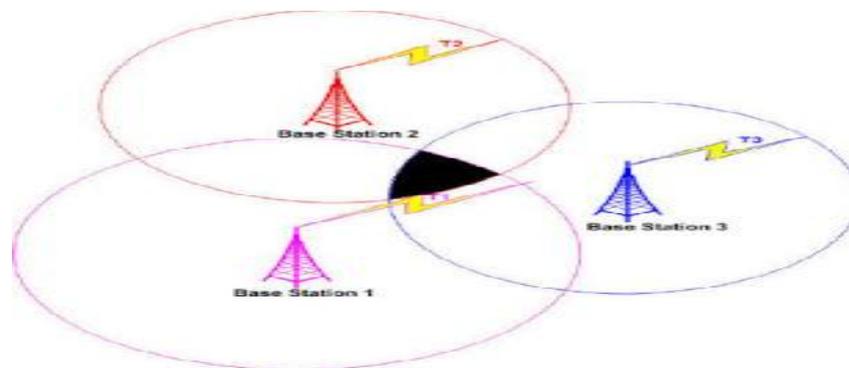


Figure III.1 : Temps d'arrivée du signal (TOA)

La synchronisation entre la station de base et le récepteur est nécessaire dans cette technique pour connaître la différence de temps exacte entre le signal émis par la station de base et le signal reçu par le mobile. Un défaut de synchronisation conduit à des erreurs dans l'estimation du temps pris par le signal direct pour arriver aux stations de base, ce qui donne des erreurs de localisation importantes. Par exemple, une précision de 3 cm exige une synchronisation de l'ordre de 10 ns.

Pour régler le problème de la synchronisation dans cette technique, on met des stations de bases full-duplex. Chaque station de base émet un signal et reçoit la réflexion de ce dernier sur le mobile, comme l'indique la figure (III.2). Le temps aller-retour TAR du signal est calculé dans l'équation (3.2) ci-dessous:

$$T_{ar} = t_1 - t_0 - t_{replay} \quad (3.2)$$

Où t_1 , est le temps de réception du signal par la station de base, t_0 est le temps de transmission du signal de la station de base et t_{replay} est le temps de traitement du signal dans le récepteur de la cible.

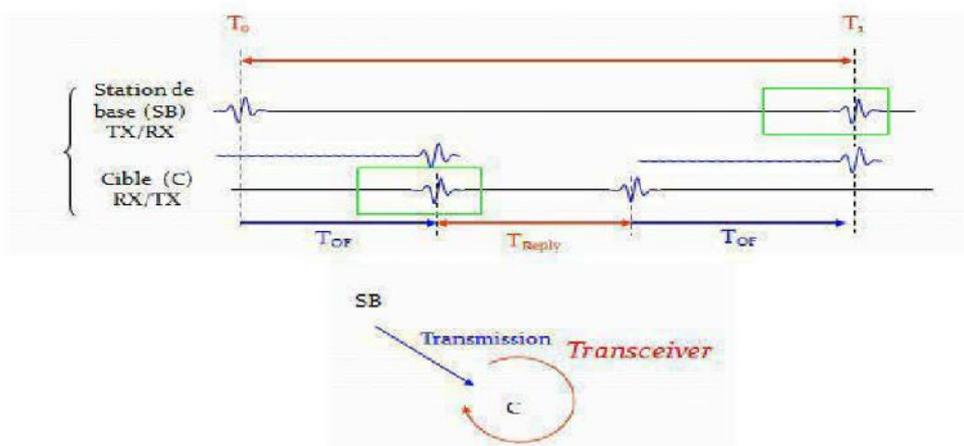


Figure III.2 : Synchronisation de la technique TOA

La distance séparant le mobile et la station de base est donnée par l'équation (3.3) ci-dessous:

$$d = \frac{1}{2} * T_{ar} * c \quad (3.3)$$

Cette approche élimine la nécessité d'une synchronisation entre la station de base et le mobile et elle est la plus couramment utilisée dans les environnements externes.

I.2.2 La différence de temps d'arrivée du signal (TDOA)

La technique TDOA (Time Difference Of Arrival) est basée sur la mesure de la différence du temps d'arrivée du signal entre deux stations de bases pour calculer la distance entre la station de base et le mobile. Cette technique règle le problème de TOA qui est la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur, mais il doit y avoir

une synchronisation entre des paires de stations de bases pour calculer le temps exact d'arrivée du signal.

Le principe de cette technique est donc de calculer la distance séparant le mobile de la station de base à partir de la mesure de la différence du temps d'arrivée du signal émis par la cible à chaque paire de stations de base. Cette technique utilise encore une simple triangulation avec au moins trois stations de base pour déterminer la position de la cible. L'ensemble des positions possibles de la cible pour avoir une même différence de temps d'arrivée à une paire de stations de base donnée est une hyperbole dont l'équation est donnée par l'expression (3.4) suivante.

$$\frac{x^2}{a} + \frac{y^2}{b} = 1 \quad (3.4)$$

Où (x, y) sont les coordonnées de la cible a et b sont les distances entre le mobile et les deux stations de base.

Cette technique est aussi connue sous le nom de technique hyperbolique de localisation. Le mobile est toujours dans la surface d'intersection des hyperboles de ces 3 stations de base. Cette technique est utilisée par différents systèmes de localisation, mais elle demande une synchronisation entre chaque deux paires des stations de bases. Cette technique est illustrée à la figure (III.3).

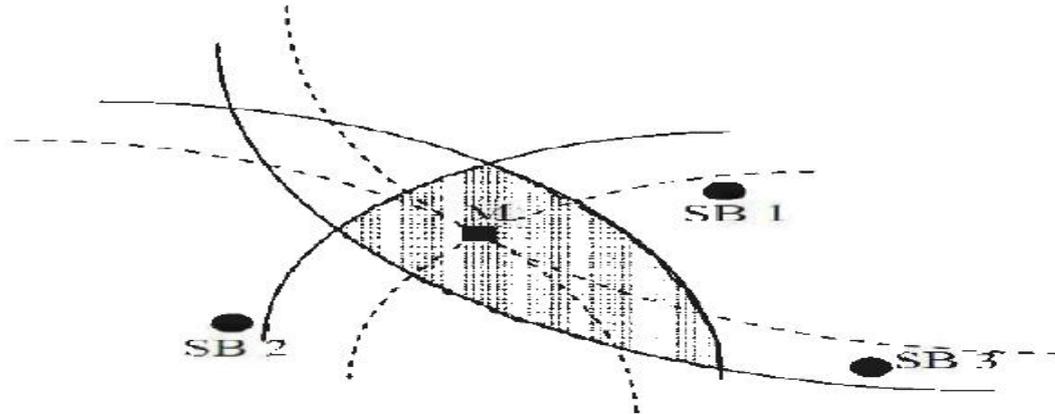


Figure III.3 : Différence de temps d'arrivée du signal (TDOA)

Cette technique de radiolocalisation souffre du même problème pour les erreurs de localisation que les autres techniques à cause de la synchronisation entre les paires de stations de base. Une très faible désynchronisation peut entraîner une erreur de positionnement de quelques centaines de mètres [14].

I.2.3 Modèle mathématique de la technique de corrélation croisée généralisé (GCC)

Pour un signal $s(t)$ qui se propage dans un canal radio en présence du bruit et des interférences.

Le modèle mathématique générale de l'estimation de la différence de temps entre deux stations de base BS1(t) et BS2(t) peut s'écrire :

$$BS1(t) = A1 * S(t - d1) + n1(t)$$

$$BS2(t) = A2 * S(t - d2) + n2(t)$$

Où A1 et A2 sont les amplitudes respectives des signaux des deux stations de bases, n1(t) et n2(t) sont des bruits additifs, et d1 et d2 sont les différences de temps d'arrivées. On suppose que n1 et n2 sont des processus aléatoires de moyenne nulle et ils sont indépendants de s(t), alors on peut réécrire les équations de la manière suivante :

$$BS1(t) = S(t) + n1(t)$$

$$BS2(t) = A * S(t - D) + n2(t)$$

Où $A = A1/A2$ et $D = d2 - d1$.

Une fonction de corrélation croisée estimée pour ces deux signaux est

$$R_{1,2} = \int_0^T S1(t) * S2(t + \tau) dt$$

Où T représente le temps d'observation. Une fois la fonction de corrélation croisée est calculée à la station de base de référence, la valeur de τ qui maximise l'équation ci-dessus permet l'estimation TDOA [15].

I.2.4 Formulation mathématique des équations hyperboliques

Le modèle général de l'estimation de position en deux dimensions d'une source utilisant M stations de base est développé, on assume que toutes les TDOA se lient à la première station de base, cette base est celle qui contrôle les appels, mais aussi c'est la première à recevoir le signal transmis.

$I = 1, 2, \dots, M$ est l'index des stations de bases.

(x, y) sont les coordonnées de la source, et (X_i, Y_i) sont les coordonnées de la i ième station de base.

La distance comprise entre la source et la i ième station de base est donné :

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (3.5)$$

L'écart de distance entre la station qui contrôle et une autre station est donné :

$$\begin{aligned} R_{i,1} &= c * d_{i,1} = R_i - R_1 \\ &= \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Où c est la vitesse de propagation du signal, $R_{i,1}$ est la distance entre la première station de base et la i ième station de base, R_1 est la distance entre la première station

de base et la source. $d_{i,1}$ est l'estimée TDOA entre la station de contrôle et la i ième station de base [16].

Géométriquement, à chacune de ces équations, on peut associer une hyperbole dont les foyers sont les deux stations de base considérées. C'est pour cette raison deux mesures de TDOA permettent de déterminer la position du mobile comme l'intersection de deux hyperboles. Cependant, les temps d'arrivées étant souvent erronés (erreurs de mesure, d'estimation, ou encore absence de trajet direct), il est préférable de disposer de plus de deux mesures de TDOA.

Quelques soit le système d'équations utilisé, il s'agit d'un système non linéaire et par conséquent difficile à résoudre, on peut envisager deux approches, soit on cherche une solution explicite au problème, soit on fait appel à une approche itérative.

I.2.5 Algorithmes proposés pour la résolution du système d'équations hyperboliques

I.2.5.1 Méthode de Chan

La méthode de Chan est une méthode non itérative utilisée pour résoudre les équations hyperboliques et déterminer la position du mobile en utilisant les différences de temps d'arrivée, pour un système de trois stations de base, qui produit deux TDOA, la solution est sous la forme :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{3,1} \end{bmatrix} R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.7) \\ K_1 &= X_1^2 + Y_1^2 \\ K_2 &= X_2^2 + Y_2^2 \\ K_3 &= X_3^2 + Y_3^2 \end{aligned}$$

Quand (3.7) est inséré dans (3.5), avec $i=1$, on obtient une équation du second degré qui dépend de R_1 . on trouve généralement deux solution différentes, mais une seule d'entre elles sera validé à l'aide des informations *a priori*.

I.2.5.2 Méthode des séries de Taylor

Cette méthode est utilisée pour trouver une estimation précise de la position du mobile en présence d'un niveau élevée de bruit, elle consiste à linéariser l'ensemble des équations (3.5), ensuite on utilise la méthode pour résoudre le système d'équations linéaires, la méthode nécessite une estimation initiale $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)$, elle améliore l'estimation à chaque itération par la détermination de la solution locale linéaire des moindres carrés (LS).

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = (G_t^T Q^{-1} G_t)^{-1} G_t^T Q^{-1} h_t \quad (3.8)$$

Où

$$h_t = \begin{bmatrix} R_{2,1} - (R_2 - R_1) \\ R_{3,1} - (R_3 - R_1) \\ \vdots \\ R_{M,1} - (R_M - R_1) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$G_t = \begin{bmatrix} [(X_1 - x)/R_1] - [(X_2 - x)/R_2] & [(Y_1 - y)/R_1] - [(Y_2 - y)/R_2] \\ [(X_1 - x)/R_1] - [(X_3 - x)/R_3] & [(Y_1 - y)/R_1] - [(Y_3 - y)/R_3] \\ \vdots & \vdots \\ [(X_1 - x)/R_1] - [(X_M - x)/R_M] & [(Y_1 - y)/R_1] - [(Y_M - Y)/R_M] \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Q est la matrice de covariance des estimées TDOA.

Les valeurs R_i pour $i = 1, 2, \dots, M$ sont calculés à partir de l'équation (3.5) avec $x = x_0$ et $y = y_0$, la prochaine itération sera initialisé par $x_0 + \Delta x$ et $y_0 + \Delta y$ le processus sera répétée jusqu'à ce qu'un nombre d'itérations N fixé soit atteint, ou Δx et Δy soit suffisamment petits, la méthode de Taylor peut parvenir à de bons résultat à condition de bien choisir les valeurs initiales (x_0, y_0) [17].

1.2.5.3 Méthode de Fang

Pour des positions arbitraire des stations de base et un système d'équations consistant (nombre d'équations est égales au nombre d'inconnus).

Pour un système d'équations hyperboliques de deux dimensions utilisant trois stations de base, en supposant que les 3 BS sont alignée comme suit :

$$BS\#1 = (0,0)$$

$$BS\#2 = (x_2, 0)$$

$$BS\#3 = (x_3, y_3)$$

On remarque que pour $i = 1$, $x_1 = 0$, $y_1 = 0$ et pour $i = 2$, $y_2 = 0$, alors on peut faire les simplifications suivantes :

$$R_1 = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2}$$

$$X_{i,1} = X_i - X_1 = X_i$$

$$Y_{i,1} = Y_i - Y_1 = Y_i$$

En utilisant les équations de la relation (3.6) on trouve :

$$2 \cdot R_{2,1} R_1 = R_{2,1}^2 - X_i^2 + 2 \cdot X_i x \quad (3.11)$$

$$2 \cdot R_{3,1} R_3 = R_{3,1}^2 - (X_3^2 + Y_3^2) + 2 \cdot X_3 x + 2 \cdot Y_3 y$$

En combinant les deux équations précédentes et en simplifiant on aura :

$$y = g * x + h \quad (3.12)$$

$$g = \{R_{3,1} - (X_2/R_{2,1}) - X_3\}/Y_3$$

$$h = \{X_3^2 + Y_3^2 - R_{3,1}^2 + R_{3,1} * R_{2,1}(1 - (X_2/R_{2,1})^2)\}/2 \cdot Y_3$$

En remplaçant l'équation (3.12) dans l'équation (3.11) le résultat suivant :

$$d * x^2 + e * x + f = 0 \quad (3.13)$$

$$d = -\{1 - (X_2/R_{2,1})^2 + g^2\}$$

$$e = X_2 * \{1 - (X_2/R_{2,1})^2\} - 2g * h$$

$$f = (R_2^2/4) * \{1 - (X_2/R_{2,1})^2\}^2 - h^2$$

On résout l'équation (3.13) et on trouve deux valeurs de x . On choisit la bonne solution en utilisant les informations *a priori*, on utilise la valeur de x dans l'équation (3.12) pour calculer y [18].

I.3 Etude du Modèle de simulation

I.3.1 Modèle du simulateur CDMA (liaison montante)

Le simulateur CDMA émule une simple chaîne de communication CDMA, un schéma du modèle de simulation est illustré dans la figure (III.4). La simulation inclut les effets du bruit gaussien additif, et l'interface d'accès multiple (MAI). A l'aide de cette simulation, on peut estimer les signaux transmis via le canal de propagation en fonction du rapport signal sur bruit (SNR), du nombre d'utilisateurs (NoI) et du facteur d'étalement (SF).

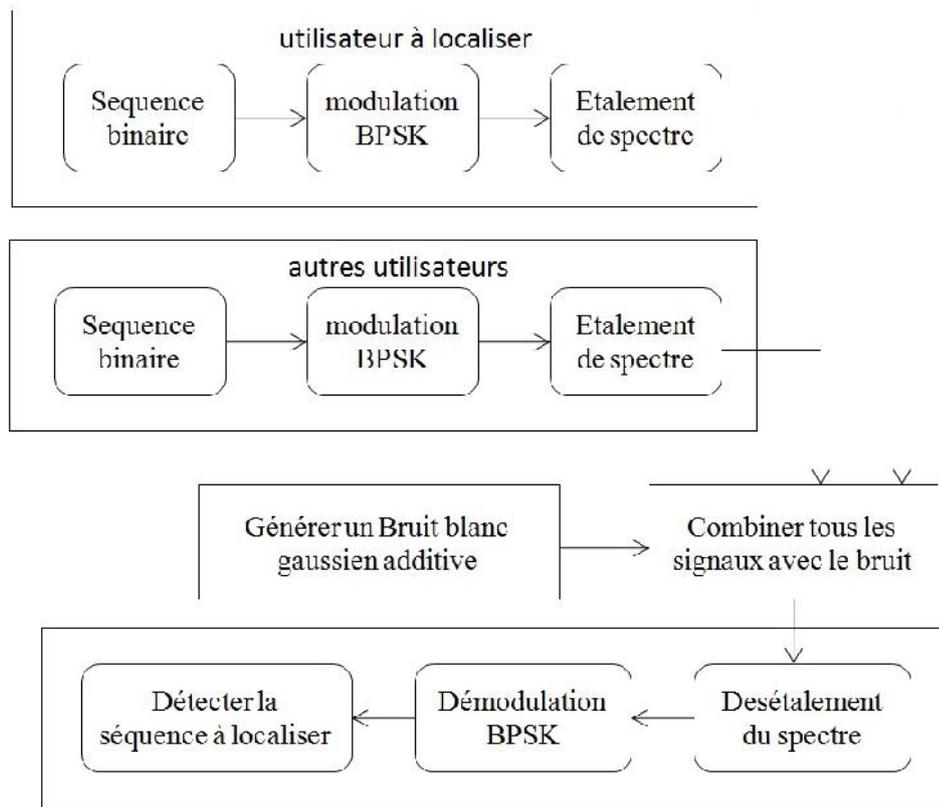


Figure III.4 : Schéma simplifié d'une chaîne de transmission CDMA

Une séquence binaire pseudo aléatoire BPSK est générée au niveau de l'émetteur (mobile) pour chaque utilisateur de la cellule.

Puis chaque symbole générée est étalée par une séquence de code PN, chaque utilisateur avec son propre code d'étalement, cela consiste à décaler la première

version de la séquence du code. On additionne tous les signaux de tous les utilisateurs puis on ajoute un bruit blanc gaussien (AWGN).

Au niveau du récepteur, la séquence du signal à localiser sera détectée juste après le désétalement du signal.

I.3.2 Configuration des stations de base

Dans les systèmes CDMA, la configuration des stations de bases utilisée est basée sur un système de cellule hexagonal, avec un rayon R , dans cette simulation on utilise une configuration à trois stations de base comme illustré dans la figure (III.5).

On assume que la station de base de contrôle (principale) est celle qui se trouve à la distance la plus proche du mobile, et toutes les stations de bases sont parfaitement synchronisé avec une horloge commune. Pour un environnement macro-cellulaire on utilise $R=5$ km, et pour un environnement micro-cellulaire on utilise $R=1$ km.

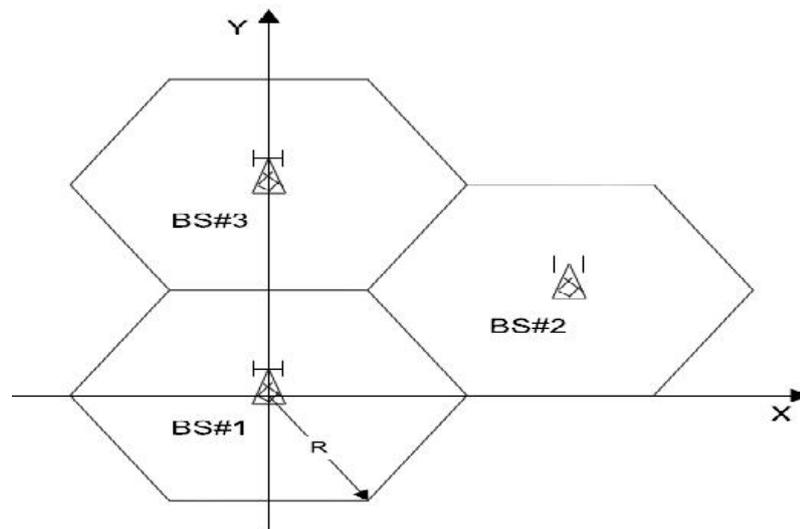


Figure III.5 : configuration à trois stations de base

I.3.3 Modèle du signal reçu

Dans cette partie nous allons montrer comment les signaux reçus à chaque station de base sont générés, pour la configuration de trois stations de bases, et pour une position donnée d'un mobile. La première étape consiste à générer une position aléatoire du mobile (MS) dans une des trois BS, puis on calcule la distance (MS-BS) pour chaque station de base. Cela va nous permettre de détecter la station de base la plus proche, puis de calculer les retards de propagation d_1 , d_2 et d_3 .

On assume que la vitesse de propagation est $c = 3 * 10^8$ m/s, les retards relatifs entre la station la plus proche (BS#1) et les deux autres sont respectivement $d_{2,1}$ et $d_{3,1}$ tel que :

$$d_{2,1} = d_2 - d_1$$

$$d_{3,1} = d_3 - d_1$$

Un signal BPSK aléatoire est généré pour chaque station de base, ensuite échantillonné et décalé selon les retards relatifs expérimentés. Les signaux sont ensuite passés à travers un bruit blanc Gaussien additif (AWGN) du canal, où la puissance de bruit est mise à l'échelle en fonction du rapport signal-sur-bruit (SNR).

Les signaux reçus des stations de base voisines sont des versions décalées dans le temps du signal reçu sur BS # 1.

$$r_1(t) = s(t) + n(t)$$

$$r_2(t) = s(t - d_{2,1}) + n(t)$$

$$r_3(t) = s(t - d_{3,1}) + n(t)$$

Les signaux reçus sont ensuite traités par l'estimateur TDOA et algorithme de localisation pour fournir une estimation de la position du mobile [17].

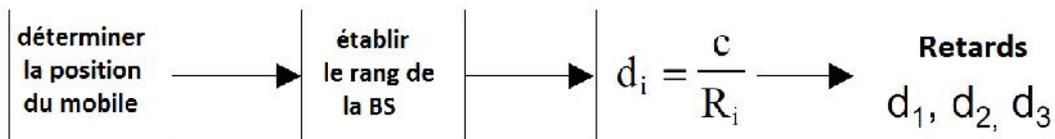


Figure III.6 : Calcul des retards de propagations

I.3.4 Procédure de localisation de position

La technique de localisation de position utilisée dans ces simulations consiste à une corrélation croisée généralisée pour trouver les estimées TDOA puis on utilise les algorithmes de Chan et les séries de Taylor pour estimer la position du mobile, ensuite on va calculer l'erreur quadratique, comme le montre la figure (III.7).

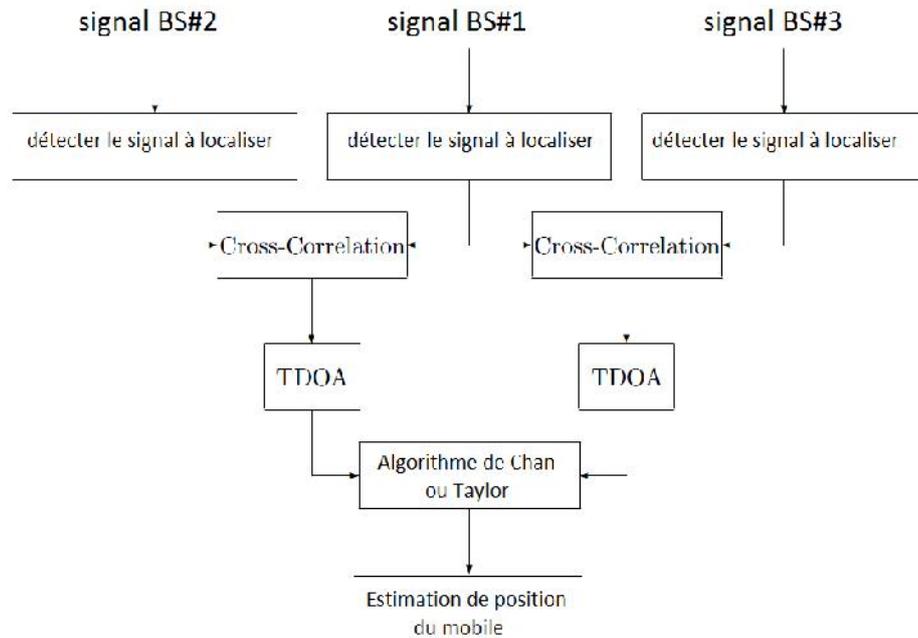


Figure III.7 : Procédure d'estimation de position

I.4 Résultats de simulations

Dans cette partie nous allons présenter les résultats des simulations, de la technique hyperbolique de localisation de position dans un système CDMA comme décrit précédemment, les effets du canal radio mobile, plus précisément le bruit additif (AWGN), ainsi que l'effet de la distance entre mobile et la station de base, le taux d'échantillonnage, et le facteur d'étalement SF, sur la précision de la technique .

Entre temps nous allons aussi comparer les résultats obtenues par les différents algorithmes qu'on cité précédemment.

I.4.1 Simulation dans un environnement macro et micro-cellulaire

Les simulations que nous proposons ont été réalisées avec 3 BS placées dans un environnement micro-cellulaire ($R=1$ km), puis dans un environnement macro – cellulaire($R=5$ km).

La configuration des stations de base utilisée dans cette simulation est comme suit :

$$BS\#1 = (0,0)$$

$$BS\#2 = (R, 0)$$

$$BS\#3 = (R/2, \sqrt{3}/2)$$

Pour nos simulations on a choisis de varier trois paramètres qui agissant sur la localisation de position du mobile.

Ces paramètres sont la distance entre le mobile et la station de base principale, le taux d'échantillonnage (N_{samp}) et la période binaire (T_b).

Pour chacun de ces paramètres d'estimations, quatre courbes sont tracées correspondant à deux algorithmes de localisation de position (algorithme de Chan et algorithme de Taylor), pour les deux environnements micro et macro-cellulaire.

Pour étudier les effets de ces paramètres d'estimation sur la précision de la localisation de position on a choisis un critère quadratique pour l'erreur de localisation tel que :

$$Err = \sqrt{(x_{est} - x)^2 + (y_{est} - y)^2}$$

Err = erreur quadratique.

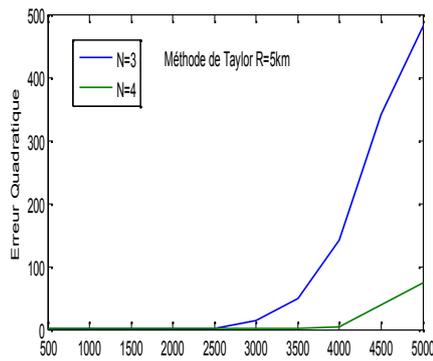
x_{est} = x estimée.

y_{est} = y estimée.

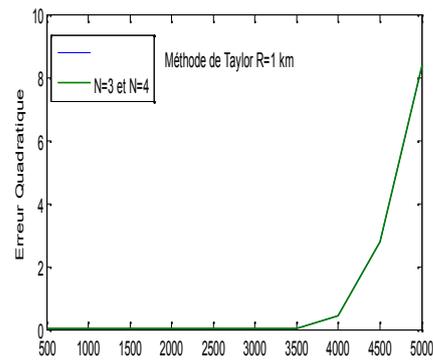
Pour la méthode Taylor, on prend les coordonnées initiales $x_0 = 50$ et $y_0 = 50$ pour toutes les simulations de ce travail.

I.4.1.1 Effet de la distance entre le mobile et la station de base principale

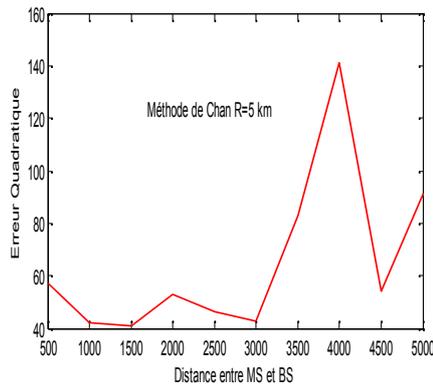
Pour cette simulation on a choisi de varier *la distance entre le mobile et la station de base principale* de 500 m à 5000 m avec un pas de 500 m pour un environnement macro-cellulaire, et de 100 m à 1000 m, avec un pas de 100 m pour un environnement micro-cellulaire, les résultats obtenues sont illustrer dans la figure (III.8).



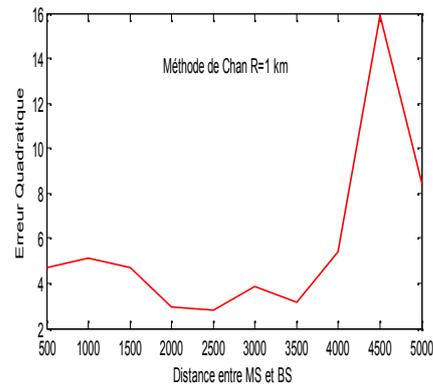
8-a : Méthode de Taylor, R=5 km



8-b : Méthode de Taylor, R=1 km



8-c : Méthode de Chan, R=5 km



8-d : Méthode de Chan, R=1 km

Figure III.8 : Effet de la distance entre le mobile et la station de base principale

L'examen des courbes obtenues de la figure (8-a) montre que l'erreur quadratique est relativement faible pour une distance entre mobile et station de base principale allant de 500 à 2500m, à partir de 2500 m l'erreur quadratique augmente d'une manière très importante, on remarque aussi que le nombre d'itérations N est un facteur qui fait diminuer l'erreur quadratique.

Pour la figure (8-b) le nombre d'itérations n'a aucun effet sur la variation de l'erreur, et l'erreur commence augmenter d'une façon importante à partir de 3500 m.

Pour les figures (8-c) et (8-d) l'erreur quadratique est relativement faible, mais elle présente respectivement des pics à 3800 m et 4400 m.

Si on compare les deux méthodes (Chan et Taylor) on peut constater que la méthode de Taylor présente une localisation de position plus précise que celle de Chan pour $R=1$ km, cependant c'est le contraire pour $R=5$ km.

I.4.1.2 Effet du taux d'échantillonnage (N_{samp})

Pour cette simulation on a choisi de varier le *taux d'échantillonnage* (N_{samp}) de 10 échantillons à 100 échantillons avec un pas de dix, les résultats obtenus sont illustrés dans la figure (III.9).

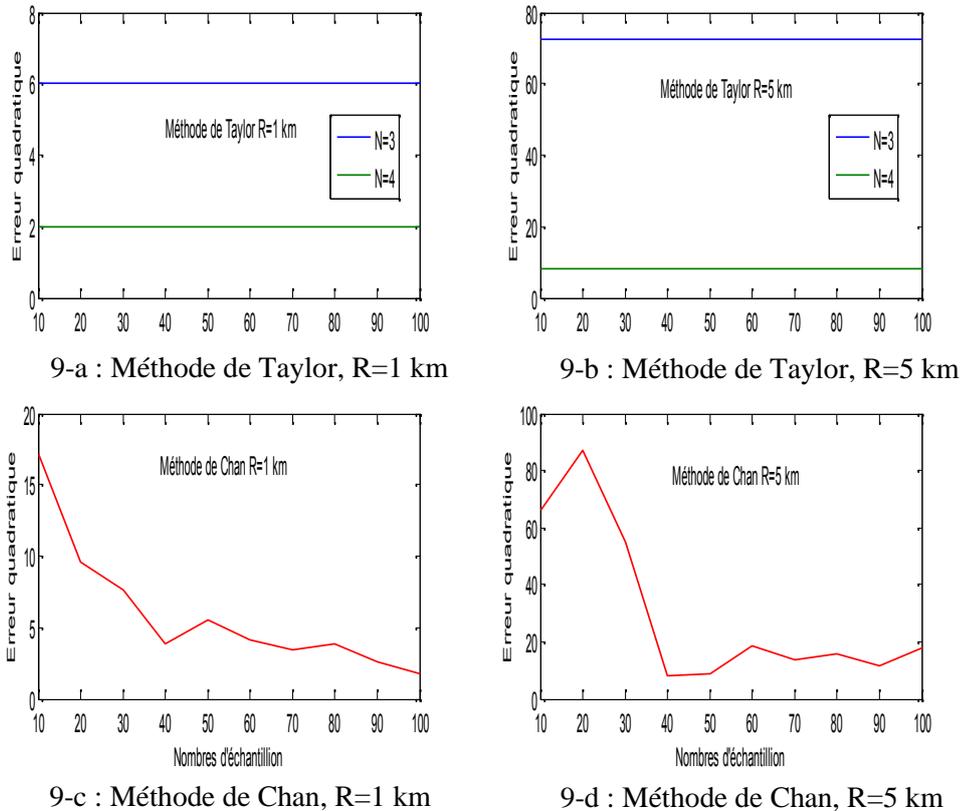


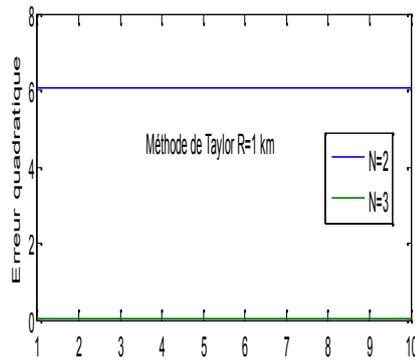
Figure III.9 : Effet du taux d'échantillonnage(Nsamp)

L'examen des courbes obtenues de la figure (9-a) et (9-b) montrent que le taux d'échantillonnage (Nsamp), à une grande influence sur la précision des estimations obtenues par la méthode de Chan, cependant on ne constate aucun effet pour les résultats obtenues par la méthode de Taylor.

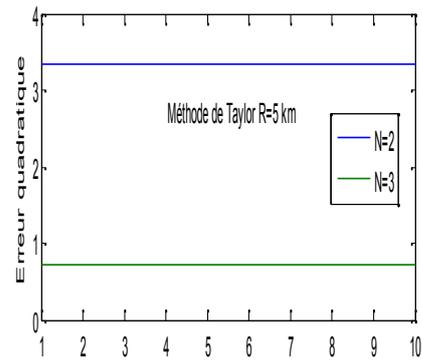
Une deuxième remarque concernant les résultats obtenus avec la méthode de Chan, ainsi les figures (9-c) et (9-d) montrent que la précision de localisation augmente, avec l'augmentation du taux d'échantillonnage (Nsamp).

I.4.1.3 Effet de la période binaire (T_b)

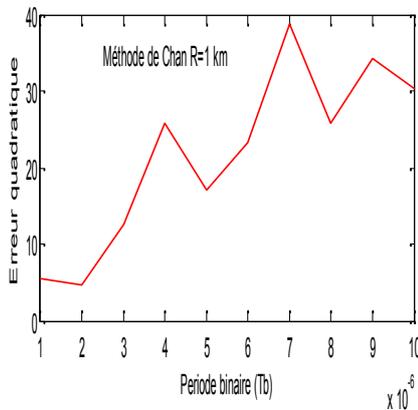
Pour cette simulation on a choisi de varier période binaire (T_b) de 10^{-5} bit/s à 10^{-6} bit/s avec un pas de 10^{-6} bit/s, les résultats obtenus sont illustrés dans la figure (III.10).



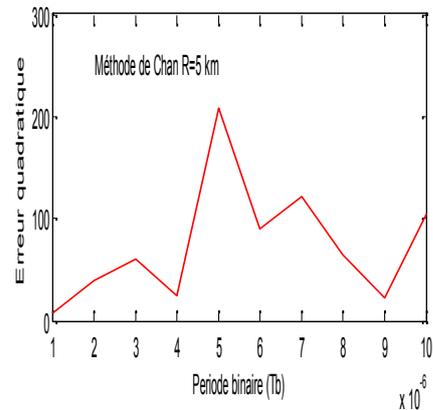
10-a : Méthode de Taylor, R=1 km



10-b : Méthode de Taylor, R=5 km



10-c : Méthode de Chan, R=1 km



10-d : Méthode de Chan, R=5 km

Figure III.10 : Effet de la période binaire (T_b)

L'examen des courbes obtenues les figures (10-c) et (10-d) montrent l'erreur quadratique varie en dents de scie avec l'augmentation de la période binaire (T_b), La plus faible valeur de l'erreur quadratique obtenue correspond à $T_b = 10^{-6} \text{ bits/s}$.

Pour les figures (10-a) et (10-b), on ne remarque aucun effet de la période binaire (T_b) sur l'erreur quadratique.

I.4.2 Analyse des résultats obtenus

I.4.2.1 Méthode de Taylor

L'augmentation de la distance entre le mobile et station de base principale fait diminuer la précision de la localisation, cela peut s'expliquer par la mauvaise initialisation (choix de x_0 et y_0), la solution c'est de trouver ces coordonnées initiales par un autre algorithme (algorithme de Fang par exemple), ou augmenter encore le nombre d'itérations N .

A partir d'une certaine distance (MS-BS) le choix de l'initialisation accroît son effet sur la précision de localisation par rapport au nombre d'itérations N .

On conclue que l'initialisation des coordonnées et le nombre d'itérations sont les deux seuls paramètres agissant sur la précision pour la méthode de Taylor.

I.4.2.2 Méthode de Chan

On a pu constater que l'erreur quadratique varie en dents de scie avec l'augmentation de la distance entre le mobile et la station de base principale. Cela peut s'expliquer par le changement de rang des stations de bases, les pics les plus importants correspondent à une position où le mobile se trouve très loin des trois BS.

La précision de la méthode de Chan dépend du changement de rang des stations de bases, mais aussi du taux d'échantillonnage (N_{samp}) et de la période binaire (T_b), c'est pour cela qui faut choisir judicieusement la fréquence de sortie du modulateur, pour avoir une précision maximale.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les aspects du problème de localisation de position liés à la méthode TDOA dans le réseau CDMA, avec beaucoup de simplifications.

Après avoir brièvement décrit les méthodes TOA et TDOA, et proposer quelques algorithmes de localisation pour la résolution des équations hyperboliques, nous avons ensuite élaboré un modèle de simulation pour le réseau CDMA et examiner la procédure de localisation de la position.

Ensuite nous avons effectué plusieurs simulations sous différentes conditions, L'objectif de ces simulations était d'étudier les différents paramètres influençant la précision de localisation de position.

A la fin du chapitre nous avons analysé et comparé les résultats obtenus pour les méthodes de Chan et Taylor, en variant plusieurs paramètres.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire , nous avons abordé le problème de géolocalisation dans le plan bidimensionnel d'une source mobile par trois stations de bases, avec la technique hyperbolique de localisation de position, cette méthode qu'on appelle aussi TDOA consiste à mesurer l'instant d'arrivée d'un signal émis par une source mobile en plusieurs points de l'espace et à comparer la différence entre les instants mesurés dans chaque station de base.

La méthode qu'on a utilisée est la corrélation croisée de deux signaux reçu dans une paire de station de base, il existe beaucoup d'algorithmes pour améliorer la précision des estimations, dans ce travail nous avons choisis l'algorithme de Chan et celui de Taylor.

L'objectif de ce travail était la simulation de la méthode TDOA dans un réseau CDMA, en utilisant ces deux algorithmes, pour déterminer les paramètres agissant sur la précision de la localisation.

Après avoir élaboré un modèle d'une chaîne de transmission CDMA avec beaucoup de simplifications, nous avons expliqué la procédure de localisation, puis nous avons testé les algorithmes de localisation en variant plusieurs paramètres.

Nous avons conclu que l'algorithme de Taylor dépend du nombre d'itérations mais aussi des coordonnées initiales c'est pour ça qu'il faut judicieusement choisir ces coordonnées.

Pour l'algorithme de Chan la fréquence d'échantillonnage un facteur très important agissant sur la précision des estimateurs, le nombre d'échantillon a un effet plutôt positif sur la précision.

Les perspectives :

- ✓ Utiliser plus de trois stations de base pour la simulation de la méthode.
- ✓ Simulation de la technique TDOA dans un environnement multi-trajet.
- ✓ Simulation de la technique AOA et la technique hybride TDOA/AOA dans un réseau CDMA.

Bibliographie

- [1] Amel Aissaoui '*Synchronisation adaptative du code PN dans les systèmes de communication DS/SS*'
Magister en électronique Université Mentouri Constantine novembre 2010
- [2] Eric Hamelin '*Etude des performances d'un système CDMA à taux multiples*'
Thèse de doctorat Université Laval septembre 1997
- [3] Crépin Nsialanzéza '*Récepteur adaptatif multistandards pour les signaux à étalement de spectre en contexte non coopératif*' thèse doctorat Université de Bretagne Occidentale juillet 2006
- [4] Eric Batut '*Etude du bloc de réception dans un terminal UMTS-FDD*'
Thèse de doctorat Institut national polytechniques de Grenoble Juin 2002.
- [5] Melal Khireddine '*Analyse des méthodes d'égalisation des techniques CDMA*'
Magister en télécommunications Université de Batna Novembre 2008
- [6] Michel Thériault '*Etude des performances d'un système DS-CDMA avec récepteur rake dans le contexte UWB*' master of science Université Laval Québec octobre 2005
- [7] B.Sklar '*Rayleigh fading channels in mobile communication système part characterization*'
IEEE Communication Magazine, pp,90-100,july 1997
- [8] Omar Rachid Hadjar '*Analyse, Implémentation et évaluation de performance de la future méthode d'accès HSDPA*' the se doctorat Université de Laval Québec Mars 2004
- [9] Iness AHRIZ ROULA '*Applications des techniques d'apprentissage à la géolocalisation par radio fingerprint*' Thèse doctorat UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE décembre 2010
- [10] STEFANUT Paul '*Application des algorithmes de haute résolution à la localisation de mobiles en milieu confiné*' Thèse de doctorat Université des Sciences et Technologies de Lille Juin 2010
- [11] Frédéric Evennou '*Techniques et Technologies de localisation avancées pour terminaux mobiles dans les environnements indoor*' Thèse de doctorat UNIVERSITE JOSEPH FOURIER –GRENOBLE janvier 2007
- [12] Master pro télécom '*géolocalisation*' Université des Sciences et Technologies de Lille décembre 2006
- [13] Xavier Lagrange Philippe Godlewski Sami Tabbane '*Réseaux GSM*'
5e édition revue et augmentée (30 juillet 1970)
- [14] Ahmed AL MASRI '*Localisation sur une plateforme radio définie par logiciel*'
Master of science Université de Québec décembre 2012
- [15] Emmanuèle Grosicki '*Techniques avancées du traitement d'antennes pour la localisation de sources*'
Thèse doctorat Paris TELECOM décembre 2003
- [16] Muhammad Aatique '*Evaluation of TDOA Techniques for position location in CDMA systems*'
Master of science Virginia Polytechnic Institute September 1997
- [17] George A.Mizusawa '*Performance of hyperbolic position location techniques for code division multiple access*' Master of science Virginia Polytechnic Institute décembre 1996
- [18] HakanSenturk '*Performance evaluation of hyperbolic position location in cellular wireless networks*'
Master of science Air force Institute of technology Ohio mars 1999