

# TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 PROPAGATION DES ONDES RADIOÉLECTRIQUES .....	4
1.1 Caractérisation statistique de la propagation des ondes radioélectriques .....	4
1.1.1 Affaiblissement de propagation .....	4
1.1.2 Évanouissement à grande échelle .....	8
1.1.3 Évanouissement à petite échelle .....	10
1.2 Propagation dans un environnement microcellulaire .....	15
1.3 Conclusion .....	18
CHAPITRE 2 LE TRANSFERT INTERCELLULAIRE .....	19
2.1 Introduction au transfert intercellulaire .....	19
2.1.1 Définition .....	19
2.1.2 Caractéristiques .....	20
2.1.3 L'importance du transfert intercellulaire .....	21
2.2 Types de transfert intercellulaire .....	22
2.3 Le processus du transfert intercellulaire .....	24
2.4 Les algorithmes de décision pour le transfert intercellulaire .....	25
2.4.1 Algorithmes basés sur une comparaison de seuil .....	26
2.4.2 Algorithmes basés sur l'intelligence artificielle .....	28
2.4.3 Algorithmes basés sur une fonction coût .....	30
2.4.4 Choix de l'algorithme .....	31
CHAPITRE 3 ALGORITHME DE TRANSFERT INTERCELLULAIRE BASÉ SUR LE FILTRAGE DE KALMAN .....	32
3.1 L'environnement de propagation .....	34
3.2 Filtrage ou estimation du signal .....	37
3.2.1 Filtre EWMA .....	37
3.2.2 Filtre de Kalman .....	41
3.3 Algorithme de décision .....	43
3.3.1 Algorithme basé sur une comparaison de seuil du signal estimé .....	44
3.3.2 Algorithme basé sur une comparaison de seuil du signal avec une minuterie de passage .....	46
CONCLUSION .....	53
BIBLIOGRAPHIE .....	56

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Le modèle de réflexion sur le sol .....7
Figure 1.2	L'effet Doppler : trajectoire du signal et direction de mouvement .....13
Figure 1.3	L'autocovariance du signal reçu.....14
Figure 3.1	Le transfert intercellulaire vertical d'un réseau WLAN vers un réseau cellulaire.....33
Figure 3.2	Diagramme bloc de l'algorithme de transfert intercellulaire vertical .....33
Figure 3.3	Variation de la puissance du signal reçu en fonction de la distance parcourue pour une vitesse du mobile de 5 km/h .....36
Figure 3.4	Variation de la puissance du signal reçu en fonction de la distance parcourue pour une vitesse du mobile de 50 km/h .....37
Figure 3.5	Diagramme bloc d'un filtre à moyenne mobile pondérée exponentielle..38
Figure 3.6	Diagramme bloc du bloc de traitement en utilisant deux filtres à moyenne mobile pondéré cascades .....39
Figure 3.7	Puissance du signal reçu après traitement par un filtre EWMA cascades pour une vitesse du mobile de 5 km/h .....40
Figure 3.8	Puissance du signal reçu après traitement par un filtre EWMA cascades pour une vitesse du mobile de 50 km/h .....40
Figure 3.9	Diagramme bloc d'un filtre de Kalman scalaire .....41
Figure 3.10	Puissance du signal reçu estimé par un filtre de Kalman pour une vitesse du mobile de 5 km/h.....43
Figure 3.11	Puissance du signal reçu estimé par un filtre de Kalman pour une vitesse du mobile de 50 km/h.....43
Figure 3.12	Schéma bloc de l'algorithme de décision basé sur une comparaison de seuil du signal estimé .....44
Figure 3.13	Signal de control pour le transfert intercellulaire basé sur une comparaison de seuil du signal estimé pour une vitesse du mobile de 5 km/h .....45

Figure 3.14	Signal de control pour le transfert intercellulaire basé sur une comparaison de seuil du signal estimé pour une vitesse du mobile de 50 km/h .....	46
Figure 3.15	Schéma bloc de l'algorithme de décision basé sur une comparaison de seuil avec une minuterie de passage .....	47
Figure 3.16	Signal de control pour le transfert intercellulaire basé sur une comparaison de seuil du signal estimé avec une minuterie de passage pour une vitesse du mobile de 5 km/h .....	48
Figure 3.17	Signal de control pour le transfert intercellulaire basé sur une comparaison de seuil du signal estimé avec une minuterie de passage pour une vitesse du mobile de 50 km/h .....	49
Figure 3.18	Nombre de transferts intercellulaires en fonction de la vitesse de la station mobile.....	51
Figure 3.19	Nombre de faux transferts intercellulaires en fonction de la vitesse de la station mobile.....	53

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

3G	“Third Generation”, Troisième génération.
3GPP	“Third Generation Partnership Project”, Troisième génération de partenariat du projet.
4G	“Forth Generation”, Quatrième génération.
AP	“Access Point”, Point d’accès.
BS	“Base Station”, Station de base.
EDGE	“Enhanced Data rates for GSM Evolution”, Système global de telecommunication mobile à débit amélioré.
EWMA	“Exponentially Weighted Moving Average”, Filtre à moyenne mobile pondérée exponentielle.
GPRS	“General Packet Radio Service”, Service général de la radiocommunication en mode paquet.
GSM	“Global System for Mobile telecommunication”, Système global de telecommunication mobile.
IEEE	“Institute of Electrical and Electronics Engineers”, Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens.
IP	“Internet Protocol”, Protocole internet.
IRSS	“Instantaneous Received Signal Strength”, Puissance du signal reçu instantané.
MAHO	“Mobile Assisted Handoff”, Transfert intercellulaire assisté par le mobile.
MCHO	“Mobile Controlled Handoff”, Transfert intercellulaire contrôlé par le mobile.
MMSE	“Minimum Mean Square Error”, Erreur quadratique moyenne minimale.
MS	“Mobile station”, Station mobile.
NCHO	“Network Controlled Handoff”, Transfert intercellulaire contrôlé par le réseau.
RSS	“Received Signal Strength”, Puissance du signal reçu.

SINR	“Signal to Interference and Noise Ratio”, Rapport signal sur interférence plus bruit.
SIR	“Signal to Interference Ratio”, Rapport signal sur interférence.
UMTS	“Universal Mobile Telecommunication System”, Système de telecommunication mobile universelle.
WLAN	“Wireless Local Area Network”, Réseau local sans fil.

## **LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**

dB	déciBel.
dBm	déciBel par milliWatt.
GHz	Giga Hertz.
kbps	kilo bit par second.
km	kilomètre.
m	mètre.
Mbps	Méga bit par second.
MHz	Méga Hertz.

## INTRODUCTION

Dans les nouvelles générations de réseaux sans fil, la mobilité et le transfert entre réseaux hétérogènes est pris en charge. La quatrième génération (4G) des réseaux mobiles exploite la coexistence des technologies sans fil existante telles que WLAN (*Wireless Local Area Network*), GPRS (*General Packet Radio Service*) et UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*).

Les différentes technologies sont reliées pour former un seul réseau et le protocole IP (*Internet Protocol*) sert de liaison entre elles. De nos jours, les terminaux mobiles sont équipés de différentes cartes réseaux et donc la mobilité dans le réseau doit se faire d'une manière transparente à l'utilisateur. Pour réaliser cette vision, beaucoup d'efforts sont requis pour la standardisation, la conception de l'architecture et de l'accès au réseau. Un autre aspect essentiel à élaborer est le développement d'algorithmes de décision pour qu'un terminal mobile initie le transfert entre les différentes interfaces réseaux.

Aujourd'hui, la tendance est d'utiliser les réseaux locaux sans fil qui ont un haut débit et de basculer vers les réseaux cellulaires lorsque la couverture du réseau WLAN n'est plus disponible ou les conditions dans le réseau WLAN ne sont pas assez bonnes. Cependant, ceci implique aussi qu'un mécanisme de transfert doit être en place pour veiller à ce que toutes les connexions du mobile sont transférées au nouveau réseau sans perdre ou détériorer la transmission.

Dans le Tableau 0.1 nous présentons quelques caractéristiques des technologies d'accès sans fil. On note que les systèmes de communications mobiles tels que GSM, GPRS, EDGE et UMTS offrent une grande couverture par rapport au réseau WLAN (IEEE 802.11). Ceci permet une grande mobilité aux utilisateurs. Par contre les réseaux WLAN offrent un débit élevé comparé aux réseaux cellulaires. Ceci donne plus de flexibilité pour les utilisateurs au niveau des applications utilisées, surtout pour celles qui demandent une large bande passante tel que la vidéoconférence.

Tableau 0.1 Caractéristiques des systèmes d'accès de technologie sans fil  
Tiré de (Siddiqui, 2007)

<b>Technologies</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Débit</b>	<b>Couverture</b>
IEEE 802.11g	2.4GHz	54Mbps	30 – 150m
IEEE 802.11b	2.4GHz	11Mbps	Plus 100m
IEEE 802.11a	5GHz	20Mbps	50 – 300m
IEEE 802.20	Moins de 3.5GHz	Plus 9Mbps	20km
IEEE 802.16	10 à 66GHz	Max 70Mbps	Plus 50km
UMTS	2GHz	Max 2Mbps	30m – 20km
GSM, GPRS, EDGE	900, 1800, 1900MHz	9.6 – 384Kbps	Plus 35km

Dans ce cadre, nous explorons le développement d'un algorithme de décision pour le transfert intercellulaire vertical entre les réseaux cellulaires et les réseaux WLAN. En effet, plusieurs recherches ont été faites à ce sujet mais elles étaient surtout concentrées sur des techniques plus sophistiquées pour la prise de décision. De notre côté, nous allons nous intéresser plus à la partie traitement du signal pour fournir des échantillons peu bruités afin de faciliter la prise de décision. Ainsi nous utiliserons des méthodes de décision plus simple et surtout moins couteuse de point de vue complexité de calcul.

Le présent mémoire est divisé en trois chapitres. Le premier présente un survol des notions statistiques de la propagation des ondes radioélectriques ainsi que les spécifications de propagation dans un environnement microcellulaire. Il se focalisera sur la partie caractérisation du canal de propagation. Le deuxième chapitre traitera en détail les algorithmes de transfert intercellulaire en commençant par une définition générale dans le cas des réseaux cellulaires et les réseaux WLAN pour passer ensuite aux types de transfert intercellulaire et la défragmentation du processus de transfert intercellulaire et enfin, il est conclu par une revue de littérature des algorithmes de décision de transfert intercellulaire. Le troisième chapitre aborde l'algorithme de décision de transfert intercellulaire vertical proposé. Il traitera, les différents volets constituant cet algorithme tel que le choix du modèle du canal, les traitements fait sur le signal reçu et les critères de décision choisis. Dans ce



chapitre, nous présenterons les résultats obtenus dans le cadre de ce travail ainsi qu'une comparaison avec les résultats obtenus dans d'autres travaux traitant la même problématique. On finira ce mémoire par une conclusion ainsi que des recommandations pour des travaux futurs.

## CHAPITRE 1

### PROPAGATION DES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

Les algorithmes de transfert intercellulaire ont fait l'objet de plusieurs recherches. Ces recherches sont directement liées au phénomène de propagation des ondes radioélectriques qui présente un défi pour la modélisation du canal de propagation. Afin de comprendre les systèmes de communications sans fil, et en particulier les algorithmes de transfert intercellulaire, le présent chapitre traite les aspects pertinents de la propagation des ondes radioélectriques.

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie aborde la caractérisation statistique de la propagation des ondes radioélectriques. La deuxième partie se concentre sur le phénomène de propagation des ondes radioélectriques dans le cadre d'un environnement microcellulaire.

#### 1.1 Caractérisation statistique de la propagation des ondes radioélectriques

Un modèle bien établi de la propagation des ondes radioélectriques divise la puissance du signal reçu en trois composantes: l'affaiblissement de propagation (*Path Loss*), l'évanouissement à grande échelle (*Large Scale Fading* ou *Shadow Fading*) et l'évanouissement à petite échelle (*Small Scale Fading* ou *Multipath Fading*) (Rappaport, 2002).

##### 1.1.1 Affaiblissement de propagation

Le phénomène d'affaiblissement de propagation est lié à la diminution de la puissance du signal émis par la station de base (dans le cas d'un réseau cellulaire) ou un point d'accès (dans le cas d'un réseau local sans fil). En général, les observations empiriques montrent que la puissance du signal reçue tend à suivre la courbe  $d^{-n}$ , où  $d$  est la distance entre la station de

base et les utilisateurs, et  $n$  est l'exposant d'affaiblissement de propagation qui varie en fonction de la géométrie du milieu (généralement entre 2 et 6). Les valeurs typiques de l'affaiblissement de propagation sont présentées dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 L'exposant d'affaiblissement de propagation pour différents environnements.  
Tirée de (Rappaport, 2002)

Environnement	Exposant d'affaiblissement de propagation, $n$
Espace libre	2
Zone urbaine radio cellulaire	2,7 à 3,5
Zone urbaine cellulaire à évanouissement	3 à 5
En vue directe dans un bâtiment	1,6 à 1,8
En vue non directe dans un bâtiment	4 à 6
En vue non directe dans une usine	2 à 3

La puissance du signal reçu dans l'espace libre est donnée par la formule de Friis (*Rappaport, 2002*) :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 \Lambda_0} \quad (1.1)$$

Avec :

- $P_r(d)$  est la puissance du signal reçu à une distance  $d$  de l'émetteur ;
- $P_t$  est la puissance transmise ;
- $G_t$  et  $G_r$  sont respectivement les gains des antennes de l'émetteur et du récepteur (par rapport aux antennes isotropes) ;
- $\lambda$  est la longueur d'onde ;
- et  $\Lambda_0$  est le facteur de perte du système causé par des effets qui ne sont pas liés à la propagation (par exemple les pertes dans les filtres, les antennes, etc.).

Dans l'équation (1.1) l'exposant d'affaiblissement de propagation est 2, donc on pourrait s'attendre que  $n$  soit égal à 2 dans tous les systèmes de communications sans fils. Toutefois,

les environnements de propagation ne sont généralement pas en espace libre car ils comportent non seulement des trajets multiples de réflexion, diffraction et réfraction mais en plus le trajet peut être obstrué. A priori, on considère un exposant d'affaiblissement typique,  $n$ , égal à environ 4 dans la plupart des endroits autour d'une station de base. Ceci peut être expliqué par le modèle de réflexion sur le sol et par les pertes par absorption dans les réflecteurs et les diffuseurs. Immédiatement autour de la station de base, la propagation est supposée dans l'espace libre. Cependant, plus loin de la station de base, la puissance du signal du trajet direct et celle des trajets réfléchis sont comparables. Ces signaux sont additionnés au récepteur et leur addition peut être constructive, si les signaux arrivent en phase, comme elle peut être destructive dans le cas où les signaux arrivent en opposition de phase. La propagation des signaux, loin de la station de base, ne peut donc pas être réduite à une propagation dans l'espace libre. Par conséquent, il existe des méthodes de modélisation pour approximer les effets du canal dans de telles circonstances.

Supposons que nous avons deux antennes à une distance  $d_0$  mètres, comme dans la figure 1.1. L'antenne de l'utilisateur est à une hauteur de  $h_1$  mètres et l'antenne de la station de base est à  $h_2$  mètres. Il y a deux chemins principaux entre la station de base et l'utilisateur, à savoir le trajet direct et le trajet réfléchi par le sol. Le chemin réfléchi fait un angle  $\theta$  avec le sol. En général,  $\theta$  sera faible lorsque  $d_0$  est beaucoup plus grand que  $h_1$  et  $h_2$ . Toutefois, pour plus de clarté dans l'illustration, la taille de  $\theta$  a été agrandie dans la figure 1.1.

La longueur du trajet direct est donnée par :

$$d_{direct} = d_1 = \sqrt{d_0^2 + (h_2 - h_1)^2} \quad (1.2)$$

La longueur du trajet réfléchi par le sol est donnée par :

$$d_{réfléchi} = d_2 + d_3 = \sqrt{d_0^2 + (h_1 + h_2)^2} \quad (1.3)$$

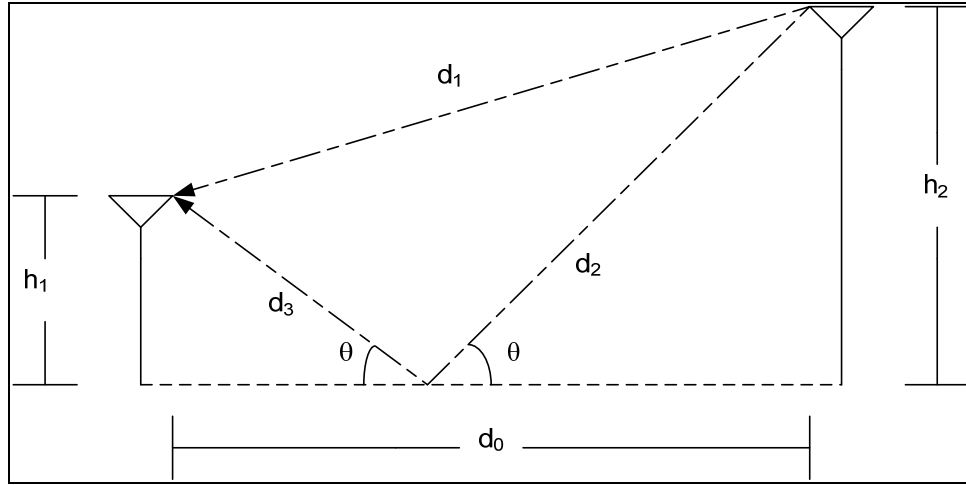


Figure 1.1 Le modèle de réflexion sur le sol

La différence de longueur de trajet est :

$$d_{\text{difference}} = d_{\text{réfléchi}} - d_{\text{direct}} = \sqrt{d_0^2 + (h_1 + h_2)^2} - \sqrt{d_0^2 + (h_2 - h_1)^2} \quad (1.4)$$

$$= d_0 \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{h_1 + h_2}{d_0} \right)^2} - \sqrt{1 + \left( \frac{h_2 - h_1}{d_0} \right)^2} \right] \quad (1.5)$$

$$\approx d_0 \left[ \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h_1 + h_2}{d_0} \right)^2 \right\} - \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{h_2 - h_1}{d_0} \right)^2 \right\} \right] \quad (1.6)$$

$$= \frac{2 h_1 h_2}{d_0} \quad (1.7)$$

Où l'approximation dans l'équation (1.6) tient lorsque  $d_0$  est largement supérieur à  $h_1$  et  $h_2$ .

En supposant une polarisation verticale, la réflexion sur le sol provoque un déphasage de  $\pi$  radians (Rappaport, 2002), la différence de phase entre le trajet direct et le trajet réfléchi est donc donnée par :

$$\Delta\Phi = 2\pi \left[ \left( \frac{2h_1 h_2}{d_0 \lambda} + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (1.8)$$

Pour  $d_0$  largement supérieur à  $h_1$  et  $h_2$ , l'équation (1.8) devient :

$$\Delta\phi = 2\pi \left( \frac{2h_1 h_2}{d_0 \lambda} + \frac{1}{2} \right) \approx \pi \quad (1.9)$$

Pour  $d_0$  largement supérieur à  $h_1$  et  $h_2$ , les trajets directs et réfléchis ont approximativement la même longueur que  $d_0$ . Par conséquent, nous supposons que les deux chemins ont la même amplitude résultante avec une puissance donnée par l'équation (1.1), où  $d$  est à peu près égale à  $d_0$  pour  $d_0$  largement supérieure à  $h_1$  et  $h_2$ . Donc la puissance résultante reçue peut être exprimé par :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2 \Lambda_0} \left( 2 \sin \left( \frac{1}{2} (\pi - \Delta\phi) \right) \right)^2 \quad (1.10)$$

$$\approx \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2 \Lambda_0} \left( \frac{4\pi h_1 h_2}{d_0 \lambda} \right)^2 \quad (1.11)$$

$$= \frac{P_t G_t G_r h_1^2 h_2^2}{d_0^4 \Lambda_0} \quad (1.12)$$

Où l'approximation pour obtenir l'équation (1.11) vient du fait que  $\sin \theta$  à peu près égale à  $\theta$  pour  $\theta$  à peu près égale à 0. Il est important de noter, qu'à partir de l'équation (1.12), la puissance du signal reçu ne dépend plus de  $\lambda$ . Cependant, la principale observation est que l'exposant d'affaiblissement de propagation  $n$  est ici égal à 4 au lieu de 2 dans l'espace libre.

### 1.1.2 Évanouissement à grande échelle

La perturbation du niveau de puissance du signal due à l'existence d'obstacles physiques qui ne change pas de forme ou de taille d'une manière significative sur des courtes périodes de

temps (arbres, bâtiments ainsi que d'autres atténuateurs et réflecteurs dans un environnement de communication sans fil réel) définit l'évanouissement du signal à grande échelle. Cet évanouissement est une perturbation du premier ordre caractérisée statistiquement à partir d'observations empiriques par une distribution log-normale (D.C. Cox, 1984) qui est représentée par une variable aléatoire normale dont la moyenne est l'affaiblissement de propagation. À chaque fois que le signal passe par un de ces atténuateurs sa puissance est multipliée par un facteur d'affaiblissement. En décibels, ce serait équivalent à l'ajout de plusieurs variables aléatoires, ce qui donne une répartition à peu près normale par le théorème de la limite centrale (Papoulis, 1991).

On sait que l'affaiblissement de propagation dépend de la distance entre le transmetteur et le récepteur et des caractéristiques géométriques des différents environnements de propagation. Donc pour un emplacement donné, il est intéressant de parler de niveau local de la puissance moyenne du signal qui peut être reçu autour de cet emplacement. Les mesures de la puissance du signal réel reçu comprennent généralement les effets d'affaiblissement de propagation, d'évanouissement à grande échelle et d'évanouissements à petite échelle (voir la section 1.1.3). L'évanouissement à petite échelle rajoute d'importantes fluctuations autour du niveau local de la puissance moyenne du signal. Pour plusieurs des fonctions des systèmes de communications sans fil, telles que le transfert intercellulaires ou le contrôle de puissance, le niveau local de la puissance moyenne du signal donne une image plus réaliste de la qualité du signal autour d'un emplacement donné.

On appelle également le niveau local de la puissance moyenne du signal, la composante déterministe du niveau de puissance du signal. Ceci est expliqué par le degré élevé de répétitivité et de prévisibilité de la composante déterministe qui est basée sur les caractéristiques géométriques des environnements de propagation. Par le terme répétitivité, on indique le niveau auquel une nouvelle quantité observée est à peu près similaire aux observations précédentes. Et par prévisibilité, on veut dire le niveau auquel la mesure d'une nouvelle quantité observée peut être prédite à partir des mesures dans les observations précédentes. En revanche, les évanouissements à petite échelle sont modélisés comme étant

aléatoires. En raison des faibles distances de corrélation (c'est une mesure de la dépendance statistique entre deux variables aléatoires ou deux vecteurs aléatoires) des évanouissements à petite échelle, le degré de répétitivité et de prévisibilité est faible.

### 1.1.3 Évanouissement à petite échelle

L'évanouissement à petite échelle est un phénomène lié aux fluctuations rapides de l'amplitude ou de la phase d'un signal sur une courte période de temps ou de distance. Dans ce cas, les effets de l'évanouissement à grande échelle peuvent être ignorés. L'interférence entre un minimum de deux versions du signal transmis cause cet évanouissement. Ces signaux arrivent au récepteur avec un léger décalage temporaire. Ils se combinent au récepteur pour donner un signal résultant qui varie beaucoup en amplitude et en phase, en fonction de la vitesse du récepteur.

Dans un premier lieu, nous supposons que le signal transmis est un signal à bande étroite relativement à l'environnement de propagation. En d'autres termes, la réponse en fréquence du canal sans fil est relativement plate ou constante dans la bande de fréquences où le signal a le plus de puissance. Si le signal transmis est un signal à modulation numérique, la notion de « bande étroite » indique que la période d'un symbole est beaucoup plus grande que la plus grande des différences de la longueur des chemins significatifs entre l'émetteur et le récepteur. Un chemin significatif est un chemin dont une importante fraction de la puissance du signal est reçue. On suppose que chaque trajectoire a une phase aléatoire indépendante décalée par rapport à une trajectoire de référence. Le décalage de phase peut être modélisé par une variable aléatoire uniformément distribué entre 0 et  $2\pi$ . Supposons aussi que la trajectoire de référence est dominante (c'est à dire qu'elle transmet une puissance moyenne significativement plus grande que celle véhiculée par toutes autres trajectoires, mais pas nécessairement plus grande que leur somme). Si toutes les autres trajectoires transmettent à peu près la même puissance moyenne, alors il peut être démontré que l'amplitude du signal reçu suit une distribution de Rice (Rice, 1945). Ce résultat a été obtenu par Rice dans son



article sur l'analyse mathématique d'un bruit aléatoire (Rice, 1945). La densité de probabilité d'une variable aléatoire suivant la distribution de Rice est donnée par :

$$f_{Rice}(x) = \frac{x}{p} I_0 \left( \frac{x p_d}{p} \right) e^{-\frac{x^2 + p_d^2}{2p}}, \quad x \geq 0 \quad (1.13)$$

Où  $I_0(x)$  est la fonction de *Bessel* modifiée de première espèce et d'ordre zéro. Le facteur critique,  $K = p_d / 2p$ , est d'une importance fondamentale dans la distribution de Rice. C'est le rapport de la puissance du signal dominant divisé par la variance de la puissance des signaux réfléchis.  $K$  est également connu comme le facteur de Rice (Ho et Stuber, 1993).

Dans la plupart des cas des algorithmes de transfert intercellulaires, si l'utilisateur est relativement loin de la station de base ou s'il n'y a pas de ligne en vue directe,  $p_d$  tend vers zéro et  $K$  tend vers zéro, car il n'y a pas de chemin direct ou chemin dominant. Ceci est le plus important cas d'un évanouissement de Rayleigh, où en l'absence d'un chemin dominant, la résultante des différents chemins constitue un processus Gaussien complexe (justifiée heuristiquement par le théorème de la limite centrale). Dans un tel cas, l'amplitude de l'enveloppe du signal suit une distribution de Rayleigh (Carlson, 1986). L'équation (1.13) se réduit à une densité de probabilité de Rayleigh, donnée par :

$$f_{Rayleigh}(x) = \left( \frac{x}{p} \right) e^{-x^2/2p}, \quad x \geq 0 \quad (1.14)$$

avec :

- $x$  est l'amplitude du signal ;
- $p$  est la moitié de la puissance moyenne de l'enveloppe du signal.

La moyenne de la distribution de Rayleigh est  $\sqrt{\pi p/2}$  et l'évanouissement de Rayleigh peut fréquemment induire une atténuation de 20, 30 ou même 40 dB en dessous de cette moyenne. Ce type de chute de la puissance du signal est connu par l'évanouissement de Rayleigh. Même dans un système de liaison radio avec de grandes marges, il est presque impossible de communiquer d'une manière fiable et en tout temps si l'utilisateur est confronté à un

évanouissement de Rayleigh. Toutefois, il est rare qu'un utilisateur reste assez longtemps dans un évanouissement de Rayleigh pour que ça devienne un grave problème, car les utilisateurs sont généralement en mouvement et ils se déplacent naturellement si la liaison est de qualité inacceptable.

Afin d'estimer les statistiques de deuxième ordre de l'évanouissement à petite échelle, il est couramment supposé que les différents chemins arrivent au récepteur avec des angles répartis d'une manière uniforme. Ensuite, si  $\theta$  est l'angle entre la direction de mouvement de l'utilisateur et la trajectoire du signal, dans le plan parallèle au sol, comme le montre la Figure 1.2, le taux de variation de la longueur du trajet est  $v_0 \cos \theta$  mètres par seconde ou  $(v_0/\lambda) \cos \theta$  cycles par seconde. Cette variation de longueur du chemin provoque un décalage de la fréquence de la porteuse. Le décalage de la fréquence de la porteuse est appelé le décalage Doppler. Chaque réplique du signal est alors associée à un décalage Doppler. Sous les hypothèses d'omnidirectivité des trajets reçus et d'omnidirectivité d'antenne détectant le champ électrique vertical, le spectre de puissance du signal reçu, quand une sinusoïde est transmise, est donnée par (Jakes, 1994) :

$$S(f) = \begin{cases} \frac{C_1}{\sqrt{f_m^2 - (f - f_c)^2}} & \text{pour } |f - f_c| < f_m \\ 0 & \text{pour } |f - f_c| > f_m \end{cases} \quad (1.15)$$

avec :

- $C_1$  est une constante de proportionnalité ;
- $f_c$  est la fréquence porteuse ;
- Et  $f_m = v_0/\lambda$  est l'écart maximum de *Doppler*, où  $v_0$  est la vitesse de l'utilisateur.

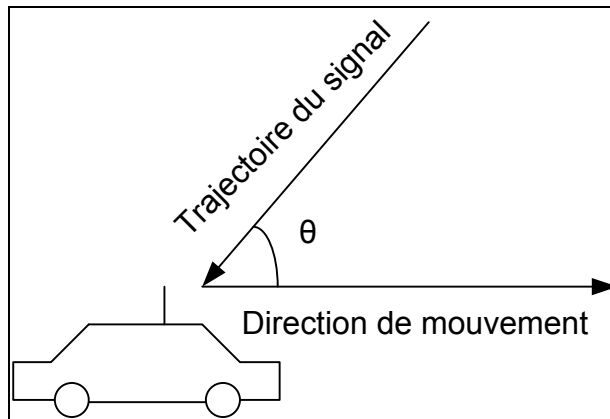


Figure 1.2 L'effet Doppler : trajectoire du signal et direction de mouvement

La transformée de Fourier inverse de l'équation (1.15) donne l'autocorrélation de l'évanouissement à petite échelle. L'autocovariance sera égale à (Jakes, 1994) :

$$C_2 J_0^2(2\pi f_m \tau) = C_2 J_0^2\left[2\pi\left(\frac{v_0}{\lambda}\tau\right)\right] = C_2 J_0^2\left[2\pi\left(\frac{\Xi}{\lambda}\right)\right] \quad (1.16)$$

Avec :

- $J_0(\bullet)$  est la fonction de Bessel d'ordre zéro et de première espèce ;
- $C_2$  est une constante de proportionnalité ;
- $\tau$  est un intervalle de temps ;
- et  $\Xi$  est un intervalle spatial, avec  $v_0 = \Xi/\tau$ .

L'équation (1.16) est représentée à la Figure 1.3, à partir de laquelle on peut voir que les points séparés par plus de  $0.4\lambda$  ont une faible covariance. Par conséquent, une règle utile dans l'industrie du sans fil est que les échantillons consécutifs sont supposés être indépendants s'ils sont espacés de plus d'une demi-longueur d'onde (Jakes, 1974).



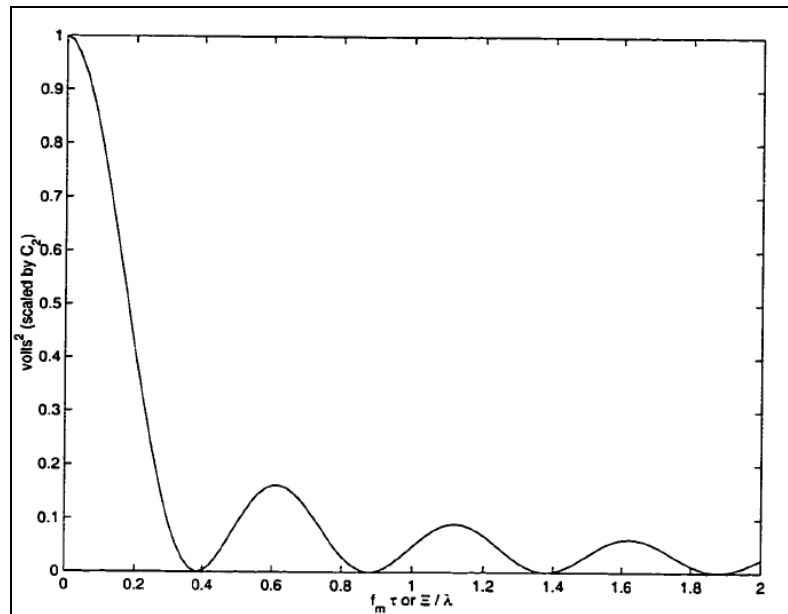


Figure 1.3 L'autocovariance du signal reçu  
Tirée de (Jakes, 1974)

Dans un second lieu, nous relâchons l'hypothèse que le signal soit à bande étroite relativement à l'environnement de propagation. Si le système est numérique, cette relaxation signifie que la période d'un symbole transmis peut maintenant être comparable ou inférieure au retard de propagation (*delay spread*). Le retard du temps d'arrivée des différents chemins est dû aux différences dans les longueurs de parcours. C'est le cas d'évanouissement sélectif en fréquence alors que dans le cas d'un signal à bande étroite il est appelé évanouissement plat, car l'évanouissement affecte toutes les composantes de fréquence du signal à peu près par la même quantité.

Afin de construire un système rigoureux, il est nécessaire d'atténuer les effets dus au retard de propagation. Quelques solutions sont proposées dans la littérature à savoir, l'utilisation de la technique de multi porteuses, l'utilisation de techniques d'étalement de spectre ainsi que l'utilisation de plusieurs égaliseurs classiques. Les égaliseurs filtrent le signal reçu afin d'atténuer les effets du canal (Proakis, 2000).

## 1.2 Propagation dans un environnement microcellulaire

Dans la section précédente nous avons étudié la caractérisation statistique de propagation des ondes radioélectriques pour les systèmes de communications sans fil en général. Dans cette section, nous nous concentrerons sur les systèmes microcellulaires et spécialement l'environnement de propagation microcellulaire. Les systèmes cellulaires ont généralement des cellules avec un rayon de l'ordre de quelques kilomètres. Cependant, le spectre radioélectrique accordé par les instances gouvernementales est limité, il y a donc un nombre limité d'utilisateurs qui peuvent être servis par cellule. Une façon d'augmenter la capacité du système est de diminuer la taille des cellules et d'en augmenter le nombre. Ce genre de système est appelé système microcellulaire. Les réseaux locaux sans fil sont aussi considérés comme des systèmes microcellulaires.

Compte tenu de la demande grandissante des services de téléphonie cellulaire, la tendance est d'aller vers des systèmes microcellulaire pour élargir la capacité du réseau. Dans le cas des réseaux locaux sans fils, une interopérabilité avec les réseaux cellulaires fournit aux utilisateurs un débit plus élevé ce qui rend ce concept intéressant. Donc, l'utilisation de petites cellules induit automatiquement une augmentation du nombre de transferts intercellulaires, ce qui justifie l'importance accordée aux algorithmes de transfert intercellulaire. Ceux-ci devront être plus efficaces afin de gérer les responsabilités grandissantes qui leur sont imposées. Nous allons discuter de cette question plus en détail au chapitre 2.

La caractérisation des environnements de propagation a fait l'objet de plusieurs recherches. Ainsi, les modèles peuvent être théoriques (appelé aussi déterministes), empiriques ou une combinaison des deux (appelé aussi semi-empiriques).

- les modèles déterministes traitent le problème en utilisant les principes fondamentaux de la propagation des ondes radioélectriques (réflexion, diffraction, etc.). Ils servent de modèles de référence. Ils sont plus précis mais leur temps de calcul est relativement élevé

car ils requièrent une quantité importante d'information sur la zone où ils vont être appliqués. Ils sont généralement réservés à des lieux où les autres modèles ne peuvent pas être utilisés. Cette méthode est appelé « ray-tracing » (Sizun et SpringerLink (Service en ligne), 2005) ;

- les modèles empiriques sont basés sur l'analyse d'un grand nombre de mesures expérimentales en fonction de différents paramètres tels que la fréquence, la distance et la hauteur des antennes. Ils sont robustes, rapides et ne nécessitent pas de bases de données géographiques. Ils sont peu précis plus particulièrement à courtes distances (Sizun et SpringerLink (Service en ligne), 2005). Nous présenterons quelques exemples de modèles empiriques ci-dessous ;
  - modèle d'Okumura-Hata : C'est le modèle le plus utilisé (Rappaport, 2002). Il est apparu en 1980 et repose sur les mesures d'Okumura. Il tient compte de la fréquence, de la distance entre l'émetteur et le récepteur et de la hauteur de la station de base et du mobile. Il prend en considération également la nature de l'environnement (milieu urbain dense, milieu urbain rural, etc.). Ce modèle n'est utilisé que dans des systèmes opérant dans la bande de fréquence de 1.5 GHz à 2 GHz ;
  - modèle Log-distance : Ce modèle est basé sur le fait que l'affaiblissement dans un environnement microcellulaire augmente en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur (Rappaport, 2002). En effet la puissance du signal reçu (en dBm) à une distance  $d$  (en mètres) de l'émetteur est décomposée en trois parties. La première partie dépend de l'affaiblissement de propagation (et plus particulièrement de la distance entre l'émetteur et le récepteur). Ce modèle prend en considération tous les obstacles présents dans le trajet que prend le signal pour arriver au récepteur. De ce fait on peut caractériser deux autres phénomènes qui sont l'évanouissement à grande échelle et qui caractérise tout obstacle qui ne change pas en fonction du temps (tel que arbres, immeubles, etc.). Tandis que l'évanouissement à petite échelle est dû au phénomène de multitrajet qui signifie que plusieurs copies du signal sont reçues mais avec des délais ;

- modèle de MOTLEY-KEENAN : Ce modèle prend en considération les pertes individuelles causées par tous les murs et les plancher qui existent dans le chemin direct entre l'émetteur et le récepteur. Ces pertes dépendent de l'épaisseur et de la matière utilisée pour les murs et les planchers. Ainsi, l'affaiblissement se décompose en deux termes : l'affaiblissement de distance (on utilise la fonction d'affaiblissement dans un espace libre) et un affaiblissement de transmission à travers les obstacles rencontrés (une valeur d'affaiblissement est associée à chaque obstacle) (Sizun et SpringerLink (Service en ligne), 2005) ;
- les modèles semi-empiriques combinent une formulation analytique des phénomènes physiques (réflexion, transmission, diffraction, diffusion) et un ajustement statistique à l'aide de mesures expérimentales. Ils sont rapides, précis et robustes (Sizun et SpringerLink (Service en ligne), 2005). Ils nécessitent par contre la prise en compte de l'environnement (bases de données géographiques (topographie, occupation du sol, contours des bâtiments, axe de rue, etc.)) ;

En comparant les trois modèles de propagation on remarque que le modèle déterministe et le modèle semi-empirique, même s'ils sont robustes et précis, requièrent une grande quantité d'information sur la zone où ils vont être appliqués et leur complexité de calcul est grande. D'où le choix dans le présent projet de recherche d'un modèle empirique qui ne nécessite pas une grande connaissance de la zone où il va être appliqué. Même si les modèles empiriques sont moins précis que les autres, ce sont les plus utilisés pour caractériser un environnement de propagation dans le cas des algorithmes de transfert intercellulaire (Rappaport, 2002).

Si on examine les modèles empiriques précédents, on peut dire que l'utilisation du modèle d'Okumura-Hata est limitée à des environnements extérieurs. Par contre la bande de fréquence où il peut être utilisé ne convient pas avec notre cas. Le modèle MOTLEY-KEENAN est utilisé seulement pour les environnements intérieurs ce qui peut limiter l'étude que nous allons faire sur les transferts intercellulaire. Le modèle Log-distance est capable de prédire la propagation dans environnement microcellulaire d'un réseau cellulaire

(environnement extérieurs) et au même temps un réseau local sans fil (environnement intérieurs). Même si ce modèle ne tient pas compte des spécificités des bâtiments tels que les murs et les étages, il est le plus utilisé dans les études précédentes des algorithmes de transfert intercellulaire (par exemple (Khan, Aissa et Despins, 2009)). Ce modèle sera traité plus en détails dans le CHAPITRE 3.

### **1.3 Conclusion**

Dans ce premier chapitre nous avons traité la question de modélisation du canal de propagation. En effet, la modélisation d'un algorithme de transfert intercellulaire efficace nécessite la connaissance du milieu où cet algorithme sera utilisé. Donc pour comprendre les systèmes de communications sans fil, et en particulier les algorithmes de transfert intercellulaire, le présent chapitre traite les aspects pertinents de la propagation des ondes radioélectriques ont été traité. Dans un premier lieu nous avons abordé le point de la caractérisation statistique de la propagation des ondes radioélectriques. Alors que dans un second lieu, le phénomène de propagation des ondes radioélectriques dans le cadre d'un environnement microcellulaire a été élaboré. Nous avons présenté et discuté quelques modèles des canaux de propagation existants.



## CHAPITRE 2

### LE TRANSFERT INTERCELLULAIRE

L'étude de la propagation des ondes radioélectriques a été traitée dans le chapitre précédent. Ce phénomène est important à prédire pour la modélisation des algorithmes de transfert intercellulaire. Dans ce chapitre nous nous concentrerons sur les algorithmes de transfert intercellulaire. L'étude en détails et la présentation de quelques exemples de ces algorithmes sera faite dans ce chapitre.

Ce chapitre est divisé en trois parties. Une introduction générale aux algorithmes de transfert intercellulaire fera l'objet de la première partie. Les types de transfert intercellulaire seront étudiés à la deuxième partie. La troisième partie traitera la démarche de découper le processus de transfert intercellulaire en petits éléments pour faciliter leur compréhension et leur implémentation. Dans la quatrième partie nous présenterons une revue de littérature des algorithmes de décision de transfert intercellulaire existants.

#### 2.1 Introduction au transfert intercellulaire

##### 2.1.1 Définition

Dans un système cellulaire, les stations de base servent comme points d'accès, pour les utilisateurs, au réseau câblé. Nous appelons station de base servante, une station via laquelle des utilisateurs accèdent au réseau. Dans un mode de fonctionnement normal, un utilisateur est raccordé à une seule station de base. Cependant, de façon transitoire, il peut être rattaché à plus qu'une station de base à la fois, lorsqu'il est à la périphérie d'une cellule par exemple, avant de retourner au mode normal. Ce phénomène est connu sous le nom de transfert intercellulaire. Ce qui se passe pendant la période de communication simultanée avec plusieurs stations de base détermine si le transfert intercellulaire est de la variété douce (*soft*) ou dure (*hard*), et le nouveau canal sans fil utilisé après le transfert intercellulaire détermine si le transfert est intercellulaire ou intracellulaire.

Le transfert intercellulaire est un élément clé du concept cellulaire car il est partie intégrante du mécanisme de contrôle des interférences qui est nécessaire pour un système cellulaire à la réutilisation des fréquences. Il permet ainsi au système cellulaire de supporter la mobilité de ses utilisateurs, c'est à dire qu'ils ne sont pas limités à la région de couverture de la station de base au service de l'utilisateur.

Le transfert intercellulaire est une fonction du système qui touche la couche de liaison radio et la couche réseau d'un système cellulaire. Il cache la limite de couverture des stations de base à la couche réseau. En effet, la couche réseau voit un utilisateur semi-fixe qui présente des caractéristiques particulières. De plus, l'utilisateur a parfois besoin de petites reconfigurations du réseau à cause du trajet de communication. Ceci est dû au fait que l'utilisateur bascule entre les points d'accès au réseau au cours des transferts intercellulaires.

De même, le transfert intercellulaire cache les détails de ce qui se passe dans la couche réseau à la couche radio. Par exemple, les algorithmes de la couche radio n'ont pas à considérer les circuits de communication au niveau réseau. Afin de mieux comprendre les enjeux de la conception des systèmes en respectant les transferts intercellulaires, il est d'usage de diviser le processus de transfert intercellulaire en petites parties, chacune avec ses contraintes, ses choix et ses méthodes. Avant de traiter les algorithmes de transfert intercellulaire, nous devons d'abord examiner les causes du transfert. Nous serons alors en meilleure position pour évaluer leurs performances.

### **2.1.2 Caractéristiques**

Le transfert intercellulaire doit être rapide pour que l'utilisateur ne sente pas une dégradation ou une interruption de service. La dégradation de service peut être causée par la réduction continue de la puissance du signal.

Le transfert intercellulaire doit être fiable c'est-à-dire que la communication doit maintenir une bonne qualité après le transfert intercellulaire. En utilisant le rapport de signal à

interférence, SIR (*Signal to Interference Ratio*) et le niveau du signal reçu, RSS (*Received Signal Strength*) on peut déterminer la qualité de service dans la station de base candidate. L'effet du transfert intercellulaire sur la qualité de service doit être minime. La qualité du service peut être mauvaise avant le transfert intercellulaire à cause de la diminution continue de l'RSS, SIR, etc.

Le transfert intercellulaire doit être réussi c'est-à-dire qu'un canal doit être libre dans la station de base candidate. Certains algorithmes d'allocation de canal efficace peuvent maximiser la probabilité des transferts intercellulaires réussis (Senarath et Everitt, 1995; Tekinay et Jabbari, 1991).

Le nombre de transfert intercellulaire doit être minimisé. Un nombre excessif de transferts intercellulaires conduit à de lourdes charges de traitements au niveau du réseau.

### **2.1.3 L'importance du transfert intercellulaire**

Dans un réseau cellulaire, les microcellules et les macrocellules coexistent. Donc différents rayons de cellules sont présents, ce qui impose différents paramètres pour les algorithmes de transfert intercellulaire pour obtenir de bonnes performances. De nos jours, il y a une tendance vers l'utilisation de cellules plus petites, dénotées microcellule à la Section 1.2. Ces petites cellules sont appelées microcellules, picocellules ou même femtocellules. Les picocellules sont utilisés dans les bâtiments. Ils pourraient être de l'ordre de la taille d'une grande salle. L'utilisation des microcellules et des picocellules est l'un des moyens les plus efficaces d'accroître la capacité du système. Des transferts intercellulaires efficaces sont plus importants dans des systèmes avec des petites cellules que dans des systèmes avec de grandes cellules, car pour un modèle de trafic donné, de petites cellules signifient un mouvement plus fréquent entre les celles-ci et par conséquent, un besoin plus fréquents de transferts intercellulaires.

Chaque fois qu'un transfert intercellulaire est tenté, il y a une probabilité que l'appel soit perdu. Cette probabilité est généralement petite dans les systèmes bien conçus. Toutefois, afin de conserver une faible probabilité d'appels coupés, l'exactitude et l'efficacité des algorithmes de transfert intercellulaire doivent être améliorées pour compenser l'augmentation du nombre de transferts. C'est une des raisons pour lesquelles les algorithmes efficaces de transfert intercellulaire deviennent plus importants dans les systèmes évolués. Le fait que chaque fois qu'un transfert intercellulaire se produit, des effets parfois un peu notables affectent la qualité de service, constitue une autre raison pour avoir des algorithmes de transfert intercellulaire efficaces. Ces effets peuvent être sentis par l'utilisateur comme une brève perte de la transmission de la voix. Ces inconvénients sont à la limite du tolérable dans les systèmes ayant des cellules de grandes tailles, mais de plus en plus intolérable quand les transferts intercellulaires se produisent fréquemment. Ces inconvénients sont compensés en augmentant l'efficacité dans le processus de transfert intercellulaire. Par exemple, si on réduit le délai du transfert intercellulaire, les chances de souffrir d'une mauvaise liaison radio seront réduites. Une troisième raison de l'importance du transfert intercellulaire réside dans le fait que chaque transfert intercellulaire nécessite des ressources réseau. Il devient plus important de ne pas effectuer des transferts intercellulaires inutiles parce que cela ajoute inutilement la charge de signalisation sur le réseau. Par conséquent, si nous voulons garder la charge sur le réseau dans des limites tolérables, il faut que la charge de chaque transfert soit réduite pour compenser leur plus grande fréquence.

## **2.2 Types de transfert intercellulaire**

On peut classer les transferts intercellulaires par leur raison de se produire. Mais on peut aussi les classer selon leurs caractéristiques fonctionnelles.

Les transferts intercellulaires peuvent être classés comme durs ou doux en fonction de ce qui se passe au cours de la période cruciale pendant l'exécution du transfert intercellulaire. Avec les transferts intercellulaires, il y aura normalement une communication simultanée de contrôle du canal entre les deux stations de base et l'utilisateur selon le protocole de

signalisation utilisé. Nous devons alors examiner le trafic dans les canaux pour distinguer les transferts intercellulaires durs et doux. Pour les transferts intercellulaires durs, une décision définitive est prise. Sur une décision positive, le transfert est initié et exécuté sans que l'utilisateur tente de faire la communication simultanée avec les deux stations de base. Pour les transferts intercellulaires doux, une décision conditionnelle est faite sur l'opportunité d'être transféré. Selon l'évolution de la puissance du signal d'au moins deux stations de base en cause, une décision de type dure sera éventuellement prise pour communiquer avec une des deux stations de base. Cela se produit normalement après qu'il soit clair que le signal de cette station de base est nettement plus fort que celles des autres. Dans la période intermédiaire, l'utilisateur a une communication simultanée avec les deux stations de base candidates.

Une deuxième catégorie de transfert intercellulaire est basée sur le lieu où la décision est prise. Dans les systèmes où le transfert intercellulaires est contrôlé par le réseau (également connu sous le nom de station de base contrôlée), NCHO (*Network Controlled Handoff*), le contrôle de la décision de transfert est dans le réseau des stations de base. Les utilisateurs (les terminaux) sont passifs et ne jouent pas un rôle dans les décisions de transfert. Dans les systèmes où le transfert intercellulaire est assisté par le terminal de l'utilisateur, MAHO (*Mobile Assisted Handoff*), le contrôle de la décision transfert est encore dans le réseau de stations de base, mais les terminaux des utilisateurs jouent un rôle dans les décisions. Les terminaux des utilisateurs aident les stations de base en effectuant des mesures et en relayant ces mesures à l'entité de prise de décision. Dans les systèmes où le transfert intercellulaire est contrôlé par les terminaux, MCHO (*Mobile Controlled Handoff*), le contrôle de la décision du transfert est situé au niveau du terminal de l'utilisateur. Si l'algorithme de transfert intercellulaire exige des mesures effectuées par les stations de base, ces mesures doivent être transmises à l'utilisateur périodiquement. La question de quelle structure de contrôle de décision des transferts intercellulaires à utiliser n'est pas négligeable. Chaque variation a ses avantages et ses inconvénients, souvent en fonction de l'environnement et autres paramètres du système. D'après les observations de (Gudmundson et Grimlund, 1992) , le temps de transfert intercellulaire (décision de transfert intercellulaire, exécution) varie entre quelques

millisecondes et quelques secondes. Un autre inconvénient des structures MAHO est la possibilité que la commande de transfert intercellulaire envoyée de la station de base à l'utilisateur peut être perdue (Lin et Chlamtac, 2001).

Une troisième classification consiste à voir si le transfert est horizontal ou vertical. En effet un transfert horizontal se fait entre des technologies d'accès homogènes. Cela veut dire que le transfert intercellulaire se fait entre stations de base utilisant la même technologie (par exemple d'un réseau 3G vers un réseau 3G). Par contre un transfert intercellulaire vertical se fait entre des technologies d'accès hétérogènes. Cela veut dire que le transfert intercellulaire se fait entre une station de base ou un point d'accès utilisant des technologies différentes, par exemple entre un réseau 3G et un réseau WLAN. Dans notre recherche nous allons nous concentrer sur cette dernière catégorie qui fait partie de l'un des plus gros avantages de la quatrième génération.

Au cours des transferts intercellulaires verticaux, seules les stations mobiles ont connaissance de quel type d'interfaces elles sont équipées. Même si le réseau avec lequel la station mobile est rattachée a ces informations, il serait très difficile de contrôler l'autre réseau vers lequel on veut transiter. Par conséquent, la stratégie MCHO est la plus appropriée pour les nouvelles générations et appareils.

### **2.3 Le processus du transfert intercellulaire**

Le processus de transfert intercellulaire peut être divisé en quatre parties : la mesure, la transformation, la décision et l'exécution. Nous décrivons ces quatre éléments, un par un, dans leur ordre naturel.

Les mesures utiles pour les décisions du transfert intercellulaires peuvent être faites à la station de base servante, à d'autres stations de base ou sur la station mobile de l'utilisateur elle-même. Plusieurs quantités peuvent être mesurées telles que la puissance du signal reçu,

le taux d'erreur binaire, le rapport signal sur bruit ou la distance par rapport à la station de base etc.

Les mesures peuvent être traitées pour produire des éléments plus utiles aux algorithmes de transfert intercellulaires. Ceci sert à avoir une décision plus précise donc, au final, un transfert intercellulaire accompli au bon moment.

Pour la décision, deux questions se posent. Quand transférer? Et vers où transférer? Les deux questions sont reliées, car si on n'a pas vers où transférer le lien au moment où le transfert doit avoir lieu, l'utilisateur perdra la communication. Les algorithmes de décision seront discutés plus en détails dans la section 2.4.

La signalisation, l'authentification et la reconfiguration du réseau se produisent pendant la phase d'exécution d'un transfert intercellulaire. La durée de l'exécution du transfert intercellulaire constitue une question cruciale pour tout le processus de transfert intercellulaire. Si différentes situations de transfert intercellulaire prennent différentes périodes de temps d'exécution, alors le processus de décision doit les prendre en considération.

## **2.4 Les algorithmes de décision pour le transfert intercellulaire**

À partir de la littérature, on peut classer les algorithmes de décision pour le transfert intercellulaire en trois catégories. En effet, les algorithmes peuvent être classés en fonction des critères du transfert intercellulaire. La première catégorie est basée sur une comparaison du seuil d'une ou de plusieurs métriques telles que la puissance du signal reçu, le rapport du signal sur bruit et interférence, etc. La deuxième catégorie est basée sur l'intelligence artificielle. Elle consiste à combiner plusieurs métriques telles que les paramètres du réseau et la mobilité des utilisateurs. La troisième catégorie se base sur une fonction coût qui elle-même combine plusieurs métriques telles que le cout d'accès au réseau, la puissance consommée et la bande passante.

### 2.4.1 Algorithmes basés sur une comparaison de seuil

Ces algorithmes sont appelés aussi algorithmes traditionnels et ils ont été largement étudiés. Plusieurs approches ont été considérées dans les réseaux cellulaires en utilisant la puissance du signal reçu comme indicateur pour la disponibilité du service. En outre, plusieurs stratégies d'initiation des transferts intercellulaires ont été définies en se basant sur la comparaison de la puissance du signal reçu de la station de base servante et des stations de base candidates (Pollini, 1996).

- puissance du signal reçu : le transfert intercellulaire a lieu si la puissance du signal reçu d'une des stations de base candidates est plus élevée que celle de la station de base servante ;
- puissance du signal reçu plus un seuil : le transfert intercellulaire a lieu si la puissance du signal reçu d'une des stations de base candidates est plus élevée que celle de la station de base servante et la puissance du signal reçu de la station de base servante est inférieure à un seuil déjà prédéfini ;
- puissance du signal reçu plus hystérésis : le transfert intercellulaire a lieu si la puissance du signal reçu d'une des stations de base candidates est plus élevée que celle de la station de base servante plus une hystérésis prédéfini ;
- une minuterie de passage : la minuterie de passage peut être ajoutée à tous les algorithmes déjà cités. Dans ce cas, une minuterie est initiée quand l'une des conditions des algorithmes précédents est satisfaite, et le transfert intercellulaire a lieu si la condition est satisfaite tout au long de la période définie par la minuterie ;

Dans (Hatami et al., 1999) les auteurs utilisent une minuterie de passage comme critère d'initiation du transfert intercellulaire pour maximiser l'utilisation du réseau local sans fil. Ils combinent leurs simulations avec des analyses pour montrer que l'association de la station mobile au réseau WLAN pour la plus longue période possible augmente le débit chez l'utilisateur. Cela est vrai même durant la période de transition où la puissance du signal reçu



oscille autour du niveau de sensibilité du récepteur. Par contre, ils n'ont pas défini un mécanisme clair pour choisir la valeur de la minuterie de passage.

Dans (Ylianttila et al., 2001) les auteurs présentent un algorithme d'optimisation pour la minuterie de passage en fonction des débits disponibles dans les deux réseaux. Ils ont déduit que la valeur optimale de la minuterie de passage est fortement dépendante de la différence entre les débits disponibles dans les deux réseaux. Mais dans (Ylianttila, Makela et Mahonen, 2002) ils étendent le même cadre d'analyse que (Hatami et al., 1999) pour simuler un environnement avec plusieurs utilisateurs. Leurs résultats montrent que l'effet du délai du transfert intercellulaire est toujours dominant même en choisissant la valeur optimale de la minuterie de passage à partir de la méthode présentée dans (Ylianttila et al., 2001).

Dans (Hyo Soon et al., 2003), les auteurs proposent une approche basée sur la minuterie de passage similaire aux algorithmes précédents. Cette approche consiste à initier le transfert intercellulaire si le nombre de balises reçues (les balises contiennent toutes les informations sur le réseau. Ils sont transmis périodiquement pour annoncer la présence du réseau WLAN dépassent ou descendent au dessous d'un seuil déjà prédéfini dépendamment du scénario de déconnexion du réseau préféré ou la connexion au réseau préféré. Les auteurs proposent aussi d'adapter les performances de leur algorithme en se basant sur les exigences des applications. Ils proposent l'utilisation de deux nombres de balises différents selon si le service est en temps réel ou non.

Dans (Zahran, Liang et Saleh, 2006), les auteurs étudient les performances d'un algorithme de transfert intercellulaire vertical. Ils étudient l'effet de l'adaptation du seuil de la puissance du signal, pour transférer la communication, en fonction de l'application utilisée et du scénario de connexion ou de déconnexion du réseau préféré. Ils présentent ensuite une analyse pour évaluer la convergence des performances du système.

Dans (Liu et al., 2008), les auteurs proposent un algorithme qui utilise la vitesse du mobile, la distance entre le mobile et les stations de base et la puissance du signal reçu pour générer la

décision. Ils ont étendu l'algorithme d'hystérésis et de minuterie de passage traditionnelle pour les algorithmes de transfert intercellulaire.

Dans (Ayyappan, Narasimman et Dananjayan, 2009), les auteurs présentent un algorithme de transfert intercellulaire vertical basé sur la valeur de SINR (*Signal to Interference and Noise Ratio*) pour évaluer les performances du système en termes de débit et de probabilité de coupure d'appels.

Dans (Kemeng, Bin et Dooley, 2007) les auteurs présentent un algorithme de transfert intercellulaire basé sur la valeur de SINR. La décision du transfert est prise dépendamment des débits atteignables dans le réseau cellulaire et le réseau WLAN. Par contre, l'asymétrie des deux réseaux n'a pas été prise en compte dans ce travail.

Dans (Khan, Aissa et Despins, 2009), les auteurs utilisent un algorithme de décision pour le transfert intercellulaire vertical basé sur le filtre à moyenne pondérée exponentielle (EWMA) cascadié avec une comparaison classique du seuil de RSS pour éviter l'effet ping-pong. Néanmoins, même si cette technique permet d'éviter l'effet ping-pong (plusieurs transferts intercellulaires dans une courte période), nous ne pouvons pas nécessairement prouver que la connexion est toujours maintenue.

#### **2.4.2 Algorithmes basés sur l'intelligence artificielle**

Dans cette catégorie, la décision est prise en se basant sur des algorithmes qui utilisent l'intelligence artificielle. Ce dernier signifie qu'on utilise plusieurs paramètres comme l'état du réseau et la mobilité de la station mobile pour gérer la décision du transfert intercellulaire. Plusieurs techniques ont été utilisées à ce sujet comme la reconnaissance des formes, la logique floue et les réseaux de neurones.

Dans (Maturino-Lozoya, Munoz-Rodriguez et Tawfik, 1994), les auteurs formulent le problème de transfert intercellulaire comme un problème de reconnaissance des formes. La

reconnaissance des formes identifie les régularités significatives dans les environnements bruités ou complexes. Les régularités significatives de la puissance du signal sont mesurées dans les échantillons consécutifs de la puissance du signal reçu à partir d'une ou plusieurs stations de base quand l'utilisateur se déplace le long des rues dans un réseau cellulaire. La structure de ces modèles de la puissance du signal, et en particulier leur répétitivité, motive l'utilisation des modes de puissance du signal pour fournir des informations sur l'emplacement des utilisateurs. Ces informations sont utilisées comme entrée pour le processus de prise de décision des transferts intercellulaires.

Dans (Kinoshita et Itoh, 1993), un algorithme de transfert intercellulaire basé sur la logique floue a été proposé. En général, on peut représenter une information par des nombres ou par une description linguistique. Par exemple, la température peut être représentée par un nombre comme 0 degré Celsius ou par la description linguistique « froid ». Le terme « froid » est flou et il peut par exemple représenter des températures entre -10 et 10 degré Celsius qui est appelé la région floue. Dans le cas des algorithmes de transfert intercellulaire, la trajectoire de déplacement de l'utilisateur peut être considérée comme une logique floue sur laquelle on peut baser notre décision. L'algorithme de transfert intercellulaire de (Kinoshita et Itoh, 1993), basé sur la logique floue, a démontré qu'il possède une meilleure stabilité (c'est-à-dire des transferts intercellulaires moins fréquents). Une valeur d'hystérésis utilisée dans un algorithme de transfert intercellulaire classiques peut être insuffisante pour des évanouissements profonds, alors que la logique floue a la capacité de modéliser la zone de chevauchement entre les cellules adjacentes, ce qui est la motivation derrière cet algorithme.

Dans (Liu, Ling-ge et Chen, 2008), les auteurs proposent un algorithme de décision pour le transfert intercellulaire vertical basée sur la logique floue. Ils ont aussi démontré qu'à l'aide de la prédiction de la puissance du signal, la précision et la vitesse de transfert seront améliorés.

Dans (Qing), l'auteur définit un algorithme de décision pour les transferts intercellulaires dans des réseaux hétérogènes basée sur la logique floue. Il prévoit une procédure généralisée

pour réduire le nombre des transferts intercellulaires redondants, pour prendre des décisions plus précises et pour améliorer les performances du réseau.

La plupart des techniques de réseaux de neurones proposées fournissent des résultats de simulations préliminaires ou offrent des méthodes sans des résultats de simulation. Dans ces techniques des modèles de simulation simplifiée ont été utilisés. Les capacités d'apprentissage de plusieurs exemples de réseaux de neurones n'ont pas été utilisées efficacement en conjonction avec des algorithmes transfert intercellulaire. La référence (Liodakis et Stavroulakis, 1994) présente un algorithme de transfert intercellulaire initié par la puissance du signal reçu en utilisant un test d'hypothèse binaire mis en œuvre dans un réseau de neurones. Cependant, les résultats de simulation ne sont pas présentés.

Malheureusement, la plupart des algorithmes basés sur l'intelligence artificielle sont complexes et peuvent être difficiles à mettre en œuvre dans les systèmes pratiques. Nous n'allons donc pas mettre plus l'accent sur cette approche.

### **2.4.3 Algorithmes basés sur une fonction coût**

La troisième catégorie des algorithmes de décision de transfert intercellulaire combine plusieurs mesures telles que le coût d'accès, la consommation d'énergie et la bande passante dans une fonction de coût pour estimer les disponibilités d'accès aux réseaux. Celle-ci est ensuite utilisée dans la station mobile pour initier la décision du transfert intercellulaire.

Wang et ses coéquipiers introduisent les règles de déclenchement du transfert intercellulaire dans (Wang, Katz et Giese, 1999), qui a été suivie de plusieurs articles sur des approches similaires. Les auteurs ont proposé des règles en tenant compte de différents paramètres tels que la consommation d'énergie, la bande passante disponible dans les réseaux et d'autres paramètres qui diffèrent entre les réseaux hétérogènes. Pour chaque règle, une fonction coût est définie comme la somme des poids pour les paramètres qui diffèrent entre les réseaux hétérogènes. Ces poids varient en fonction des préférences de l'utilisateur et de l'état de la

station mobile (par exemple, niveau de puissance trop bas). Dans ce cas, la station mobile compare périodiquement le coût des différents réseaux et ensuite transite vers le réseau avec le coût minimum.

Dans (Fang et McNair, 2004), les auteurs présentent des fonctions de coût qui tiennent compte de la variation des paramètres utilisés dans la prise de décision du transfert intercellulaire vertical. Ces fonctions intègrent des facteurs d'élimination de réseau pour réduire potentiellement les délais et la puissance de traitement dans le calcul du transfert intercellulaire. Ils introduisent deux règles fondées sur le coût pour la prise de décision dans les algorithmes de transfert intercellulaire. Ces règles examinent la bande passante disponible et la puissance du signal reçu des réseaux disponibles. La somme des règles de transfert intercellulaire estime un coût pour tous les services.

Dans (Kemeng, Gondal et Bin, 2008), les auteurs proposent un algorithme de décision pour le transfert intercellulaire vertical basée sur la valeur de SINR ainsi que d'autres paramètres. Ils calculent la fonction coût pour chaque réseau de destination, puis le réseau avec la fonction coût maximale est choisi comme réseau de destination.

Dans (Stevens-Navarro, Yuxia et Wong, 2008), les auteurs utilisent une fonction coût qui représente le total des trois fonctions coût basées sur le processus de décision de Markov. L'objectif est de minimiser le coût total prévu d'une connexion.

#### **2.4.4 Choix de l'algorithme**

Les recherches actuelles se sont concentrées sur le développement et l'optimisation des algorithmes de décision de transfert intercellulaire. Dans ce travail, nous allons mettre l'accent sur le raffinement des paramètres de prise de décision tel que la puissance du signal reçu. L'utilisation de tels paramètres nous permettra d'adopter un algorithme traditionnel pour la prise de décision qui est moins demandant en termes de temps de calcul.

## **CHAPITRE 3**

### **ALGORITHME DE TRANSFERT INTERCELLULAIRE BASÉ SUR LE FILTRAGE DE KALMAN**

Dans le chapitre précédent nous avons étudié les algorithmes de transfert intercellulaire dans les systèmes de communications sans fil en général. Dans ce chapitre, nous réduirons nos études aux algorithmes de transfert intercellulaires basés sur le filtrage du signal. Ce chapitre constitue donc l'essentiel du projet qui consiste à développer un algorithme de transfert intercellulaire basé sur le filtrage de Kalman. Nous comparerons les résultats obtenus avec un autre algorithme de transfert intercellulaire basé sur le filtrage EWMA du signal.

Dans ce travail, nous avons considéré le cas d'un point d'accès WLAN qui se chevauche avec une station de base d'un réseau cellulaire. Pour des fins de simulation, nous avons supposé que le réseau cellulaire a une couverture omniprésente et que l'existence du réseau WLAN est indiquée par la présence des balises qui sont périodiquement transmises par le point d'accès WLAN (AP). Le but principal des algorithmes de transfert intercellulaire vertical est de rester connecté avec le réseau local sans fil aussi longtemps que possible et de faire le transfert vers le réseau cellulaire comme dernière alternative. Comme l'indique la Figure 3.1, dans nos simulations, nous avons opté pour le scénario où un utilisateur est en train de sortir de la zone de couverture du point d'accès du réseau WLAN.

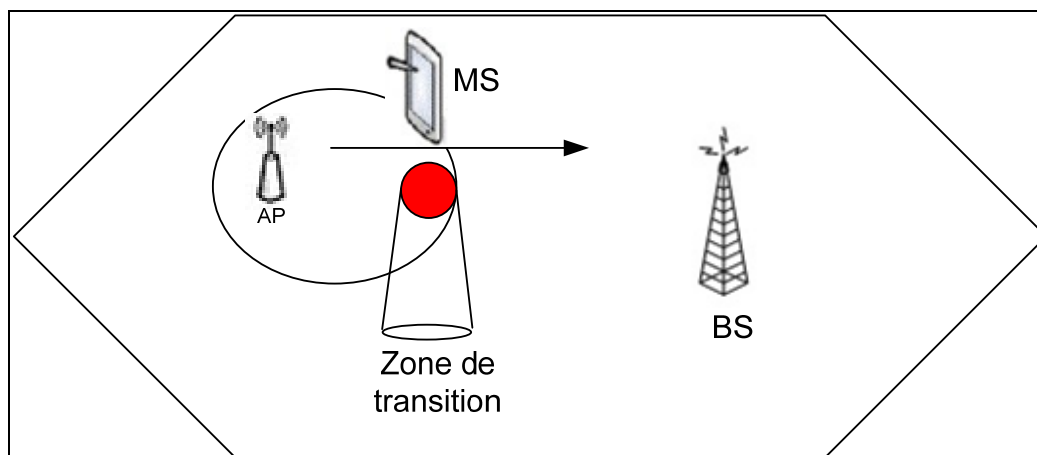


Figure 3.1 Le transfert intercellulaire vertical d'un réseau WLAN vers un réseau cellulaire

Dans ce cas, l'algorithme de décision du transfert intercellulaire est décomposé en deux blocs tels qu'illustré à la Figure 3.2. Le premier bloc traite le signal reçu pour présenter des mesures utiles au second bloc. Ce premier bloc est appelé bloc de traitement du signal ou bloc de filtrage du signal. En effet, nous avons utilisé deux types de filtrage : le filtre de Kalman et le filtre EWMA cascadié. Le contrôleur de décision du transfert constitue le deuxième bloc. Pour ce bloc, nous avons aussi utilisé deux méthodes. La première méthode consiste à comparer la puissance du signal à un seuil prédéfini, si la puissance du signal est inférieure à ce seuil, la station mobile commute du réseau WLAN au réseau cellulaire. La deuxième méthode consiste à comparer la puissance du signal avec un seuil déjà prédéfini, mais avec l'utilisation d'une minuterie de passage. Cela signifie que la puissance du signal doit demeurer en dessous de ce seuil pour toute la durée de la minuterie afin que le transfert intercellulaire se produise.

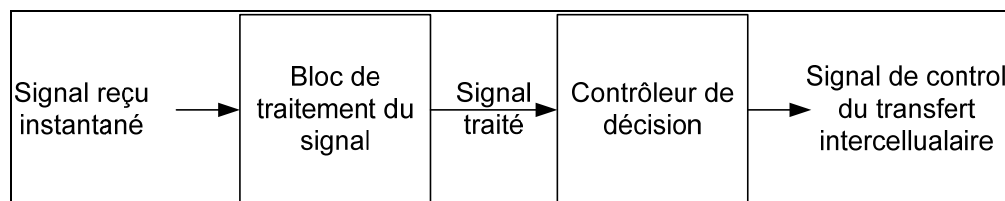


Figure 3.2 Diagramme bloc de l'algorithme de transfert intercellulaire vertical



Ce chapitre est divisé en trois sections. Dans la première partie nous nous intéresserons au modèle de simulation de l'environnement de propagation utilisé dans ce travail. La deuxième partie présente le bloc de traitement du signal reçu et les résultats des simulations effectués. Tandis que dans la troisième partie nous nous concentrerons sur le bloc décision de l'algorithme de transfert intercellulaire ainsi que les résultats obtenus.

### 3.1 L'environnement de propagation

Dans cette étude, nous avons retenu le modèle de propagation empirique log-distance. En effet, tel qu'expliqué à la section 1.2, nous utiliserons ce modèle car il est adapté à des environnements microcellulaire intérieur et extérieur. De plus il constitue la référence dans la majorité des articles traitant du transfert intercellulaire. Ce modèle divise le signal en trois composantes : l'affaiblissement de propagation, l'évanouissement à grande échelle et l'évanouissement à petite échelle. La forme générale de la puissance du signal reçu au niveau du terminal mobile est donnée par l'équation (3.1) (Rappaport, 2002):

$$RSS(d) = P_t - P_0 - 10n \log(d) + S(d) + R(d) \quad (3.1)$$

Avec :

- $P_t$  est la puissance du signal transmis en dB ;
- $P_0 = 20 \log(2 \pi d_0 / \lambda)$  est l'affaiblissement à une distance  $d_0$  égale à 1 mètre ;
- $n$  est l'affaiblissement de propagation dans un environnement microcellulaire (les valeurs de  $n$  sont énumérées au Tableau 1.1 du Chapitre 1) ;
- $S(d)$  est l'évanouissement à grande échelle ou évanouissement log normale ;
- $R(d)$  est l'évanouissement à petite échelle ou évanouissement de *Rayleigh*.

Pour l'évanouissement à grande échelle nous avons utilisé une variable aléatoire corrélée suivant la distribution log-normal présentée dans l'article de (Gudmundson, 1991). Les composantes de l'évanouissement à grande échelle sont des valeurs discrètes que nous désirons qu'elles satisfassent les critères suivants : une distribution normale pour les



statistiques de premier ordre et une approximation exponentielle de la corrélation pour les statistiques du second ordre (Mehbodniya et Chitizadeh, 2005).

$$S(d) = N(0, \sigma) + \exp\left(-\frac{vT}{d_0}\right) S(d-1) \quad (3.2)$$

avec :

- $v$  est la vitesse de l'utilisateur en mètre par seconde ;
- $T$  est la période d'échantillonnage en seconde ;
- $d_0$  est la distance de corrélation ;
- $N(0, \sigma)$  est une distribution normale de moyenne nulle et d'écart type  $\sigma$  donné par :

$$\sigma = \sqrt{1 - \exp(-2vT/d_0)} \sigma_s \quad (3.3)$$

Une distribution anti-log *Rayleigh* a été utilisée pour simuler l'évanouissement à petite échelle. Cela signifie que si  $Y$  est une distribution de *Rayleigh* donc  $R = 20 \log(Y)$  est une distribution anti-log *Rayleigh*. La densité de probabilité d'une fonction suivant la distribution anti-log *Rayleigh* est donné par (Wong et Cox, 1997) :

$$f_R(r) = (\ln 10) \frac{10^{r/10}}{20p} \exp\left(-\frac{10^{r/10}}{2p}\right) \quad (3.4)$$

Avec  $p$  est le paramètre de puissance donné par  $2p = E[Y^2]$ ,

On peut démontrer que  $R$  suit une distribution anti-log *Rayleigh* donné par :

$$R(d) = R_m + \frac{10\gamma}{\ln(10)} + 10 \log(-\ln U) \quad (3.5)$$

avec :

- $R_m$  est la moyenne de la distribution ALR,  $R_m = 10[\log(2p) - \gamma/(\ln 10)]$   
où  $\gamma = 0.577216$  est la constante de Euler Gamma ;
- $U$  est une variable aléatoire uniformément distribuée entre 0 et 1.

Quand la distribution de l'enveloppe des évanouissements rapides suit la fonction de densité de puissance de *Rayleigh*, les échantillons de la puissance suivent une distribution anti-log *Rayleigh* de moyenne  $R_m$ .

Les Figure 3.3 et Figure 3.4 illustrent la puissance du signal reçu par le terminal mobile en fonction de sa distance au point d'accès. On peut ainsi apprécier la puissance du signal dans un cas idéal c'est à dire en l'absence des effets d'évanouissement à grande et à petite échelle. La Figure 3.3 a été établie pour une vitesse du mobile de 5 km/h et la Figure 3.4 pour 50 km/h.

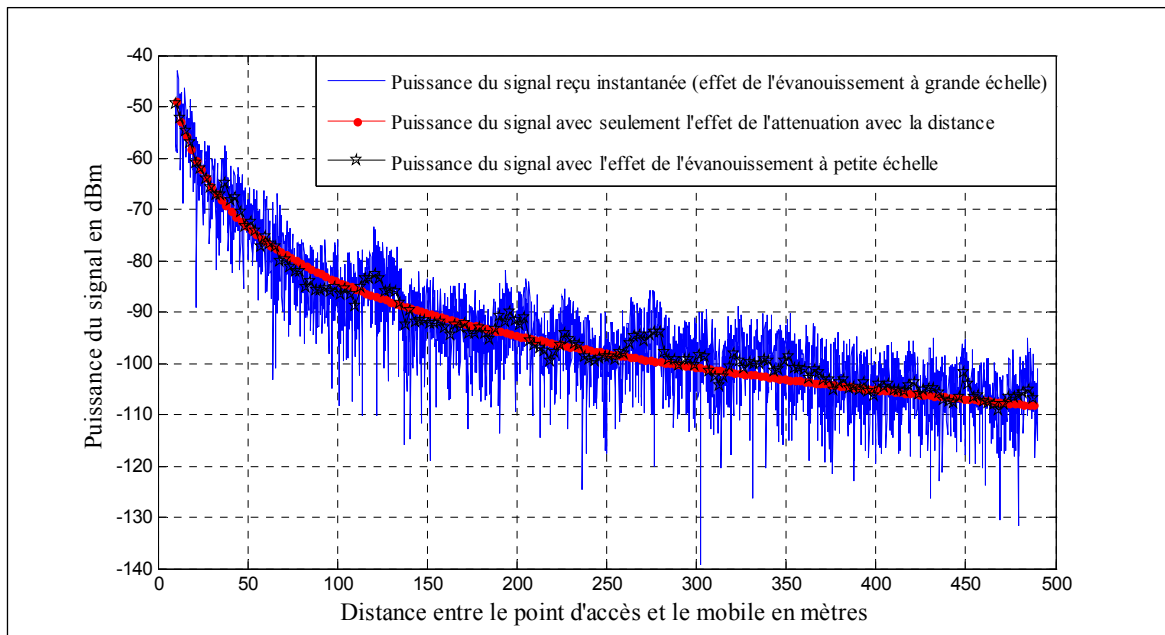


Figure 3.3 Variation de la puissance du signal reçu en fonction de la distance parcourue pour une vitesse du mobile de 5 km/h

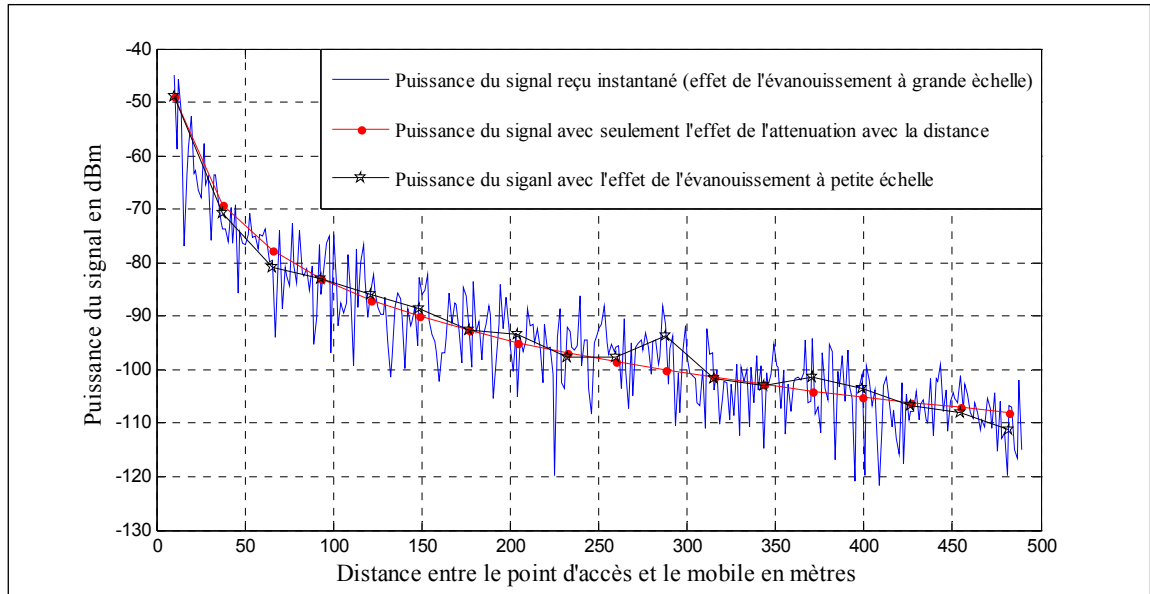


Figure 3.4 Variation de la puissance du signal reçu en fonction de la distance parcourue pour une vitesse du mobile de 50 km/h

## 3.2 Filtrage ou estimation du signal

### 3.2.1 Filtre EWMA

Le filtre à moyenne mobile exponentielle fréquemment dénommé filtre à moyenne mobile pondérée exponentielle, est un filtre qui applique des facteurs de pondération afin de stabiliser la fonction de sortie quand la fonction en entrée varie de façon aléatoire. La forme générale d'un filtre à moyenne mobile pondérée exponentielle peut être exprimé par (Khan, Aissa et Despins, 2009) :

$$S^+ = \alpha S + (1 - \alpha) D(S) \quad (3.6)$$

avec :

- $\alpha$  est le facteur de pondération ou facteur de multiplication ;
- $D$  est un opérateur de délai unitaire (retard d'un échantillon) ;
- $S$  est un échantillon de puissance instantanée à l'entrée ;
- $S^+$  est la sortie du filtre.

Le diagramme bloc de base d'un filtre à moyenne mobile pondérée exponentielle est présenté à la Figure 3.5.

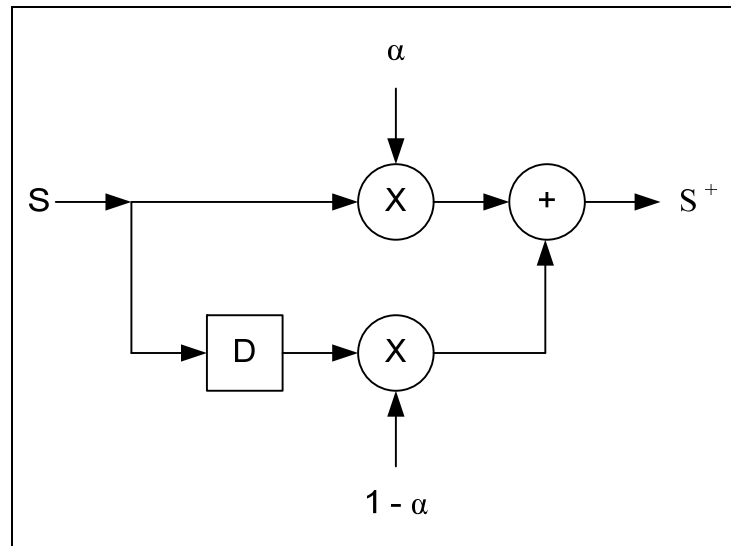


Figure 3.5 Diagramme bloc d'un filtre à moyenne mobile pondérée exponentielle

Dans un filtre à moyenne mobile pondérée exponentielle, lorsqu'on donne plus de poids aux observations précédentes, le filtre assure une bonne stabilité en éliminant le bruit ou les fluctuations de chaque observation. Mais quand on donne plus de poids aux observations récentes, le filtre permet une bonne flexibilité et le rend capable de suivre les changements rapides dans les variables d'entrée du système.

Dans notre cas l'estimation de la puissance du signal sera exploitée pour prendre la décision du transfert intercellulaire. Donc la réponse du filtre doit être stable quand la puissance du signal reçu varie autour du seuil de transfert intercellulaire (dans les limites de la cellule pour que le bloc de décision fasse un transfert intercellulaire optimal). Le problème principal des algorithmes de transfert intercellulaire existants concerne la fluctuation importante de la puissance du signal reçu instantané dans la zone de transition. La zone de transition est définie comme le temps et l'emplacement où la puissance du signal reçu instantané descend au dessous du seuil de sensibilité du récepteur. Dans un scénario où la station mobile quitte le réseau préféré à plusieurs reprises, la zone de transition correspond au moment où la

puissance du signal reçu instantané descend au dessous du seuil pour la première fois jusqu'au moment où la puissance du signal reçu instantané dépasse ce seuil pour la dernière fois.

Dans le cadre de nos simulations nous avons utilisé deux filtres à moyenne mobile pondérée exponentielle cascades. Ceci afin d'augmenter la stabilité au niveau de la sortie des filtres. Donc on utilise un facteur de pondération faible pour donner plus d'importance aux observations précédentes. Le diagramme du bloc de traitement dans ce cas est présenté à la Figure 3.6.

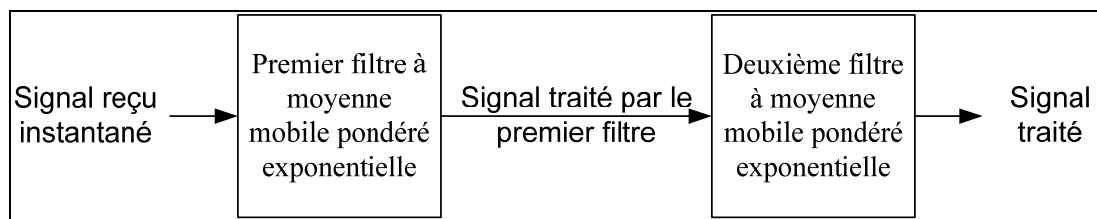


Figure 3.6 Diagramme bloc du bloc de traitement en utilisant deux filtres à moyenne mobile pondéré cascades

Aux Figure 3.7 et Figure 3.8, nous trouverons les résultats du signal filtré par un filtre EWMA cascadié avec deux facteurs de pondération différents (0,05 et 0,3) ainsi que pour des vitesses respectives de 5 km/h et 50 km/h pour le terminal mobile. On remarque que dans la Figure 3.8 le signal filtré par un filtre EWMA cascadié avec un faible facteur de pondération ne suit pas l'allure de la courbe du signal. Donc la réponse sera à 100% erroné.

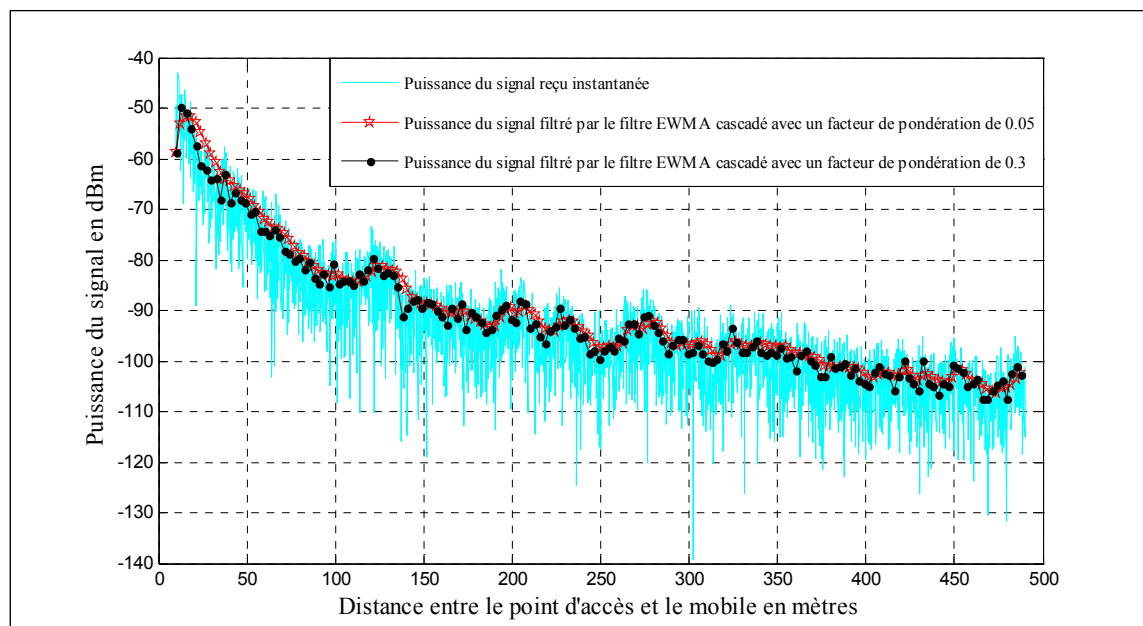


Figure 3.7 Puissance du signal reçu après traitement par un filtre EWMA cascadié pour une vitesse du mobile de 5 km/h

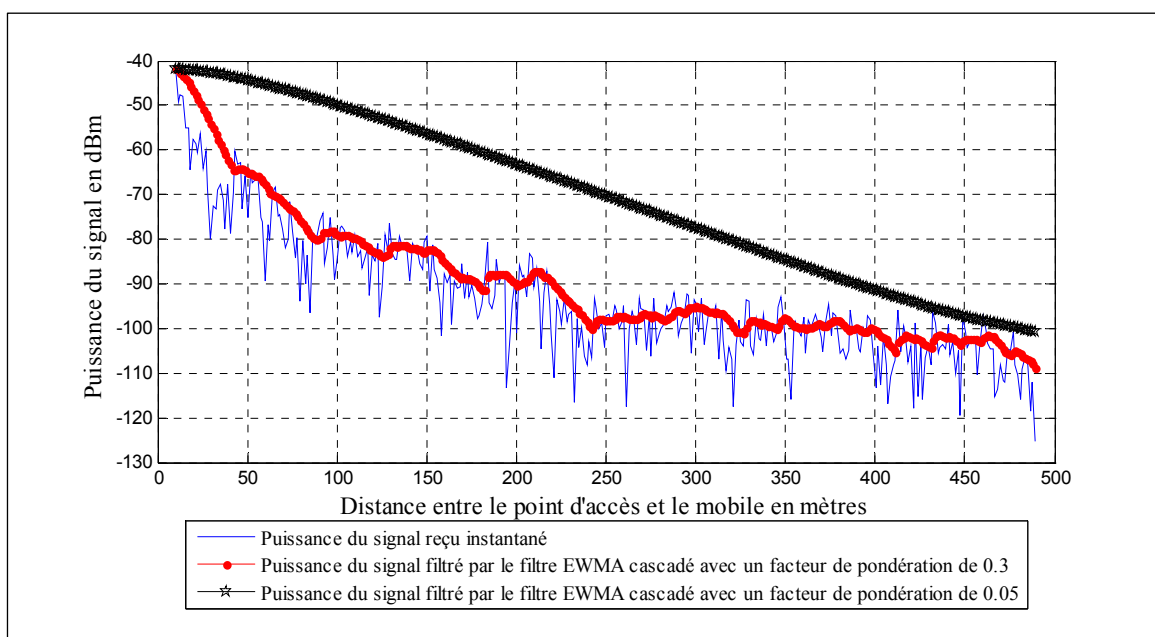


Figure 3.8 Puissance du signal reçu après traitement par un filtre EWMA cascadié pour une vitesse du mobile de 50 km/h

### 3.2.2 Filtre de Kalman

Un filtre de Kalman est un filtre récursif qui estime les états d'un système dynamique linéaire à partir de mesures bruitées. Cela signifie que pour estimer l'état actuel, nous avons besoin des mesures courantes et de l'état estimé du pas précédent. Le filtre de Kalman est constitué de deux modules distincts: une partie de prédiction et une partie de mise à jour. Le module de prédiction utilise l'état estimé du pas précédent pour produire une estimation de l'état courant. Cet état prédit est aussi appelé l'état *a priori*. Pour la mise à jour, la prédiction courante *a priori* est combiné avec les informations courantes mesurés pour affiner l'état estimé, cette estimation est également appelé état *a posteriori*. Le filtre de Kalman peut être considéré comme un estimateur séquentiel de l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) d'un signal dégradé par un bruit blanc gaussien. Dans notre cas, la distribution est non-Gaussienne. Nous invoquons ici la blancheur de la composante de propagation par multi trajets. Ceci motive l'utilisation du filtre de Kalman scalaire même si cette blancheur est violée avec un certain degré (Kay, 1993).

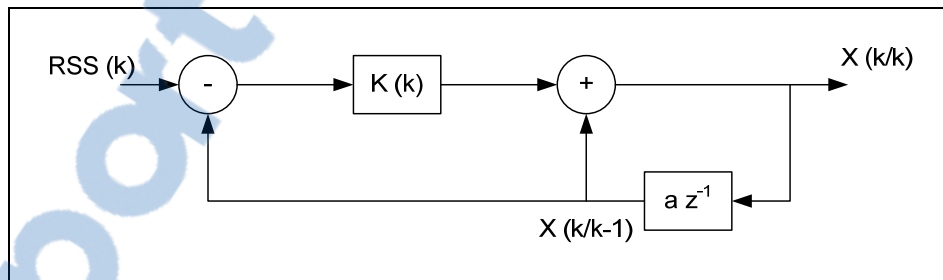


Figure 3.9 Diagramme bloc d'un filtre de Kalman scalaire (Kay, 1993)

Les équations qui régissent le calcul de la phase de prédiction s'écrivent comme suit (Kay, 1993):

$$\hat{X}(k/k-1) = \sigma \hat{X}(k-1/k-1) \quad (3.7)$$

$$P(k/k-1) = \sigma^2 P(k-1/k-1) + \sigma_s \quad (3.8)$$

Les équations qui régissent le calcul de la phase de mise à jour sont (Kay, 1993):

$$K(k) = P(k/k-1) / \left( P(k/k-1) + \sigma_{R_d} \right) \quad (3.9)$$

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}(k/k-1) + K(k) [IRSS(k) - \hat{X}(k/k-1)] \quad (3.10)$$

$$P(k/k) = (1 - K(k)) P(k/k-1) \quad (3.11)$$

où:

- $\hat{X}(k/k-1)$  la valeur estimée de  $X(k)$  basée sur les valeurs de RSS ;
- $P(k/k-1)$  la prédiction minimale ;
- $P(k/k)$  est l'estimateur de l'erreur quadratique moyenne minimale ;
- $K(k)$  le gain de Kalman ;
- $\sigma_{R_d}$  la variance du processus d'évanouissement à petite échelle ;
- $\sigma$  la variance du bruit gaussien de moyenne nulle du modèle AR(1) du processus d'évanouissement à grande échelle ;
- et  $\sigma_s$  la déviation standard du processus d'évanouissement à grande échelle.

Dans les Figure 3.10 et Figure 3.11, les résultats du signal filtré par un filtre de Kalman pour des vitesses respectives de 5 km/h et 50 km/h pour le terminal mobile sont présentés. Il faut remarquer que même si la vitesse du terminal mobile change, la réponse du filtre suit toujours la courbe du signal d'origine.



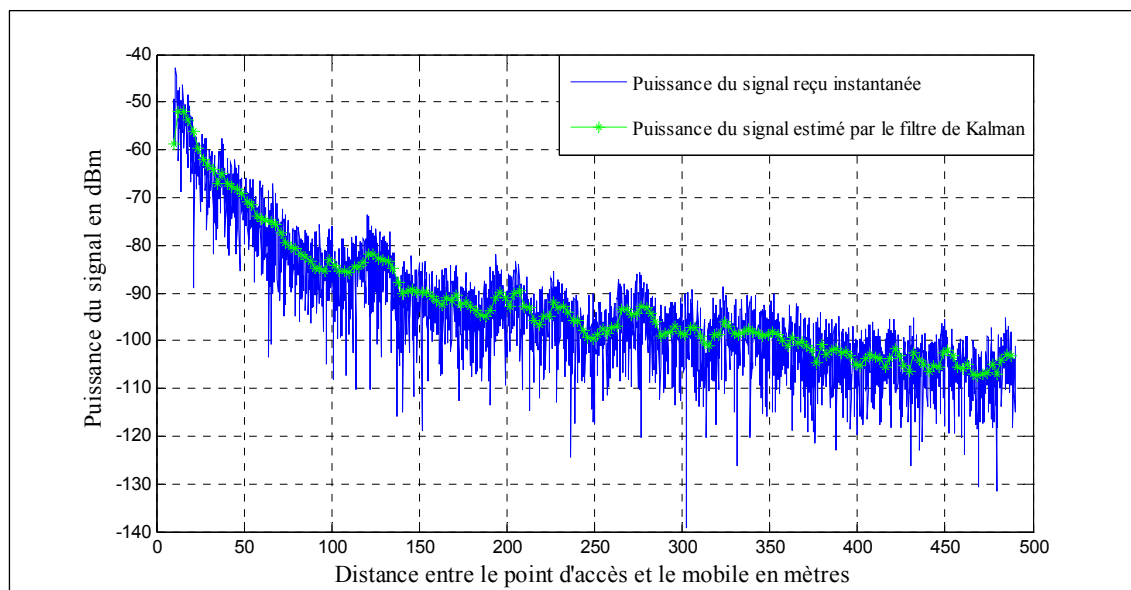


Figure 3.10 Puissance du signal reçu estimé par un filtre de Kalman pour une vitesse du mobile de 5 km/h

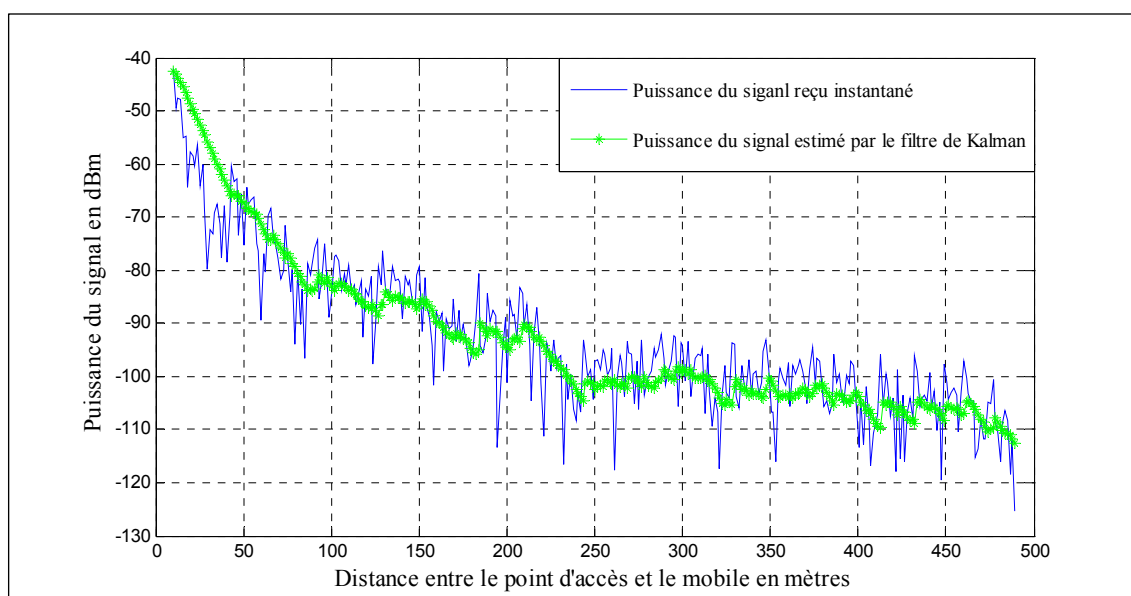


Figure 3.11 Puissance du signal reçu estimé par un filtre de Kalman pour une vitesse du mobile de 50 km/h

### 3.3 Algorithme de décision

Dans le deuxième bloc la décision de basculer d'un réseau à un autre est prise à partir des données récoltées dans le premier bloc. Pour cela, les résultats de deux algorithmes de



décision sont comparés. Le premier se résume en une simple comparaison de la puissance du signal déjà traité avec un seuil déjà prédéfini. Alors que le deuxième consiste à comparer la puissance du signal traité avec un seuil déjà prédéfini en plus d'une minuterie de passage. Ces deux algorithmes seront présentés plus en détails ci-dessous.

### 3.3.1 Algorithme basé sur une comparaison de seuil du signal estimé

En supposant que la station mobile est connectée au point d'accès, la puissance du signal à la sortie du bloc de traitement est continuellement comparée à un seuil déjà prédéfini. Lorsque la condition est vraie c'est-à-dire la puissance du signal reçu traité est inférieure au seuil prédéfini, la station mobile commute du réseau local sans fil au réseau cellulaire. Le schéma bloc de cet algorithme est présenté à la Figure 3.12.

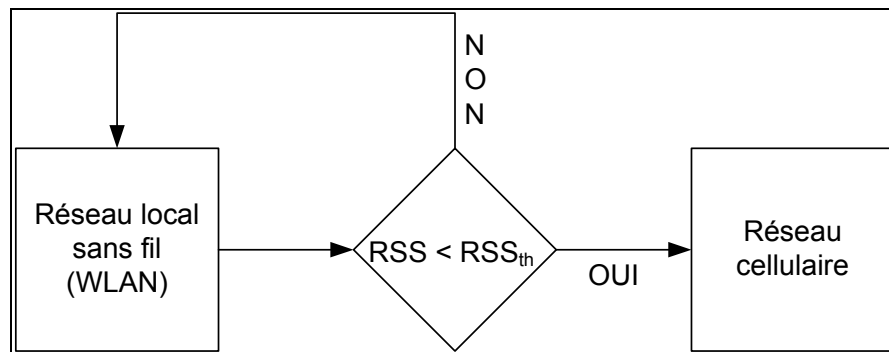


Figure 3.12 Schéma bloc de l'algorithme de décision basé sur une comparaison de seuil du signal estimé

Dans la Figure 3.13 on remarque qu'avec un filtre de Kalman et un filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération faible un seul transfert intercellulaire est effectué et il se produit avant la limite de couverture du point d'accès au réseau local sans fil. Alors que pour le filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération relativement grand plusieurs transferts intercellulaires sont effectués. En effet, à la limite de couverture du point d'accès le signal fluctue rapidement. Cela veut dire que quand la puissance du signal descend au dessous du seuil la station mobile procède à un transfert intercellulaire vers le réseau cellulaire, et quand la puissance du signal revient au dessus du seuil dans ce cas la station

mobile procède à un transfert intercellulaire vers le réseau WLAN. Ceci est appelé effet ping-pong. En plus, il y a des transferts intercellulaires qui ont lieu après la limite de couverture du point d'accès au réseau WLAN. Ceci veut dire que les liens peuvent être perdus et la communication peut être interrompue avant que le transfert intercellulaire a lieu.

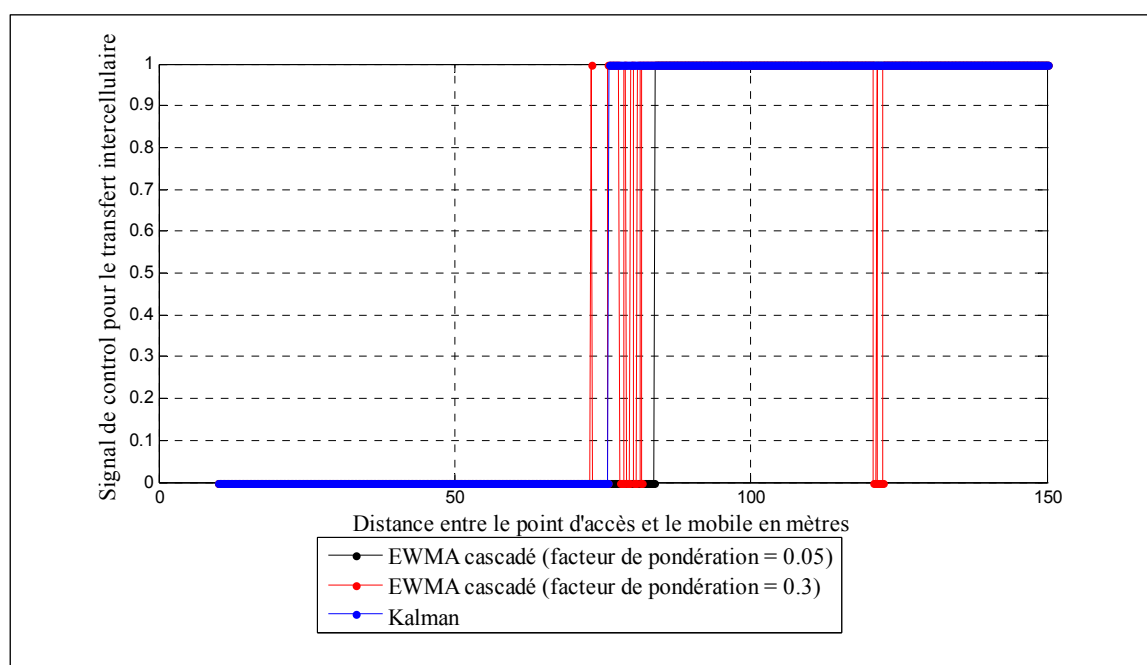


Figure 3.13 Signal de contrôle pour le transfert intercellulaire basé sur une comparaison de seuil du signal estimé pour une vitesse du mobile de 5 km/h

À la Figure 3.14 nous avons augmenté la vitesse de la station mobile, on constate que pour le filtre de Kalman le résultat est le même par contre pour le filtre EWMA le résultat est le contraire de celui obtenu dans la Figure 3.13. Pour le filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération faible et même si un seul transfert intercellulaire est fait, il se produit trop loin du rayon de couverture maximum du point d'accès au réseau local sans fil. Donc la communication est perdue avant que le transfert intercellulaire se déclenche. Alors que pour le filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération relativement grand quelques transferts intercellulaires se produisent mais cette fois-ci tous dans la zone de couverture du point d'accès au réseau local.

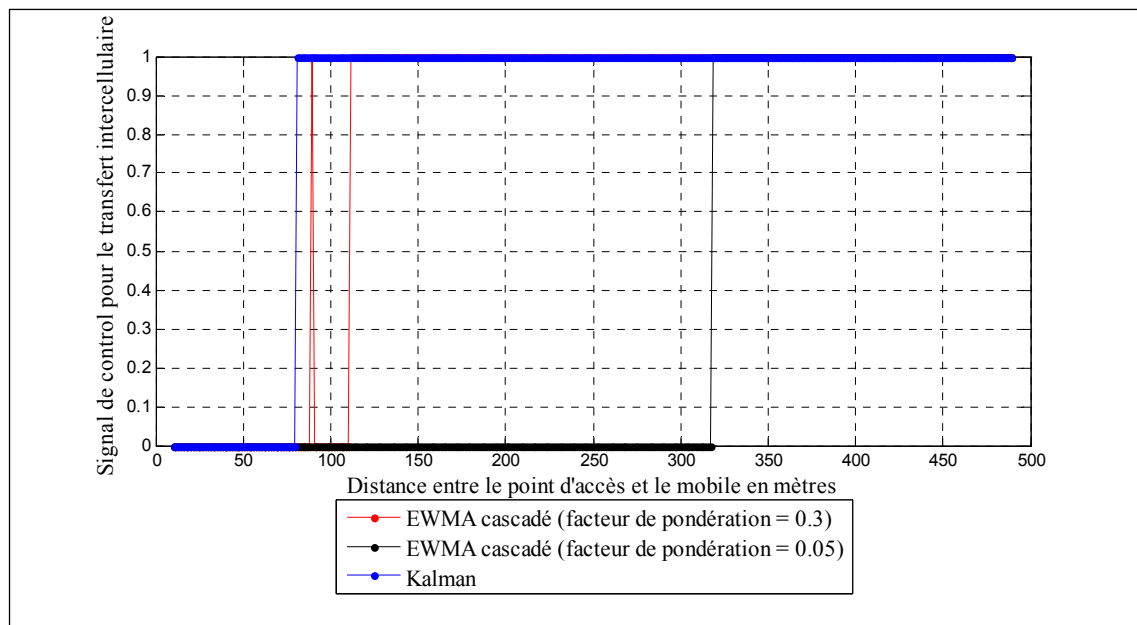


Figure 3.14 Signal de contrôle pour le transfert intercellulaire basé sur une comparaison de seuil du signal estimé pour une vitesse du mobile de 50 km/h

D'après les Figure 3.13 et Figure 3.14, on peut conclure que pour le filtre de Kalman, le facteur de la vitesse n'influence pas le moment de prise de décision, alors que pour le filtre EWMA cascadié, si la bonne fenêtre n'est pas choisie alors le résultat sera erroné.

### 3.3.2 Algorithme basé sur une comparaison de seuil du signal avec une minuterie de passage

Pour cet algorithme, la station mobile est aussi supposé connectée au point d'accès et la puissance du signal à la sortie du bloc de traitement est continuellement comparée au seuil prédéfini. Par contre, lorsque la puissance du signal reçu traité est inférieure au seuil prédéfini, une minuterie de passage est déclenché. Si la puissance du signal traité reste au dessous de ce seuil pendant toute la durée de la minuterie, la station mobile commute du réseau local sans fil au réseau cellulaire, sinon le transfert sera annulé. Le schéma bloc de cet algorithme est présenté à la Figure 3.15.

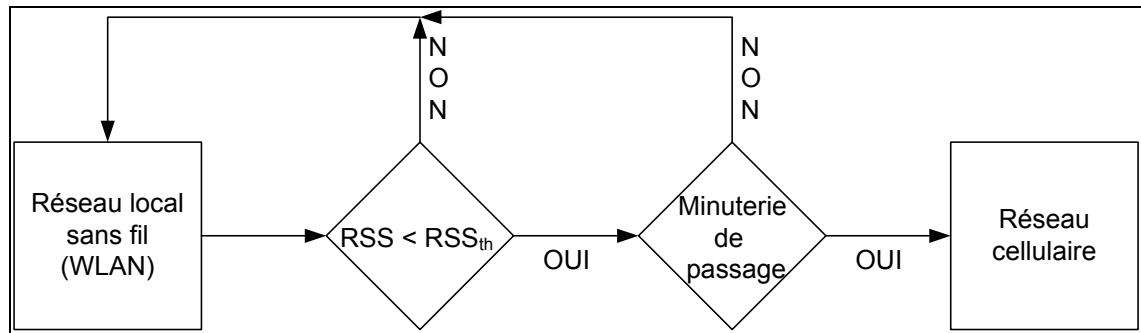


Figure 3.15 Schéma bloc de l'algorithme de décision basé sur une comparaison de seuil avec une minuterie de passage

À la Figure 3.16, on retrouve les mêmes résultats qu'à la Figure 3.13 mais pour ce second algorithme, c'est à dire qu'avec un filtre de Kalman et un filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération faible un seul transfert intercellulaire est effectué et il se produit avant la limite de couverture du point d'accès au réseau local sans fil. Alors que pour le filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération relativement grand plusieurs transferts intercellulaires sont effectués et cela même après la limite de couverture du point d'accès au réseau local sans fil. Cependant, la Figure 3.16 montre une légère différence par rapport à la Figure 3.13 qui se manifeste par un nombre inférieure de transfert intercellulaire.

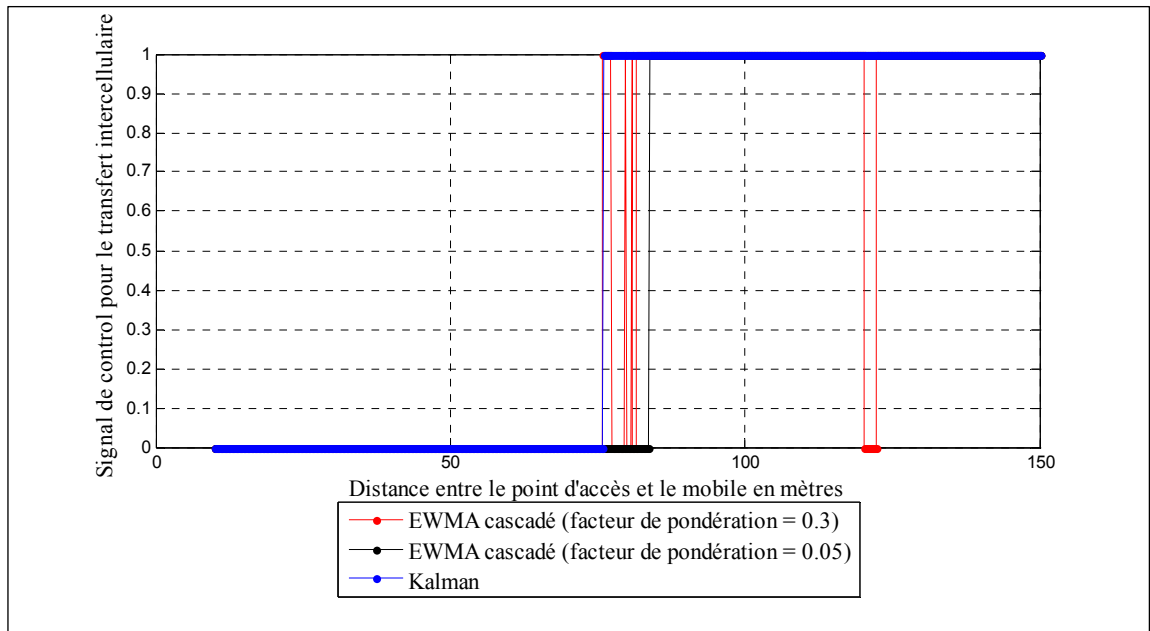


Figure 3.16 Signal de contrôle pour le transfert intercellulaire basé sur une comparaison de seuil du signal estimé avec une minuterie de passage pour une vitesse du mobile de 5 km/h

Comme dans la Figure 3.14, nous avons augmenté la vitesse de la station mobile, on constate qu'on retrouve presque les mêmes résultats dans la Figure 3.17 c'est-à-dire que pour le filtre de Kalman le résultat est le même. Pour le filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération faible et même si un seul transfert intercellulaire est fait, il se produit trop loin du rayon de couverture maximum du point d'accès au réseau local sans fil. Alors que pour le filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération relativement grand quelques transferts intercellulaires se produisent mais cette fois-ci tous dans la zone de couverture du point d'accès au réseau local. La seule différence est aussi dans le nombre transfert intercellulaire qui s'est réduit et ainsi, on évite des transferts intercellulaires inutiles.

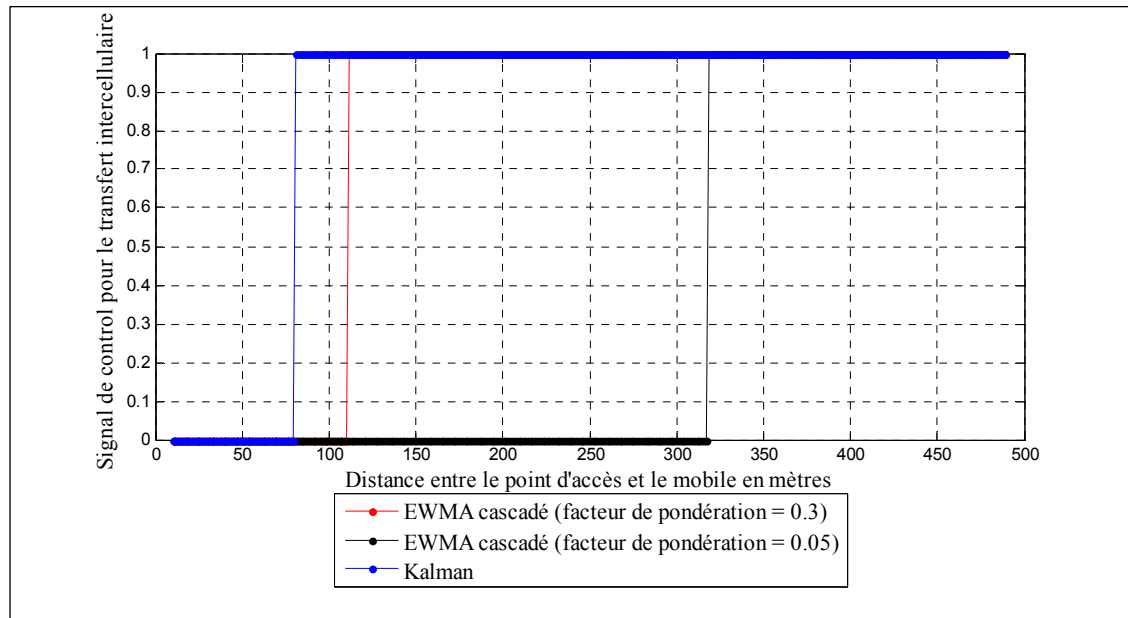


Figure 3.17 Signal de contrôle pour le transfert intercellulaire basé sur une comparaison de seuil du signal estimé avec une minuterie de passage pour une vitesse du mobile de 50 km/h

À partir de la Figure 3.18 on peut remarquer qu'en utilisant un filtre EWMA cascadié avec un faible facteur de pondération, le nombre de transfert intercellulaire est presque toujours égale à 1 quelque soit la vitesse. Par contre si on prend en considération le résultat obtenu dans la Figure 3.14 la décision du transfert intercellulaire est complètement erroné. Dans un second lieu on remarque qu'en utilisant un filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération élevé, le nombre de transfert intercellulaire est élevé pour de faible vitesse mais en augmentant la vitesse du mobile le nombre de transfert intercellulaire se rapproche de 1. On remarque aussi qu'en utilisant une minuterie de passage on réduit de peu le nombre de transferts intercellulaires pour les faibles vitesses. En comparant le résultat du filtre de Kalman par rapport au filtre EWMA du seul point de vue du nombre de transferts intercellulaires, on remarque un nombre un peu plus grand que ceux obtenus avec le filtre EWMA. La minuterie de passage diminue considérablement le nombre de transfert intercellulaire. Donc à partir de la Figure 3.18 on peut voir que l'utilisation du filtre EWMA cascadié est préférable lorsque les paramètres, tel que vitesse du mobile et facteur de pondération, sont adéquatement choisis.

Pour la Figure 3.19, la probabilité de faux transfert intercellulaire fut simulée. Par le terme faux transfert intercellulaire, on veut dire que la décision de basculer vers le réseau cellulaire se prend à plus ou moins 2 dB (cette valeur vient du fait que 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) ont recommandé que idéalement le délai du processus de transfert intercellulaire ne doit pas dépasser les 100 ms (Al-Helali et al., 2009) de la décision idéale. La définition de décision idéale est donnée par la suppression des effets aléatoires de faible échelle du canal auquel on applique les mêmes algorithmes de décision).



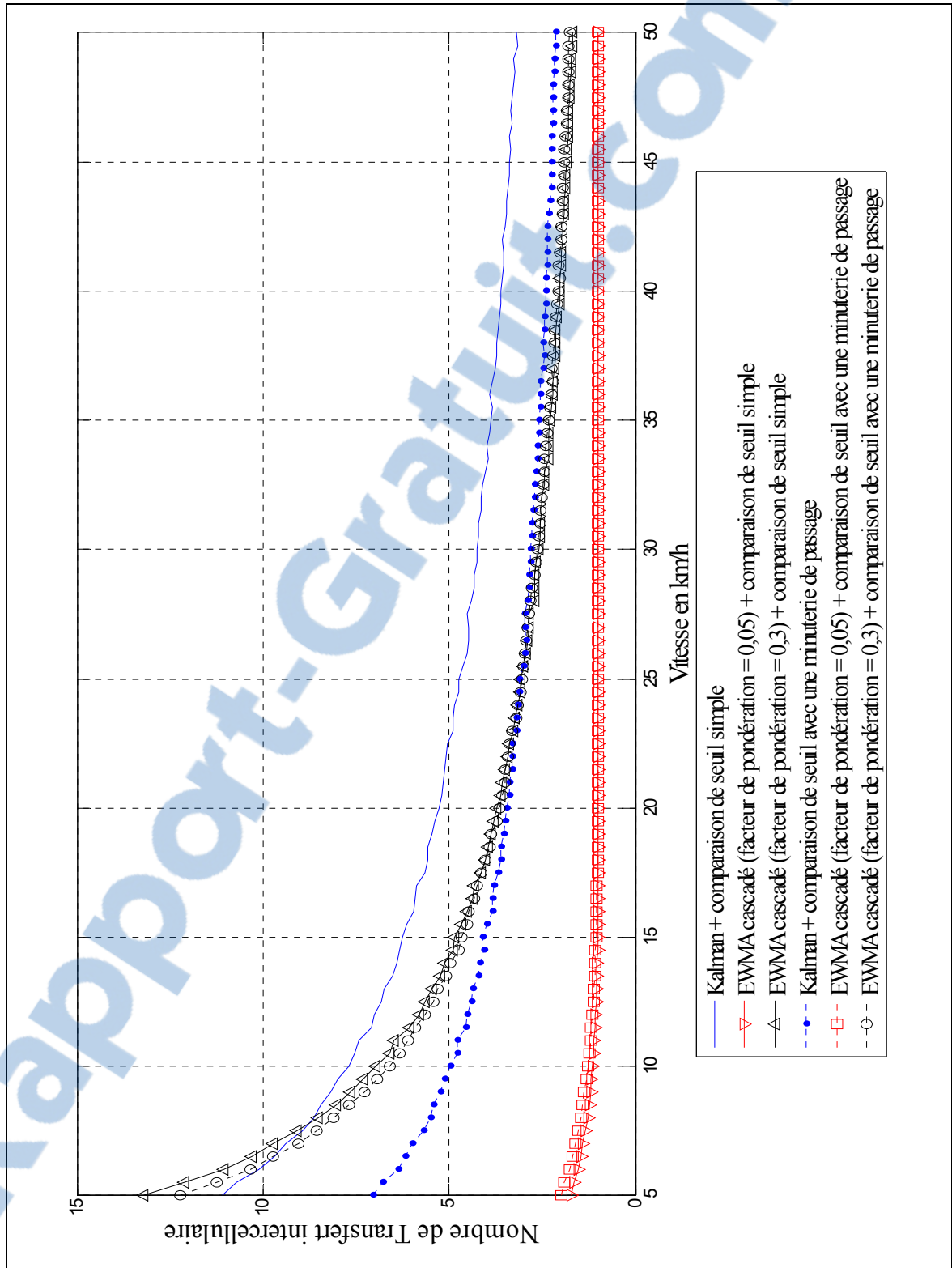


Figure 3.18 Nombre de transferts intercellulaires en fonction de la vitesse de la station mobile

À partir de la Figure 3.19 on remarque que la probabilité de faux transfert intercellulaire pour le filtre EWMA cascadié avec un facteur de pondération faible est la plus élevée de tous. Ce qui veut dire que même si dans la Figure 3.18 le nombre de transfert intercellulaire est égale à 1, presque 95% de ces décisions sont prises au mauvais moment. Tandis ce que pour le filtre de Kalman le nombre de transfert intercellulaire est un peu plus grand que celui du filtre EWMA cascadié mais la probabilité des faux transferts intercellulaires est entre 45% et 25% selon la vitesse de la station mobile. On remarque aussi que l'utilisation d'un algorithme avec une minuterie de passage augmente la probabilité de faux transferts intercellulaires.

Nous pouvons conclure que l'utilisation du filtre de Kalman sans une minuterie de passage est préférée au filtre EWMA car nous n'avons pas à changer la taille de la fenêtre du filtre à chaque fois que la station mobile change de vitesse. De plus, la faible probabilité de faux transferts intercellulaires du filtre de Kalman le rend tout indiqué pour la problématique énoncée.

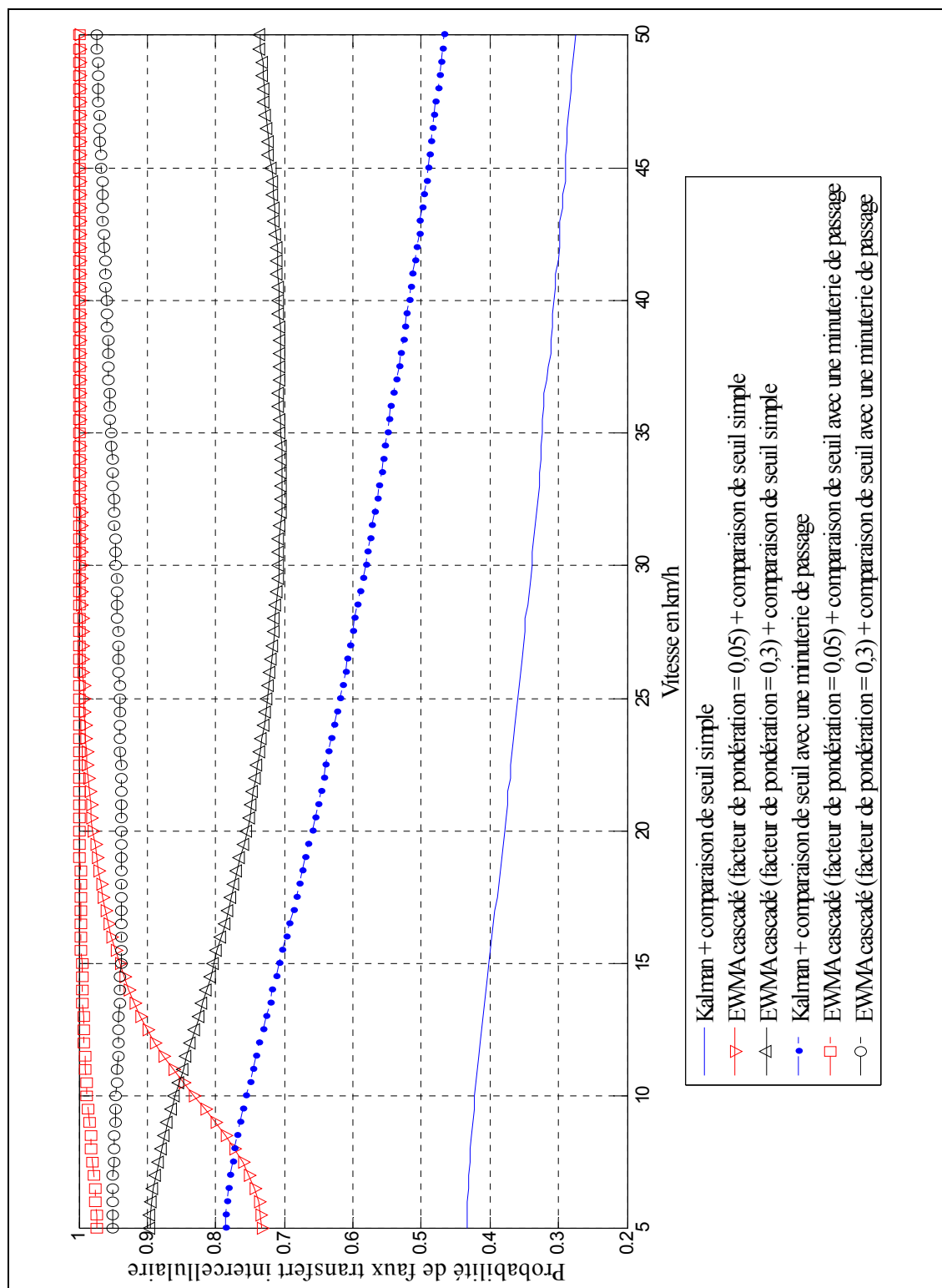


Figure 3.19 Nombre de faux transferts intercellulaires en fonction de la vitesse de la station mobile



## CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons focalisé notre recherche sur un problème crucial qui se rapporte au phénomène de transfert intercellulaire dans un réseau hétérogène. Pour arriver à comprendre ce problème, nous nous sommes confrontés dans une première étape au problème de modélisation du canal de propagation. C'est ainsi que dans le premier chapitre nous avons discuté du phénomène de propagation des ondes radio électriques en général pour ensuite le limiter aux modèles de canal dans un environnement microcellulaire.

Dans le deuxième chapitre nous avons introduit le transfert intercellulaire en présentant quelques caractéristiques ainsi que son importance dans les réseaux homogènes et hétérogènes. Dans notre étude du processus de transfert intercellulaire, nous avons vu qu'on pouvait le diviser en quatre parties : mesure, transformation, décision et exécution. Finalement dans ce deuxième chapitre nous avons présenté et classifié quelques algorithmes de transfert intercellulaire existant pour à la fin choisir l'algorithme le plus approprié à notre étude.

Dans le troisième et dernier chapitre de ce mémoire nous avons présenté l'essentiel de notre travail qui consiste à créer un algorithme de transfert intercellulaire pour les réseaux hétérogènes. Ainsi nous avons supposé qu'un terminal mobile est connecté au réseau WLAN et qui se déplace pour sortir du rayon de couverture du WLAN pour basculer vers le réseau cellulaire. La puissance du signal reçu par ce terminal mobile est constamment traitée. Nous avons opté pour la comparaison des résultats obtenus par deux types de filtres. Le premier est un filtre EWMA cascadié et le deuxième est un filtre de Kalman scalaire qui est souvent utilisé comme estimateur de signal. Pour la phase de décision deux algorithmes ont été aussi choisis pour les comparer. Ils consistent en un algorithme basé sur une comparaison de seuil et le deuxième en plus de la comparaison de seuil nous avons rajouté une minuterie de passage.

Les résultats obtenus ont démontré que l'utilisation du filtre EWMA cascadié avec une fenêtre appropriée donne de meilleures performances de point de vue du nombre de transfert

intercellulaire et ainsi on évite l'effet ping-pong. Mais de point de vue probabilité de faux transfert intercellulaire nous avons démontré que dans le pire des cas notre algorithme basé sur une comparaison de seuil simple et en utilisant un filtre de Kalman limite de 40% cette probabilité comparé au filtre EWMA cascadi. Donc d'un point de vue réseau de télécommunication qui exige que le réseau soit le plus fiable possible (pas d'interruption de service) on préfère opter vers un algorithme qui assure le maintien de la communication même si cela se fait en dépit du débit offert aux utilisateurs. L'algorithme utilisant le filtre de Kalman ainsi que son analyse furent publiés dans (Abdelmalek et al., 2011) et ils constituent les contributions principales de cette maîtrise.

Pour les travaux futurs plusieurs perspectives se présentent. Nous pouvons concentrer nos recherches sur une approche qui estime dynamiquement la taille de la fenêtre optimale pour le filtre EWMA cascadi. Une autre approche consiste à développer un algorithme basé sur le filtre de Kalman étendu qui aura la capacité d'estimer dynamiquement les paramètres du canal de propagation. D'autres travaux peuvent aussi généraliser tous ces travaux pour des scénarios multiutilisateurs.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abdelmalek, Saif Eddine, Francois Gagnon, Charles Despins et Honglin Hu. 2011. « Vertical Handoff Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks Based on Scalar Kalman Filtering ». In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd* (15-18 May 2011). p. 1-5.
- Al-Helali, A. A., A. Mahmoud, T. Al-Kharobi et T. Sheltami. 2009. « Characterization of Vertical Handoff Delay for Mobile IP Based 3G/WLAN Integrated Networks ». In *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th* (26-29 April 2009). p. 1-5.
- Ayyappan, K., K. Narasimman et P. Dananjayan. 2009. « SINR based vertical handoff scheme for QoS in heterogeneous wireless networks ». In., p. 117-21. Coll. « 2009 International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/ICFCC.2009.121>>.
- Carlson, A. Bruce. 1986. *Communication systems : an introduction to signals and noise in electrical communication*, 3rd. Coll. « McGraw-Hill series in electrical engineering ». New York, N.Y.: McGraw-Hill, xvii, 686 p. p.
- D.C. Cox, R.R. Murray, and A.W. norris. 1984. « 800 MHz attenuation measured in and around suburban houses ». *AT&T Bell Laboratory Technical Journal*, vol. 673, n° 6 (July).
- Fang, Zhu, et J. McNair. 2004. « Optimizations for vertical handoff decision algorithms ». In. Vol. Vol.2, p. 867-72. Coll. « 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No.04TH8733) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/WCNC.2004.1311300>>.
- Gudmundson, B., et O. Grimlund. 1992. « Handoff in microcellular based personal telephone systems ». In *Third generation wireless information networks*. p. 187-203. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Gudmundson, M. 1991. « Correlation model for shadow fading in mobile radio systems ». *Electronics Letters*, vol. 27, n° 23, p. 2145-2146.
- Hatami, A., P. Krishnamurthy, K. Pahlavan, M. Ylianttila, J. Makela et R. Pichna. 1999. « Analytical framework for handoff in non-homogeneous mobile data networks ». In. Vol. vol.2, p. 760-4. Coll. « 10th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'99). Proceedings ». Odsaka, Japan: Osaka Univ.

- Ho, M. J., et G. L. Stuber. 1993. « Co-channel interference of microcellular systems on shadowed Nakagami fading channels ». In *Vehicular Technology Conference, 1993 IEEE 43rd* (18-20 May 1993). p. 568-571.
- Hyo Soon, Park, Yoon Sung Hoon, Kim Tae Hyoun, Park Jung Shin, Do Mi Sun et Lee Jai Yong. 2003. « Vertical handoff procedure and algorithm between IEEE802.11 WLAN and CDMA cellular network ». In., p. 103-12. Coll. « Mobile Communications. 7th CDMA International Conference, CIC 2002. Revised Papers (Lecture Notes in Computer Science Vol.2524) ». Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Jakes, William C. 1974. *Microwave mobile communications*. New York, N.Y.: J. Wiley and Sons, ix, 642 p. p.
- Jakes, William C. 1994. *Microwave mobile communications*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, xiii, 642 p. p.
- Kay, Steven M. 1993. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*.
- Kemeng, Yang, Qiu Bin et L. S. Dooley. 2007. « Using SINR as vertical handoff criteria in multimedia wireless networks ». In., p. 967-70. Coll. « 2007 International Conference on Multimedia Expo ». Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Kemeng, Yang, I. Gondal et Qiu Bin. 2008. « Multi-dimensional adaptive SINR based vertical handoff for heterogeneous wireless networks ». *IEEE Communications Letters*, vol. 12, n° 6, p. 438-40.
- Khan, R., S. Aissa et C. Despins. 2009. « Seamless vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless networks-an advanced filtering approach ». In., p. 255-60. Coll. « 2009 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/ISCC.2009.5202349>>.
- Kinoshita, Y., et T. Itoh. 1993. « Performance analysis of a new fuzzy handoff algorithm by an indoor propagation simulator ». In., p. 241-5. Coll. « 1993 43rd IEEE Vehicular Technology Conference. Personal Communication - Freedom Through Wireless Technology (Cat. No.93CH3305-0) ». New York, NY, USA: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/VETEC.1993.507053>>.
- Lin, Jason Yi-Bing, et Imrich Chlamtac. 2001. *Wireless and mobile network architectures*. New York, N.Y.: J. Wiley and Sons, xxiii, 532 p. p.
- Liodakis, G., et P. Stavroulakis. 1994. « A novel approach in handover initiation for microcellular systems ». In *Vehicular Technology Conference, 1994 IEEE 44th* (8-10 Jun 1994). p. 1820-1823 vol.3.

- Liu, Min, Zhongcheng Li, Xiaobing Guo et Eryk Dutkiewicz. 2008. « Performance analysis and optimization of handoff algorithms in heterogeneous wireless networks ». *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, n° 7, p. 846-857.
- Liu, Xia, Jiang Ling-ge et He Chen. 2008. « A novel fuzzy logic vertical handoff algorithm with aid of differential prediction and pre-decision method ». In., p. 5665-70. Coll. « 2007 IEEE International Conference on Communications ». Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Maturino-Lozoya, H., D. Munoz-Rodriguez et H. Tawfik. 1994. « Pattern recognition techniques in handoff and service area determination ». In. Vol. vol.1, p. 96-100. Coll. « VTC 1994. 'Creating Tomorrow's Mobile Systems'. 1994 IEEE 44th Vehicular Technology Conference (Cat. No.94CH3438-9) ». New York, NY, USA: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/VETEC.1994.345157>>.
- Mehbodniya, A., et J. Chitizadeh. 2005. « An intelligent vertical handoff algorithm for next generation wireless networks ». In *Wireless and Optical Communications Networks, 2005. WOCN 2005. Second IFIP International Conference on* (6-8 March 2005). p. 244-249.
- Papoulis, Athanasios. 1991. *Probability, random variables, and stochastic processes*, 3rd. Coll. « McGraw-Hill series in electrical engineering. Communications and signal processing ». New York, N.Y.: McGraw-Hill, xvii, 666 p. p.
- Pollini, G. P. 1996. « Trends in handover design ». *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, n° 3, p. 82-90.
- Proakis, John G. 2000. *Digital communications*, 4th. Coll. « McGraw-Hill series in electrical and computer engineering ». Boston: McGraw-Hill, xxi, 1002 p. p.
- Qing, He. « A fuzzy logic based vertical handoff decision algorithm between WWAN and WLAN ». In. Vol. vol.2, p. 561-4. Coll. « 2010 2nd International Conference on Networking and Digital Society (ICNDS 2010) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/ICNDS.2010.5479442>>.
- Rappaport, Theodore S. 2002. *Wireless communications : principles and practice*, 2nd. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, xxiii, 707 p. p. <<http://www.loc.gov/catdir/toc/fy022/2002279109.html>>.
- Rice, S. 1945. « Mathematical analysis of random noise : Part two ». *Bell System Technical Journal*, p. 46-156.
- Senarath, G. N., et D. Everitt. 1995. « Performance of handover priority and queueing systems under different handover request strategies ». In *Vehicular Technology Conference, 1995 IEEE 45th* (25-28 Jul 1995). Vol. 2, p. 897-901 vol.2.



- Siddiqui, F. 2007. « Mobility management techniques for heterogeneous wireless networks ». Ph.D., United States -- Michigan, Wayne State University, 159 p. <<http://proquest.umi.com/pqdweb?did=1425307861&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD>>.
- Sizun, Hervé, et SpringerLink (Service en ligne). 2005. *Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications [ressource électronique]*. Coll. « Signals and Communication Technology ». Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <<http://proxy.cegepat.qc.ca/login?url=http://dx.doi.org/10.1007/b137896>  
<http://sbiproxy.uqac.ca/login?url=http://dx.doi.org/10.1007/b137896>  
<http://proxy.uqtr.ca/login.cgi?action=login&u=uqtr&db=springer-eb&url=http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1007%2Fb137896>  
<http://dx.doi.org/10.1007/b137896>  
<http://proxy.uqar.ca/login?url=http://dx.doi.org/10.1007/b137896>>.
- Stevens-Navarro, E., Lin Yuxia et V. W. S. Wong. 2008. « An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks ». *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, n° 2, p. 1243-54.
- Tekinay, S., et B. Jabbari. 1991. « Handover and channel assignment in mobile cellular networks ». *Communications Magazine, IEEE*, vol. 29, n° 11, p. 42-46.
- Wang, H. J., R. H. Katz et J. Giese. 1999. « Policy-enabled handoffs across heterogeneous wireless networks ». In., p. 51-60. Coll. « Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications ». Los Alamitos, CA, USA: IEEE Comput. Soc. <<http://dx.doi.org/10.1109/MCSA.1999.749277>>.
- Wong, D., et D. Cox. 1997. « An optimal local mean signal power level estimator for Rayleigh fading environments ». In *Information, Communications and Signal Processing, 1997. ICICS., Proceedings of 1997 International Conference on* (9-12 Sep 1997). Vol. 3, p. 1701-1704 vol.3.
- Ylianttila, M., J. Makela et P. Mahonen. 2002. « Supporting resource allocation with vertical handoffs in multiple radio network environment ». In. Vol. vol.1, p. 64-8. Coll. « 13th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2002. Proceedings (Cat. No.02TH8637) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/PIMRC.2002.1046661>>.
- Ylianttila, M., M. Pande, J. Makela et P. Mahonen. 2001. « Optimization scheme for mobile users performing vertical handoffs between IEEE 802.11 and GPRS/EDGE networks ». In. Vol. vol.6, p. 3439-43. Coll. « GLOBECOM'01. IEEE Global Telecommunications Conference (Cat. No.01CH37270) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/GLOCOM.2001.966320>>.

Zahran, A. H., B. Liang et A. Saleh. 2006. « Signal threshold adaptation for vertical handoff in heterogeneous wireless networks ». *Mobile Networks and Applications*, vol. 11, n° 4, p. 625-40.