

Chapitre 2

Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

Sommaire

II.1 Introduction	40
II.2 Principes du système AMRC à porteuses multiples ou MC-CDMA	41
II.3 Modélisation du système MC-CDMA dans le cas d'une liaison descendant	43
II.4 Les détecteurs mono utilisateurs	46
II.5 Les techniques de détection Multi-Utilisateurs dans les systèmes MC-CDMA	52
II.6 Conclusion.....	60

II.1 Introduction

Le chapitre précédent était destiné à introduire les concepts de base utiles à l'étude des systèmes qui nous intéressent. De plus, il a permis de montrer l'intérêt de l'utilisation des techniques à étalement de spectre, dans le cas de réseaux cellulaires à grande capacité d'utilisateurs, ainsi que la robustesse des modulations à porteuses multiples vis à vis des canaux à trajets multiples. Les développements actuels évoluent donc vers l'association de ces deux techniques afin d'en combiner les avantages. Différents dispositifs en découlent, parmi eux, le système AMRC à porteuses multiples (ou MC-CDMA pour *Multi Carrier Code Division Multiple Access*) présente de nombreux avantages dans le cas des liaisons synchrones, c'est à dire en liaison descendante des stations de base vers les terminaux mobiles.

II.2 Principes du système AMRC à porteuses multiples ou MC-CDMA

Le signal MC-CDMA déjà étudié dans le premier chapitre est issu de la concaténation des opérations d'étalement de spectre par séquence directe et de modulation à porteuses multiples. Le modulateur MC-CDMA étale les données d_j de chaque utilisateur j dans le domaine fréquentiel [31]. L'étalement se réalise par la multiplication des données d_j par chacun des éléments du code c_j d'étalement associé. La figure II.1 représente le modulateur MC-CDMA dans le cas où le code d'étalement a une longueur L_c égale au nombre de sous-porteuses N_p . Sous l'hypothèse de L_c égale à N_p , l'expression du signal émis sur $[0; T_s$ [en fréquence intermédiaire, en sortie du modulateur est donnée par la relation [32] :

$$s_j(t) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{k=0}^{N_p-1} \Re\{d_j c_{k,j} \Pi(t) e^{2i\pi f_k t}\} \quad (\text{II.1})$$

avec

$$f_k = f_{fi} + \frac{k}{T_s}. \quad (\text{II.2})$$

L'étalement se faisant à la fréquence du signal à moduler, la durée T_s du symbole modulé reste égale à celle, T_d , du symbole d_j . Il en ressort un espacement entre sous-porteuses Δf donné par :

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_d}. \quad (\text{II.3})$$

L'enveloppe complexe X_j du signal modulé, échantillonné à T_s/N_p , est donc égale à :

$$X_j\left(\frac{nT_s}{N_p}\right) = \frac{d_j}{\sqrt{N_p}} \sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,j} e^{2i\pi n \frac{(k-N_p/2)}{N_p}} = (-1)^n d_j \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} \frac{c_{k,j}}{\sqrt{N_p}} e^{2i\pi n \frac{k}{N_p}}}_{TFD^{-1}}. \quad (\text{II.4})$$

Tout comme le signal OFDM, le signal MC-CDMA peut être généré par une transformée de Fourier discrète (TFD) inverse effectuée sur les chips du code d'étalement. Ainsi, le choix des codes d'étalement est fondamental. En effet, de trop grandes variations de l'enveloppe complexe du signal modulé sont délicates à traiter pour les amplificateurs radiofréquence de puissance [10].

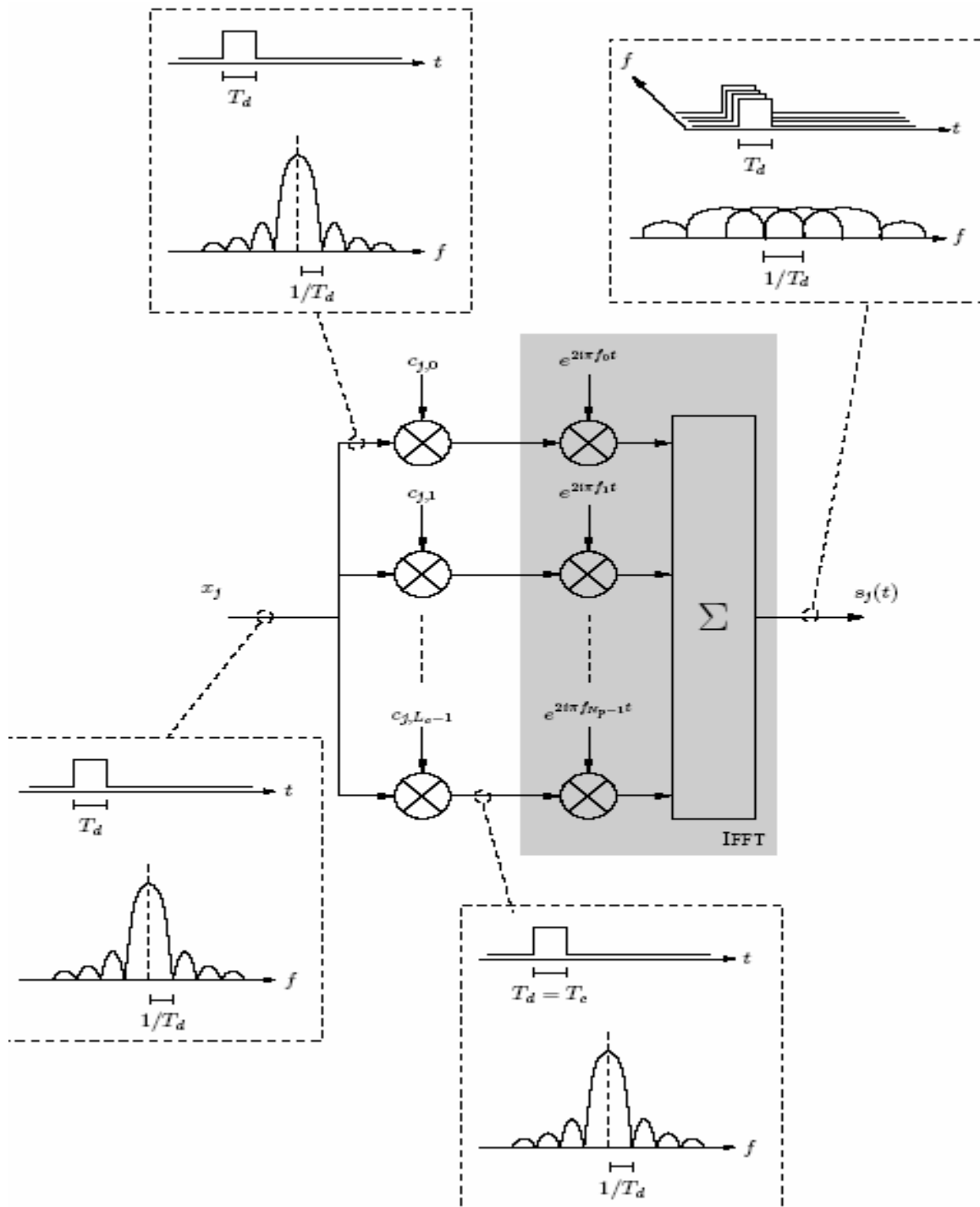


Figure II.1 : Modulateur MC-CDMA du j ième utilisateur avec $L_c = N_p$

La description du modulateur MC-CDMA repose ici sur l'hypothèse $L_c = N_p$. Cependant, le

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

plus souvent, des combinaisons sont proposées pour différentes valeurs de L_c et N_p . De plus, les techniques présentées précédemment pour combattre les ISI et les ICI, à savoir l'ajout d'intervalle de garde et le zero-padding, sont toujours utilisables dans notre cas de figure [12]. Dés lors, nous distinguerons par la suite le nombre de sous-porteuses utiles N_{p_u} , sur lesquelles les données sont émises, du nombre de sous-porteuses totales correspondant au nombre de points de la TFD.

Ainsi, l'agencement de la longueur des codes et du nombre de sous-porteuses permet le dimensionnement de systèmes MC-CDMA adaptés à de nombreux cas de figure.

La figure suivante montre la performance du schéma d'accès MC-CDMA contre les bruits du canal et les interférences liées aux autres utilisateurs.

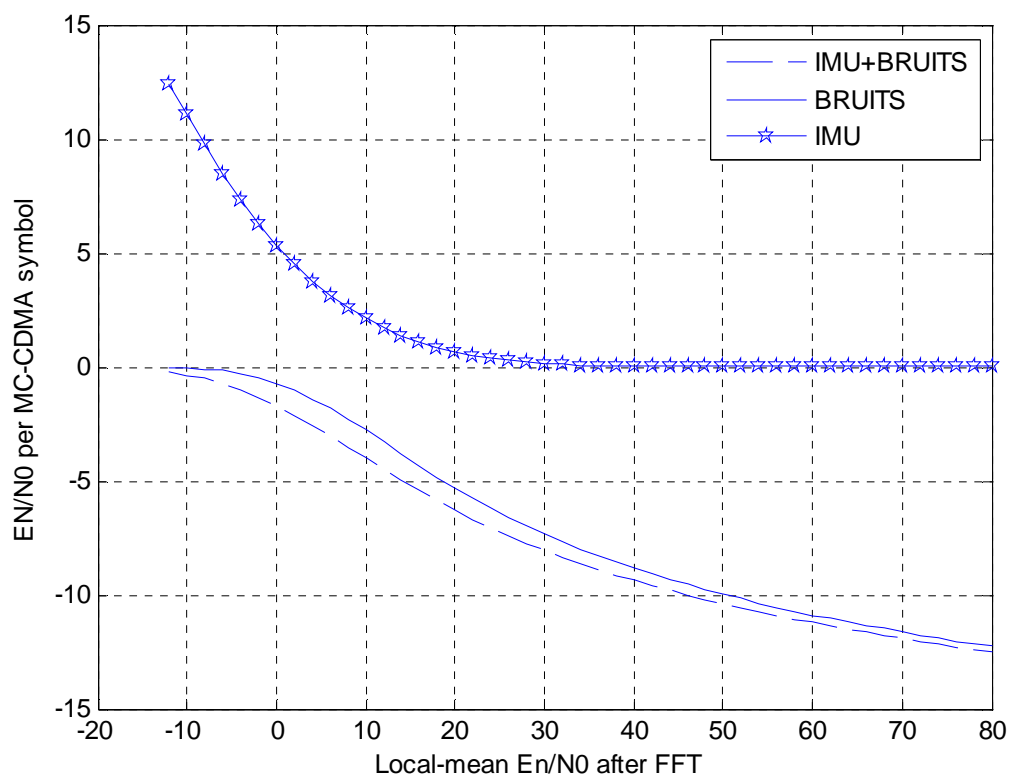


Figure II.2 : Gain apporté par le système d'accès MC-CDMA

II.3 Modélisation du système MC-CDMA dans le cas d'une liaison descendante

La chaîne de radiocommunications illustrée sur la figure II.3 représente l'organisation générale d'une liaison descendante synchrone entre un émetteur et N_u terminaux mobiles basés sur la technique MC-CDMA. La conversion série-parallèle au sein de l'émetteur montre

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

que chaque sous-porteuse est modulée par les données de chaque utilisateur multipliées par chacun des chips de leur séquence d'étalement.

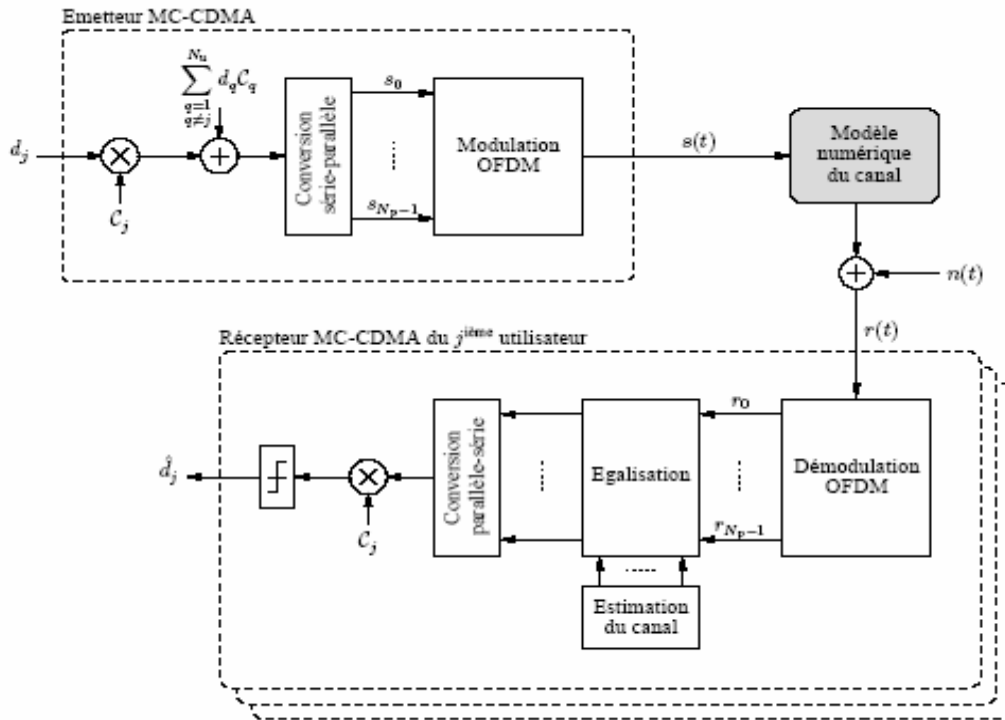


Figure II.3 : Représentation d'une chaîne de radiocommunications utilisant la technique MC-CDMA

Afin de remédier aux perturbations introduites par le canal de transmission, il est nécessaire de mettre en oeuvre un dispositif d'égalisation. Deux catégories de détecteurs existent, les détecteurs mono-utilisateurs et les détecteurs multi-utilisateurs [33]. Dans le premier cas, seule la séquence de l'utilisateur considéré est supposée connue, les interférences liées aux autres utilisateurs étant alors considérées comme des brouilleurs. Dans l'autre, les séquences de tous les utilisateurs sont connues, les interférences d'accès multiples sont alors considérées comme des signaux déterministes et non plus comme aléatoires. Ainsi, dans le cas où N_u utilisateurs sont actifs, le signal reçu peut s'exprimer par :

$$r(t) = (h * s)(t) + n(t) \quad (\text{II.5})$$

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

$$r(t) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{P=0}^{P-1} \sum_{j=0}^{N_u-1} \sum_{k=0}^{N_p-1} \beta_P(t) e^{i(2\pi\nu_P t + \theta_P(t))} d_j c_{k,j} e^{2i\pi(k-N_p/2)\frac{t-\tau_P}{T_s}} + n(t) \quad (\text{II.6})$$

$\theta_P(t) = -2\pi\nu_P \tau_P(t)$ est le déplacement de la phase introduit par le trajet de propagation p.

Dans les sections suivantes, afin de faciliter la présentation des différentes techniques de détection, nous supposons un dimensionnement adéquat du système étudié. Ainsi, la durée de l'intervalle de garde T_g sera suffisante, garantissant l'absence d'interférences entre symboles et entre sous-porteuses. De plus, la durée du symbole MC-CDMA sera suffisante afin de considérer le canal comme invariant sur toute la durée de ce symbole, ainsi que l'absence de sélectivité fréquentielle sur chaque sous-porteuse. Ensuite, l'indépendance des processus aléatoires affectant chaque sous-porteuse sera garantie par les entrelacements temporel et fréquentiel. Sous ces hypothèses, l'équivalence temps-fréquence permet la modélisation du canal dans le domaine fréquentiel par un ensemble de N_p coefficients h_k , égaux à $\rho_k e^{i\phi_k}$, affectant chaque sous-porteuse, indépendants et constants sur la durée $T_s + T_g$ d'un symbole.

Enfin, et pour faciliter l'introduction des différentes techniques de détection, nous prendrons L_c égal à N_p . Ainsi, après les opérations de filtrage, de transposition en bande de base, d'échantillonnage et de suppression de l'intervalle de garde, l'expression d'un symbole MC-CDMA reçu peut s'écrire [34] :

$$r = H C d + n, \quad (\text{II.7})$$

où r désigne un vecteur constitué des valeurs reçues sur chaque sous-porteuse :

$$r = \left[r_0 \cdots r_{N_p-1} \right]^T. \quad (\text{II.8})$$

La matrice H représente la matrice des coefficients complexes du canal de taille $N_p * N_p$.

Les hypothèses précédemment formulées sur le bon dimensionnement du système permettent de considérer cette matrice comme diagonale :

$$H = \begin{pmatrix} h_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & h_{N_p-1} \end{pmatrix}. \quad (\text{II.9})$$

La matrice C représente les codes d'étalement. L'opération d'étalement peut ainsi être représentée comme la multiplication de la matrice C par le vecteur d, constitué des données de chaque utilisateur. On a donc :

$$C = [c_0 \cdots c_{N_b-1}] = \begin{pmatrix} c_{0,0} & c_{0,1} & \cdots & c_{0,N_b-1} \\ c_{1,0} & c_{1,1} & \cdots & c_{1,N_b-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{L_c-1,0} & c_{L_c-1,1} & \cdots & c_{L_c-1,N_b-1} \end{pmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Avec } c_i = [c_{0,i} \ c_{1,i} \ \cdots \ c_{L_c-1,i}]^T \text{ et } d = [d_0 \ \cdots \ d_{N_b-1}]^T.$$

Le vecteur n représente les N_p composantes du bruit affectant chaque sous-porteuse et modélisables comme étant des processus gaussiens additifs : $n = [n_0 \ \cdots \ n_{N_p-1}]^T$.

En réception, la structure des détecteurs étudiés repose sur l'utilisation d'un étage d'égalisation, suivi des opérations de désétalement selon la séquence de l'utilisateur considéré, et enfin la démodulation binaire. Les performances atteintes avec les détecteurs multi-utilisateurs sont meilleures que celles des détecteurs mono-utilisateurs, nous considérerons en premier lieu les détecteurs mono-utilisateurs pour mieux comprendre le principe des détecteurs multi-utilisateurs.

II.4 Les détecteurs mono-utilisateurs

Les détecteurs mono-utilisateurs considèrent uniquement le signal de l'utilisateur actif, les autres utilisateurs sont assimilés à des brouilleurs [35][36][37]. Les détecteurs mono-utilisateurs classiquement rencontrés utilisent une structure d'égalisation linéaire, consistant en un égaliseur à une prise. En utilisant la notation matricielle précédente, il est possible d'exprimer G, la matrice diagonale composée des coefficients g_k d'égalisation :

$$G = \begin{pmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & g_{N_p-1} \end{pmatrix}. \quad (\text{II.11})$$

Après égalisation et désétalement selon la séquence c_j de l'utilisateur considéré, l'estimation du symbole émis peut s'exprimer par :

$$\begin{aligned} \hat{d}_j &= c_j^{-T} Gr \\ &= c_j^{-T} GHCd + c_j^{-T} Gn \\ &= \sum_{q=0}^{N_p-1} \sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,j} (g_k h_k c_{k,q} d_q + g_k n_k) \\ \hat{d}_j &= \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,j}^2 g_k h_k d_j}_{\text{signal utile}} + \underbrace{\sum_{q=0}^{N_p-1} \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^{N_p-1} c_{k,j} c_{k,q} g_k h_k d_q}_{\text{MAI}} + \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,j} g_k n_k}_{\text{BBAG}} \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

Cette expression est très importante à la compréhension du système. Elle se compose de trois parties. La première partie forme le signal utile, soit les données reçues de l'utilisateur actif. Le second terme représente les interférences d'accès multiples ou MAI. Ces interférences sont engendrées par les brouilleurs. Le dernier terme de l'expression représente, quant à lui, le bruit blanc additif gaussien pondéré du code d'étalement de l'utilisateur considéré et du coefficient d'égalisation appliqué pour chaque sous-porteuse. Il existe différentes techniques de détections mono-utilisateurs qui peuvent être mises en oeuvre. Nous détaillons ici les principales :

➤ **Le détecteur à combinaison à gain maximal (détecteur optimal) en contexte mono-utilisateur : le filtre adapté ou MRC**

Cette technique CGM ou MRC, pour *Maximum Ratio Combining*, est optimale vis-à-vis du bruit additif en l'absence d'interférences d'accès multiples. Elle consiste à appliquer sur chaque sous-porteuse un coefficient d'égalisation g_k égal au complexe conjugué du coefficient du canal h_k , soit :

$$g_k = h_k^*. \quad (\text{II.13})$$

Le principal inconvénient de cette technique est qu'elle ne restaure pas l'orthogonalité entre

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

utilisateurs. Dès lors, la présence de plusieurs utilisateurs, et donc l'apparition de MAI, dégrade fortement les performances de cette technique.

➤ **Le détecteur à combinaison à gain égal EGC**

Cette technique CGE ou EGC, pour *Equal Gain Combining*, repose sur la correction de la distorsion de phase introduite par le canal en appliquant un coefficient d'égalisation g_k à chaque sous-porteuse égal à :

$$g_k = \frac{h_k^*}{|h_k|}. \quad (\text{II.14})$$

Cette technique permet également de corriger partiellement la MAI introduite dans un contexte multi-utilisateurs. Néanmoins, il faut noter que les performances de cette technique, pour un système multi-porteuses, ne sont pas satisfaisantes.

➤ **Le détecteur à combinaison et à restauration d'orthogonalité ORC ou ZF (zéro forcing)**

Cette technique CRO ou ORC, pour *Orthogonality Restoring Combining*, permet d'annuler totalement la dispersion apportée par le canal. Le coefficient d'égalisation appliqué sur chaque sous-porteuse est donné par :

$$g_k = \frac{1}{h_k} \text{ avec } h_k \neq 0. \quad (\text{II.15})$$

Dans ce cas, l'expression de l'estimation de d_j devient :

$$\hat{d}_j = \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,j}^2 d_j}_{\text{signal utile}} + \underbrace{\sum_{q=0}^{N_p-1} \sum_{\substack{k=0 \\ q \neq j}}^{N_p-1} c_{k,j} c_{k,q} d_q}_{\text{MAI}} + \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,j} \frac{1}{h_k} n_k}_{\text{BBAG}}. \quad (\text{II.16})$$

L'utilisation de codes d'étalement orthogonaux aux niveaux de l'émetteur garantit :

$$\sum_{k=0}^{L_c-1} c_{k,j} c_{k,q} = 0 \quad \forall j \neq q. \quad (\text{II.17})$$

Dés lors, le second terme de l'expression correspondant au terme de la MAI sera annulé.

L'expression devient alors :

$$\hat{d}_j = \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,j}^2 d_j}_{\text{signal utile}} + \underbrace{\sum_{k=0}^{N_p-1} c_{k,j} \frac{1}{h_k} n_k}_{\text{BBAG}} . \quad (\text{II.18})$$

Les performances de cette technique, qui restaure l'orthogonalité des codes d'étalement, seront donc indépendantes du nombre d'utilisateurs. Son défaut est l'amplification du terme de bruit blanc lors d'évanouissements profonds, lorsque h_k tend vers 0. Dans ce cas, le bruit amplifié sur certaines porteuses va dégrader les performances globales du système. Afin de compenser cet effet, il est possible d'appliquer cette technique jusqu'à un certain seuil α . Pour des amplitudes inférieures à ce seuil, on utilise une valeur de g_k fixe :

$$g_k = \begin{cases} \frac{1}{h_k} & \text{si } |h_k| > \alpha \\ \xi & \text{si } |h_k| \leq \alpha \end{cases} . \quad (\text{II.19})$$

➤ **Le détecteur à combinaison à erreur quadratique moyenne minimale MMSE**

Cette technique CEQMM ou MMSE, pour *Minimum Mean Square Error*, offre un compromis entre la minimisation du terme d'interférences d'accès multiples et la maximisation du rapport signal à bruit. Elle est issue de l'application du filtre de Wiener. Le calcul du coefficient d'égalisation a pour but de minimiser l'erreur quadratique moyenne pour chaque sous-porteuse entre le signal émis et le signal égalisé. Cette résolution conduit à l'expression des coefficients g_k :

$$g_k = \frac{h_k^*}{|h_k|^2 + \frac{1}{\gamma_k}} \text{ avec } h_k \neq 0 \quad (\text{II.20})$$

Avec l'hypothèse d'un canal normalisé en puissance, $E[|h_k|^2] = 1$. Le coefficient γ_k est calculé à partir de l'estimation du rapport signal à bruit par sous-porteuse, induisant une complexité supplémentaire. Afin de s'affranchir de cette estimation, il est possible d'appliquer un coefficient C , fixé en fonction du point limite de fonctionnement du système. Une technique hybride entre la technique ORC et MMSE existe, elle est appelée égalisation partielle et propose un compromis entre les deux techniques de restauration.

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

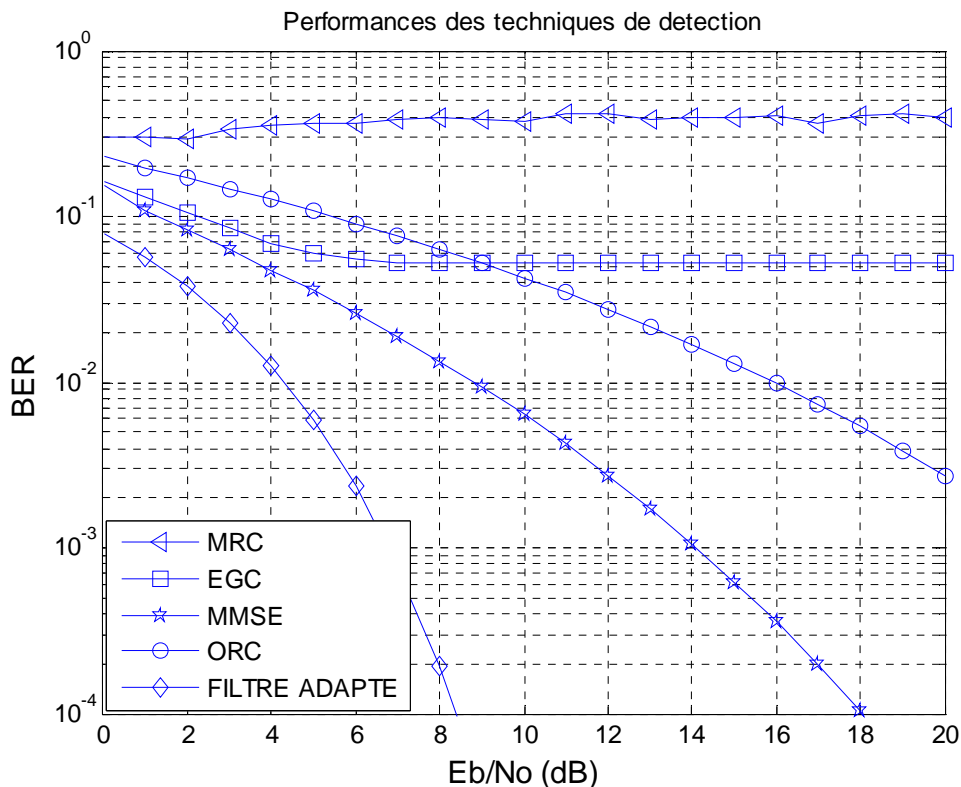


Figure II.4 : Performances des techniques de détection

Mono-utilisateur sur canal théorique de Rayleigh, à pleine charge, $N_p = Lc = 16$.

La courbe (1) représente les performances obtenues dans le cas idéal de l'annulation des interférences d'accès multiples.

Cette borne, appelée performances du système idéal MC-CDMA à filtre adapté, correspond à la probabilité d'erreur obtenue en présence d'un utilisateur dans le cas d'une transmission sur un nombre N de canaux de Rayleigh statistiquement indépendants, avec en réception la mise en oeuvre de la technique MRC. Lorsque le nombre N de sous-porteuses augmente, cette borne tend vers les performances obtenues sur canal Gaussien. Elle est ici donnée pour $N = 16$. La technique ORC ou ZF -courbe (3)- rétablit l'orthogonalité entre les différents signaux et évite ainsi l'interférence inter-utilisateurs, mais au prix d'une amplification importante du bruit, en particulier pour les faibles rapports E_b/N_0 . Les performances les plus mauvaises sont obtenues à pleine charge avec la technique MRC -courbe (5)- qui accentue l'interférence inter-utilisateurs. La détection selon le critère de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE) -courbe (2)- offre les meilleurs résultats, mais elle nécessite d'estimer le rapport signal à bruit. Une alternative possible est de mettre en oeuvre une égalisation dite MMSE sous-optimale pour laquelle le rapport signal à bruit n'est plus estimé mais fixé à une valeur donnée.

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

Les figures suivantes donnent les graphes de détecteur MMSE mono utilisateurs dans un canal AWGN et dans un canal de Rayleigh.

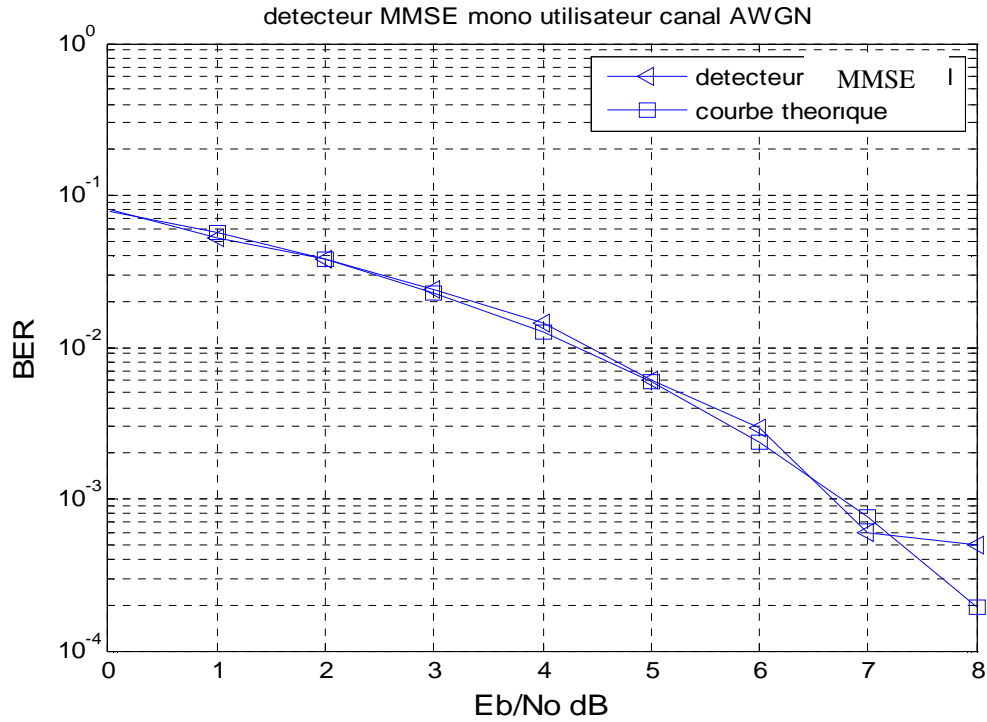


Figure II.5 : Détection mono utilisateur dans un canal AWGN avec le détecteur MMSE

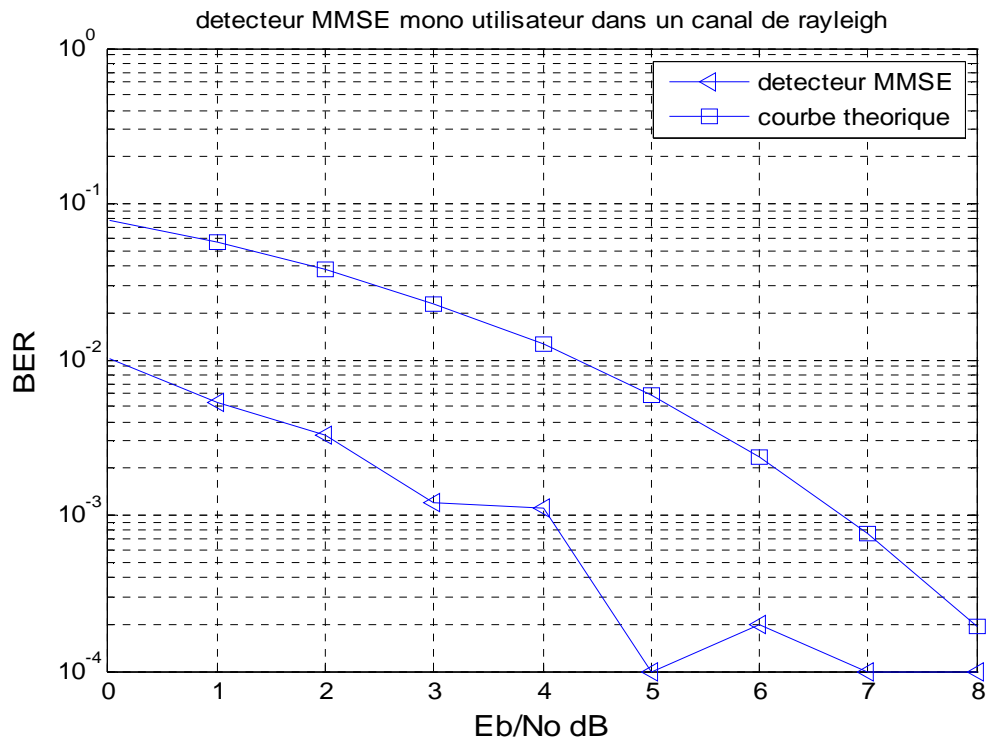


Figure II.6 : Détection mono utilisateur dans un canal de Rayleigh avec MMSE

II.5 Les techniques de détection multi-utilisateurs dans le système MC-CDMA

Les détecteurs multi-utilisateurs sont basés sur une détection "conjointe" tenant compte de l'ensemble des séquences émises par les utilisateurs. Ceci permet de ne plus considérer les signaux envoyés par les autres émetteurs uniquement comme des signaux parasites mais de détecter simultanément l'ensemble des séquences de données de manière à exploiter les éventuelles informations apportées par les interactions dues à l'émission simultanées des utilisateurs. Les IAM ne sont donc plus considérées uniquement comme des bruits mais sont exploitées de manière à améliorer le TEB en réception [38][39].

Le récepteur optimal est le détecteur à maximum de vraisemblance (MV), il est capable de détecter conjointement tous les signaux des usagers. Son fonctionnement demande la connaissance du canal de tous les utilisateurs et de leurs séquences d'étalement. Cette information est disponible pour la station de base, mais pas pour les stations mobiles, qui ne sont pas informées directement de la présence des autres utilisateurs. Dans ces conditions, le maximum de vraisemblance utilisant l'algorithme de Viterbi, nécessite un coût de calcul qui devient rapidement prohibitif.

L'impossibilité d'utiliser en pratique le récepteur MV dans la plupart des systèmes CDMA a justifié la recherche de solutions sous optimales qui permettent de réduire l'interférence entre utilisateurs ou de réaliser la détection Multi-Utilisateur avec un niveau de performance acceptable et une complexité raisonnable [29].

Les différentes techniques de réduction de l'interférence entre utilisateurs et détection multi-utilisateurs peuvent être séparées et classées en deux catégories : linéaires et non linéaires.

- **Techniques linéaires**

Parmi les techniques linéaires, il y a celles qui opèrent dans l'espace des codes, en faisant la détection conjointe des utilisateurs et, celles qui n'ont pas besoin de connaître explicitement les autres utilisateurs, mais qui parviennent, dans certaines situations, à réduire considérablement l'interférence entre utilisateurs.

Les techniques linéaires effectuent une transformation linéaire d'un ensemble d'échantillons de la sortie du canal avec l'objectif d'éliminer l'interférence. Plusieurs critères permettent de déterminer cette transformation, qui est généralement mise en oeuvre sur la forme d'un filtre à réponse impulsionnelle finie.

- **Techniques non linéaires**

Des techniques non linéaires ont aussi été proposées pour combattre l'interférence entre utilisateurs. Parmi ces techniques, on trouve :

- **Le détecteur par élimination successive des interférences**

Le détecteur par éliminations successives des interférences (SIC pour Successive Interference Cancellation) consiste à réaliser une première détection, avec un RAKE par exemple, de l'utilisateur le plus puissant. Ensuite, on décide le symbole et on régénère le signal reçu de cet utilisateur à partir de cette décision, du code d'étalement et du canal de cet utilisateur. Ensuite, le signal régénéré est soustrait du signal reçu et, avec ce nouveau signal, on procède à la détection du deuxième utilisateur le plus puissant, puisque on s'est déjà débarrassé du premier et ainsi de suite.

A l'évidence, ce récepteur est sujet à la propagation d'erreur au cas où une mauvaise décision est effectuée sur un des utilisateurs. Il est clair que, plus l'erreur se situe au début du processus, pire seront les conséquences.

Intuitivement, on peut voir que l'efficacité de l'élimination de l'interférence est réduite quand la puissance des utilisateurs est à peu près la même. Il faut noter aussi que chaque étage de détection apporte un délai supplémentaire au traitement [12].

- **Le détecteur par éliminations parallèles des interférences**

Le détecteur par élimination parallèle des interférences (PIC pour Parallel Interference Cancellation) est plus indiqué dans les situations où les utilisateurs ont à peu près la même puissance.

Le PIC possède l'avantage de ne pas avoir besoin d'ordonner les utilisateurs selon leurs puissances. De plus, il permet la parallélisation des opérations, réduisant le délai de traitement. Celui-ci est encore plus réduit par le fait que le PIC a généralement moins d'étages que le SIC.

Il est judicieux d'utiliser un décorrélateur au lieu d'un RAKE dans le premier étage du PIC, afin d'avoir des symboles plus fiables dès la première itération. Cela permet une convergence plus rapide, ce qui signifie l'utilisation du minimum d'étages possibles.

Il faut noter qu'après la première itération, il faut vraiment utiliser le RAKE, car on suppose que les interférences ont été enlevées.

Ainsi comme le SIC, le PIC admet l'utilisation de décision souple et des techniques "turbo

détection” en utilisant le codage de canal pour améliorer la fiabilité des symboles utilisés dans la régénération du signal. Evidemment, cela implique une augmentation considérable de la complexité et du délai de traitement [40]. La figure suivante présente une classification des détecteurs Multi-Utilisateurs utilisés :

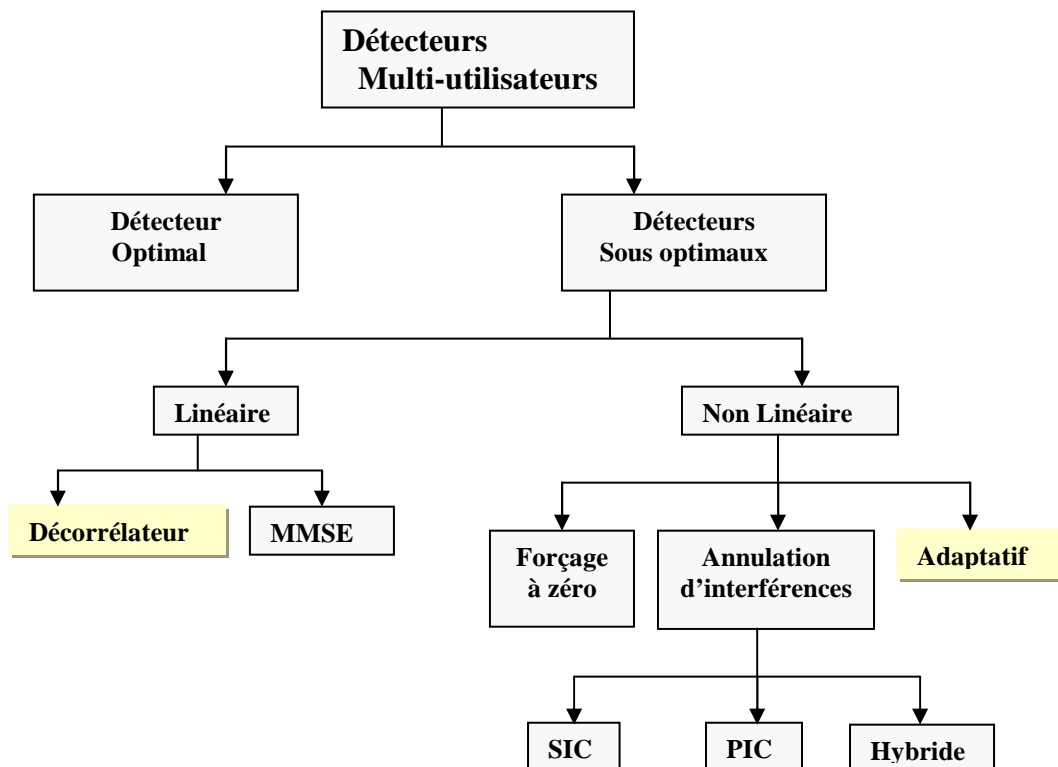


Figure II.7 : Classification des différentes techniques de détection Multi-Utilisateurs

Nous commençons par donner le principe et les performances des *récepteurs Multi-Utilisateurs* largement connues dans le domaine de la détection multi utilisateur, quelques simulations seront présentés.

Précisons qu'un récepteur Multi-Utilisateur *linéaire* utilisé pour la détection du symbole b_k d'un utilisateur particulier consiste à trouver un vecteur \mathbf{w}_k suivant un certain critère, tel que le symbole détecté \hat{b}_k est donné suivant la règle de décision [40][32] :

$$\hat{b}_k = \text{sgn}(\mathbf{w}_k^T \mathbf{r}) \quad (\text{II.21})$$

Tout le long de ce chapitre, nous considérons que l'utilisateur numéro 1 ($k=1$) est l'utilisateur d'intérêt.

Les récepteurs MC-CDMA sont habituellement classés selon différents critères qui peuvent être la structure du récepteur (série, parallèle, à retour de décision...), la technique

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

d'égalisation employée, la connaissance a priori ou non d'information sur les utilisateurs émettant sur le canal de transmission,...

Le premier critère que nous prenons en compte concerne la connaissance a priori d'informations sur chacun des utilisateurs. Cette information peut correspondre à la connaissance partielle ou totale de la matrice des codes d'étalement. Ainsi, un détecteur est qualifié de mono utilisateur lorsque seul le code d'étalement de l'utilisateur dont on cherche à retrouver les données est connu du récepteur. Les interférences d'accès multiple provenant des autres utilisateurs sont alors considérées comme des brouilleurs et non porteuses d'information utile. En revanche, les détecteurs sont dits Multi-Utilisateurs lorsqu'ils s'appuient sur la connaissance d'information sur les différents utilisateurs. Dans certains cas, ils peuvent chercher à retrouver la séquence émise par certain nombre d'entre eux pour améliorer la détection des données d'un utilisateur particulier. Les interférences d'accès multiple ne sont plus ici considérées comme des signaux aléatoires mais comme des signaux déterministes.

En réalité, l'égalisation vise seulement à compenser les distorsions introduites par le canal. Elle ne permet pas à elle seule de retrouver les données transmises par un symbole MC-CDMA. Toutefois, son utilisation reste primordiale dans le cadre d'un système MC-CDMA. Ainsi, l'opération de détection inclura aussi bien les étapes d'égalisation, le désétalement que celle de démodulation. Les techniques de détection mono utilisateur restent valables pour les techniques de détection multi-utilisateurs.

Grâce à la connaissance des codes d'étalement attribués aux différents utilisateurs, le détecteur Multi-Utilisateur va chercher à estimer l'IAM (interférence d'accès multiple) afin de mieux détecter le signal de l'utilisateur considéré.

➤ La technique du maximum de vraisemblance (MLSE)

La technique MLSE « Maximum likelihood Sequence estimation » repose sur l'application du détecteur à maximum de vraisemblance. Celui-ci cherche à déterminer, pour chaque symbole MC-CDMA, le vecteur $\hat{X} = [\hat{x}_1 \dots \hat{x}_{Nu}]^T$ de données des Nu utilisateurs le plus vraisemblable parmi les 2^{NbNu} vecteurs émis possibles où N_b est le nombre de bits par symbole.

Chercher à minimiser la probabilité d'erreur d'une séquence revient à maximiser la probabilité d'erreur conditionnelle qu'un vecteur x^n ($1 \leq n \leq 2^{NbNu}$) ait été transmis sachant

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

que le vecteur r a été reçu. En appliquant la loi de Bayes sur les probabilités conditionnelles et en supposant une indépendance statistique entre les signaux r_k , maximiser cette probabilité conditionnelle revient à trouver le vecteur de données \hat{x} qui minimise le carré de la distance euclidienne entre le signal reçu et toutes les séquences émises possibles, soit :

$$\hat{x} = \arg \min \|r - HCx^n\| \quad \text{avec } 1 \leq n \leq 2^{NbNu} \quad (\text{II.22})$$

La mise en œuvre d'un tel détecteur requiert le calcul de 2^{NbNu} distances euclidiennes par durée symbole. Même si celui-ci correspond au détecteur optimal en terme de probabilité d'erreur, pour éviter une trop grande complexité des récepteurs, une telle technique ne peut être mise en œuvre que pour un nombre relativement peu élevé d'utilisateurs. D'autres structures Multi-Utilisateurs moins complexes mais sous optimales ont alors été développées comme nous allons le voir maintenant.

Les techniques à annulation d'interférences (IC)

Parmi celles-ci, les techniques de détection dites à annulation d'interférences « interférence cancellation » visent à estimer, dans un premier temps, les interférences d'accès multiples provoquées par la présence des données des $Nu - 1$ autres utilisateurs pour ensuite les soustraire au signal reçu et améliorer ainsi la détection du signal de l'utilisateur considéré [41]. Ce procédé mis en œuvre de manière itérative est construit pour éliminer simultanément ou successivement les interférences. Lorsque la détection du terme d'IAM est simultanée pour l'ensemble des $Nu - 1$ utilisateurs, la structure d'annulation des interférences est dite « parallèle » ou PIC (Parallel interference cancellation). Si cette annulation est réalisée de façon successive, la structure est alors dite « série » ou SIC (serial Interference cancellation). Pour les structures SIC, les contributions des utilisateurs sont annulées dans l'ordre décroissant des puissances reçus. Ces deux structures sont représentées sur la figure suivante. Notons que dans les deux cas, chaque étage d'égalisation peut reposer sur l'une des techniques linéaires mono-utilisateurs étudiés précédemment.

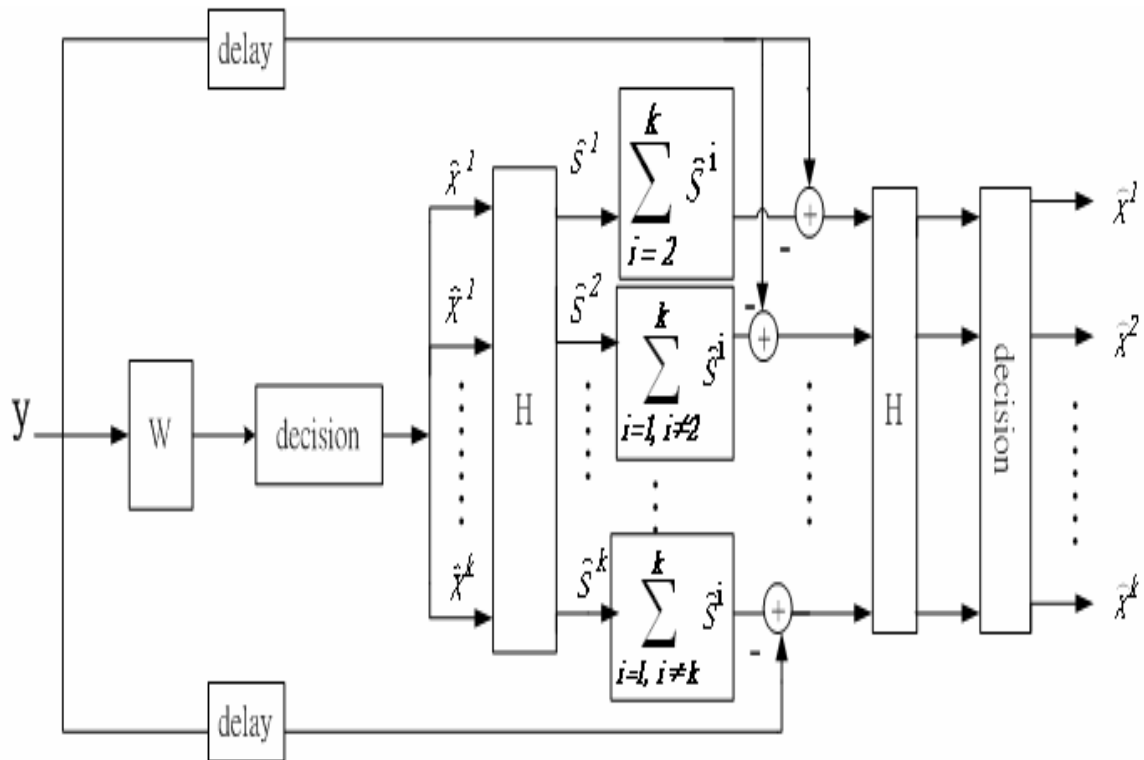


Figure II.8 : Nième étage d'un récepteur PIC

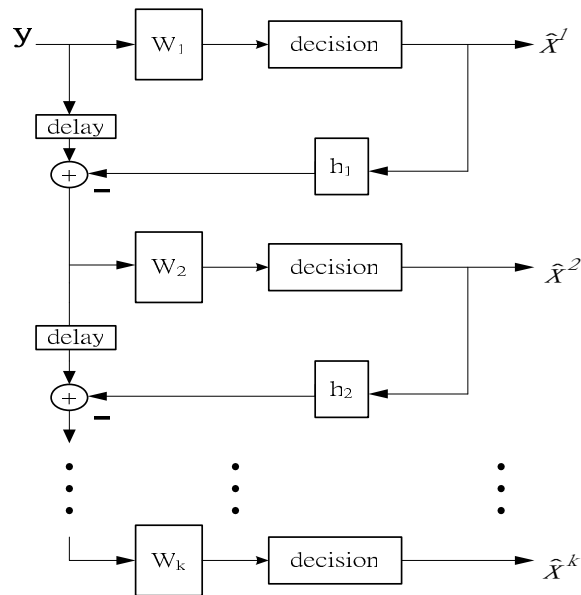


Figure II.9 : Nième étage d'un récepteur SIC

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

➤ La combinaison à erreur quadratique moyenne (MMSE)

Les techniques de détection Multi-Utilisateurs vues jusqu'à présent sont non linéaires. Il est toutes fois possibles d'utiliser une structure Multi-Utilisateur linéaire. Cette technique, qui a été appelée GMMSE « Global Minimum Mean Square Error », repose à nouveau sur l'application du filtrage de Wiener afin de réaliser un compromis entre la minimisation du terme d'IAM et la maximisation du rapport signal sur bruit. Toutefois, l'objectif ici est de construire l'étage d'égalisation de telle manière qu'il permette de minimiser l'erreur quadratique moyenne, non pas entre la sous porteuse s_k émise et celle détectée en réception, notée \hat{s}_k , mais entre le symbole x_j transmis par l'utilisateur considéré et celui détecté, noté \hat{x}_j . C'est pourquoi cette technique Multi-Utilisateur peut être qualifiée de façon plus judicieuse de combinaison MMSE par utilisateur ou MMSE SD (Single user Detection). Présentée pour la première fois en 1999 pour la technique MC-CDMA [42].

Soit e_j l'erreur commise sur la détection du symbole x_j émis par l'utilisateur désiré j . L'expression de l'erreur quadratique moyenne (EQM) s'écrit :

$$E\left[|e_j|^2\right] = E\left[|x_j - \hat{x}_j|^2\right] \quad (\text{II.23})$$

Où \hat{x}_j est le symbole détecté

L'EQM est minimale lorsque l'estimée \hat{x}_j est optimale et notée $\hat{x}_{j,opt}$. Celle-ci est obtenue lorsque le signal r reçu sur N_p sous porteuses est pondéré par le filtre de Wiener, noté w_j qui est optimale vis-à-vis du RSB parmi les détecteurs linéaires pour la détection du symbole de l'utilisateur j considéré. L'expression de $\hat{x}_{j,opt}$ est alors donné par :

$$\hat{x}_{j,opt} = W_j^H r \quad (\text{II.24})$$

L'expression du vecteur de pondération est quant à elle donnée par :

$$W_j^T = \Gamma_{r,x_j}^T \Gamma_{r,r}^{-T} \quad (\text{II.25})$$

Où Γ_{r,x_j} est le vecteur d'intercorrélacion entre le vecteur reçu r et le symbole x_j à détecter et $\Gamma_{r,r}^{-T}$ est la transposée de l'inverse de la matrice de covariance des signaux reçus.

L'expression finale du vecteur de pondération donné dans l'équation précédente devient après simplification :

CHAPITRE 2 : Détection Multi-Utilisateurs d'un Signal MC-CDMA

$$W_j^T = E_x c_j^T H^* (H C \Gamma_{x,x} C^T H^* + \Gamma_{n,n})^{-1} \quad (\text{II.26})$$

Nous remarquons dans l'expression ci-dessus la présence de la séquence d'étalement c_j propre à l'utilisateur j .

Nous donnons ci après la simulation du détecteur multiutilisateur dans le cas du détecteur conventionnel et le MMSE dans un canal AWGN et Rayleigh respectivement.

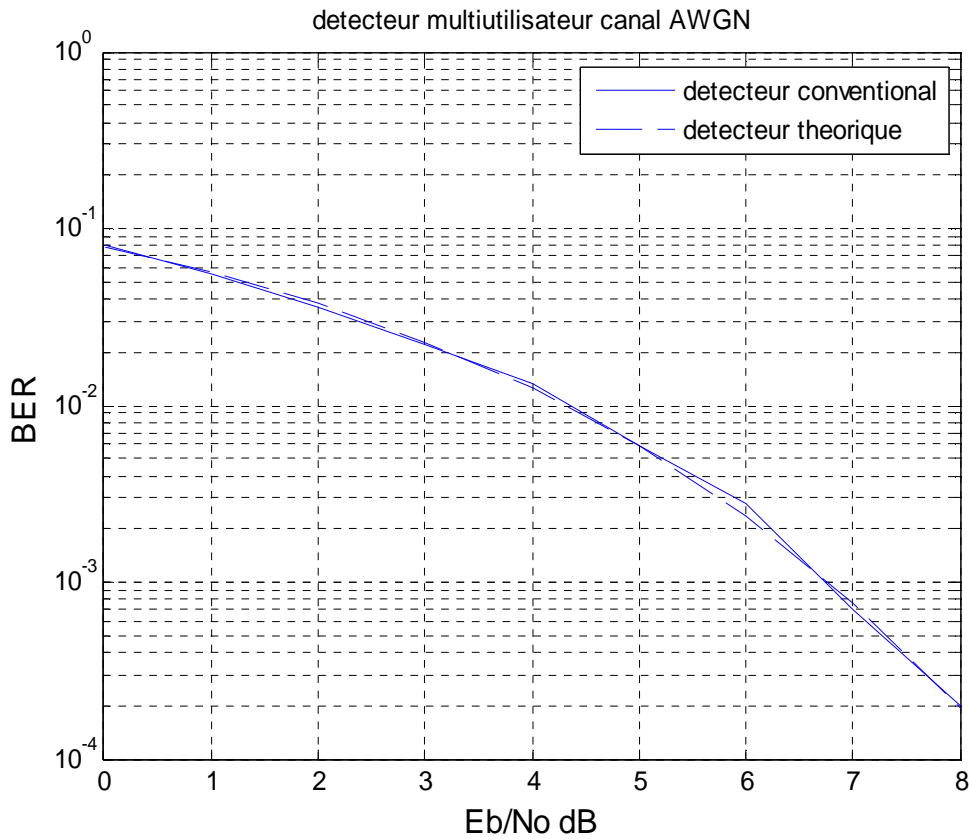


Figure II.10 : Détection multi utilisateur dans un canal AWGN avec le détecteur conventionnel Système MC-CDMA pour 4 utilisateurs

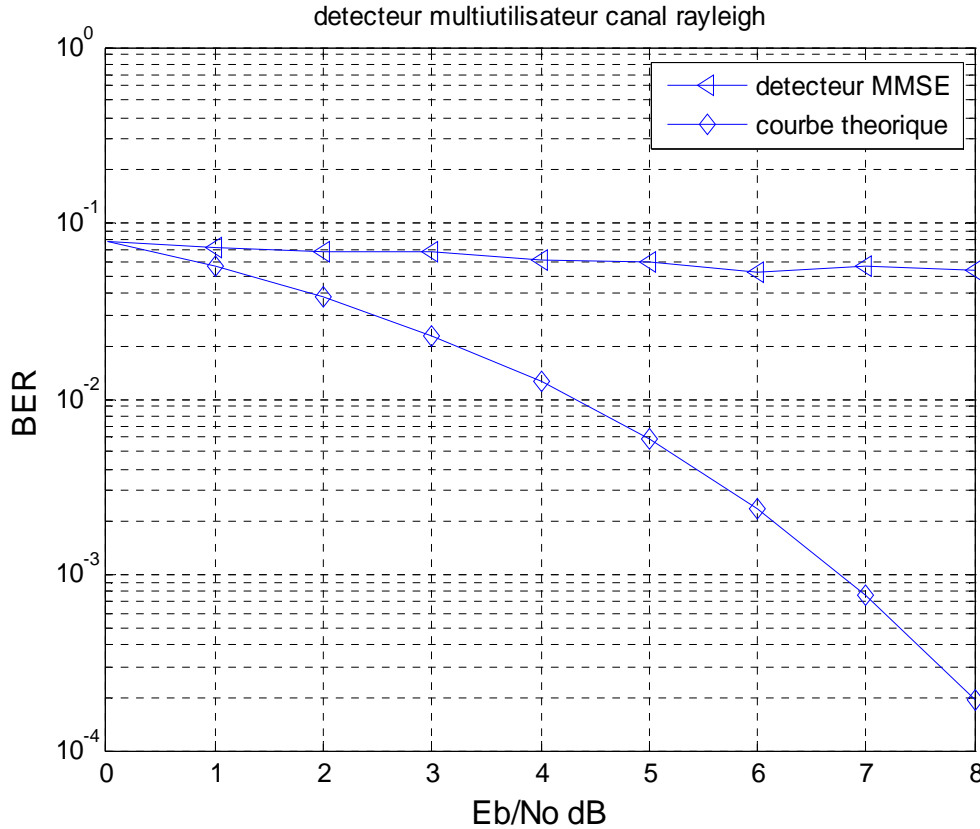


Figure II.11 : Détection multi utilisateur dans un canal de Rayleigh avec MMSE
Système MC-CDMA pour 4 utilisateurs

Lorsque nous avons un canal de Rayleigh la performance du récepteur MMSE se trouve dégradé à cause de la forte influence du canal.

II. 6 Conclusion

Nous avons proposé dans cette partie une étude sur les techniques de détection Mono-utilisateurs et Multi-Utilisateurs dans le contexte d'un accès en MC-CDMA sur canal AWGN et Rayleigh. Nous avons présenté quelques simulations de détection surtout avec la technique MMSE qui présente une certaine efficacité par rapport aux autres méthodes classiquement utilisées. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter l'apport des réseaux adaptatifs d'antennes dans la détection toujours pour un système MC-CDMA.