

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'étude

Filière : Électronique
Spécialité : Systèmes des télécommunications
Présenté par :

Aouaoucha Bouchra Amina

Pour l'obtention du diplôme de Master

Codage et Modulation Adaptatif

AMC

Proposé par : Dr. Anou Abderrahmane

Année Universitaire 2023/2024

Remercîment

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, pour sa supervision exceptionnelle, ses conseils avisés et son soutien continu tout au long de ce travail. Son expérience et sa patience ont été inestimables et ont grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble du corps professoral de l'Université de Blida 1, dont les enseignements et les encouragements ont été une source d'inspiration constante.

Je remercie également ma famille pour son amour et son soutien indéfectibles. Leur confiance en moi m'a donné la force de persévérer dans les moments difficiles.

Finalement, je ne peux qu'adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à la préparation de cette thèse.

Merci à tous.



إهداء

بعد مسيرة دراسية حملت في طياتها التعب والفرح ها انا اليوم أقف على عتبت
تخرجي فالحمد لله على فرصة البدايات وبلوغ النهايات.

أهدي نجاحي إلى من أحمل اسمه بكل فخر، إلى من سعى طوال حياته لنكون

أفضل منه، إلى من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل أبي الغالي

إلى التي ساندتني وألهمتني لمواصلة مسيرتي وسهلت لي الشدائد بدعائها، إلى

السراج الذي أثار لي الطريق أُمي الغالية حفظها الله إلى خيرة أيامي وصفوتها إلى من

كانوا لي سنداً ودعماً إلى من غمروني بالحب والتوجيه إلى الذين لظالمًا كانوا الظل لهذا

النجاح أخواتي.



ملخص:

لهذه الدراسة أهمية كبيرة في مجال نظرية المعلومات والاتصالات اللاسلكية. يركز البحث على تحسين جودة الاتصالات من خلال تطبيق تقنيات التشفير والتعديل التكيفية. تم استخدام عمليات المحاكاة لتقييم وتحسين أداء القناة اللاسلكية. ويعكس هذا العمل الجهود المبذولة لتطوير أنظمة الاتصالات الحديثة.

كلمات المفاتيح: AMC ; SNR ; BER.

Résumé : Cette étude revêt une importance majeure dans le domaine de la théorie de l'information et des communications sans fil. La recherche se concentre sur l'amélioration de la qualité des communications en appliquant des techniques de codage et de modulation adaptatives. Des simulations ont été utilisées pour évaluer et améliorer les performances du canal sans fil. Ce travail reflète les efforts déployés pour le développement des systèmes de communication modernes.

Mots clés : AMC ; SNR ; BER.

Abstract:

This study is of major importance in the field of information theory and wireless communications. The research focuses on improving the quality of communications by applying adaptive coding and modulation techniques. Simulations have been used to evaluate and improve the performance of the wireless channel. This work reflects the efforts made for the development of modern communication systems.

Keywords : AMC ; SNR ; BER.

Listes des acronymes et abréviations

AMC	Adaptive Modulation and Coding
ARQ	Automatic Repeat Request
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BCH	Bose-Chaudhuri-Hocquenghem
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CC	Convolutional Coding
CSI	Channel State Information
DFT	Discrete Fourier Transform
FEC	Forward Error Correction
FI	Intermediate Frequency
GI	Guard Interval
LMMSE	Linear Minimum Mean Square Error
LMS	Least Mean Squares
LS	Least Squares
MCS	Modulation and Coding Scheme
MSE	Mean Square Error
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RS	Reed-Solomon
SNR	Signal to Noise Ratio

Liste Des Figures

Figure 1. 1: Chaîne de transmission numérique.....	6
Figure 1. 2: Constellations modulation BPSK.....	9
Figure 1. 3: Constellations modulation QPSK.....	10
Figure 1. 4: Constellations modulation 16QAM.....	11
Figure 1. 5: Schéma simple de transmission sur canal bruité.....	15
Figure 1. 6 : la grande famille de codage.....	16
Figure 1. 7: Stratégies de protection contre les erreurs de transmission.....	16
Figure 2. 1: Méthode d'utilisation d'un codage adaptatif AMC.....	25
Figure 2. 2: TEB en fonction du SNR et seuils correspondants aux N codages et modulations utilisées par la méthode AMC.....	34
Figure 2. 3 : Diagramme de blocs de la modulation et du codage adaptatif.....	35
Figure 3. 1: Estimation du canal à l'aide de l'algorithme LS (Partie réelle du canal).....	40
Figure 3. 2: Estimation du canal à l'aide de l'algorithme LS (Partie imaginaire du canal).....	41
Figure 3. 3: Estimation du canal à l'aide de l'algorithme LMS (Partie réelle du canal).....	42
Figure 3. 4 : Estimation du canal à l'aide de l'algorithme LMS (Partie imaginaire du canal).....	42
Figure 3. 5: Débit des schémas AMC pour LS.....	44
Figure 3. 6: Débit des schémas AMC pour LMS.....	45
Figure 3. 7: l'efficacité spectrale par AMC-LS et AMC-LMS.....	46
Figure 3. 8: Comparaison des performances en termes de TEB par AMC-LS et AMC-LMS.....	47

Liste Des Tableaux

<i>Tableau 2. 1: Schémas de modulation et de codage (MCS).....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 3. 1: Paramètres du système.....</i>	<i>35</i>

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 Généralité sur la théorie de l'information.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Notion de message numérique.....	3
1.3 Théorie de l'information – Théorème de Shannon.....	4
1.4 Chaîne de transmission	5
1.4.1 La source de messages	6
1.4.2 Codage de source.....	6
1.4.3 Codage canal	7
1.4.4 Modulation	8
1.4.5 Le canal de transmission.....	11
1.4.6 Démodulation	11
1.4.7 Le décodeur canal.....	12
1.4.8 Le décodage source	12
1.5 Critère de choix entre les techniques de transmission	12
1.6. Codes Correcteurs d'erreurs.....	14
1.6.1 Classification des codes Correcteurs.....	15
1.6.2 Utilisation des codes Correcteurs.....	16
1.6.3 Méthode de correction des erreurs de transmission.....	16
1.6.4 Mesure des performances des codes correcteurs d'erreurs	18
1.6.5 Avantages et inconvénients	19
1.7. Conclusion.....	20
Chapitre 2 Technique de modulation et codage adaptatif AMC	21

2.1 Introduction	23
2.2 Concept de la modulation et le codage adaptatif AMC	23
2.3 Principe de la technique AMC	25
2.4 Performances du système AMC	26
2.4.1 Estimation de la qualité du canal	26
2.4.1 Modification des paramètres	33
2.4.2 Mécanisme de rétroaction	34
2.5 Les avantages et défis et considérations de déploiement d'AMC	35
2.5.1 Les avantages	35
2.5.2 Défis et considérations de déploiement	37
2.6 Conclusion.....	38
Chapitre 3 Simulation	39
3.1 Introduction	39
3.2 Langage utilisé	39
3.3 Objectif	39
3.4 Simulation et commentaire	40
3.4.1 Estimation d'un canal mobile avec bruit blanc à l'aide de l'algorithme des moindres carrés (LS)	40
3.4.2 Estimation d'un canal mobile avec bruit blanc à l'aide de l'algorithme LMS (Moins carrés moyens)	42
3.4.3 Les performances de débit du système AMC à l'aide de différentes l'algorithme.....	44
3.4.5 Comparaison de l'efficacité spectrale d'un canal mobile avec bruit blanc par AMC-LS et AMC-LMS	46

3.4.6 Comparaison des performances en termes de TEB d'un canal mobile avec bruit blanc par AMC-LS et AMC-LMS.....	47
3.5 Conclusion.....	47
Conclusion générale.....	48
Bibliographies.....	49

Introduction générale

Dans le domaine de la communication numérique, la transmission efficace des données est un défi permanent, confrontée à des obstacles tels que les variations imprévisibles du canal de transmission. Ces variations, causées par des facteurs comme l'interférence, le bruit et l'affaiblissement du signal, dégradent la qualité de la transmission et exigent des systèmes de communication une adaptation dynamique et intelligente.

C'est dans ce contexte que le codage et la modulation adaptatifs (AMC) émergent comme une solution prometteuse. L'AMC s'impose comme une approche sophistiquée visant à optimiser la qualité de la transmission en ajustant dynamiquement les paramètres de modulation et de codage en fonction des caractéristiques du canal. En essence, l'AMC permet à un système de transmission de s'auto-optimiser pour maintenir des performances de communication optimales, même face à des conditions de canal variables et imprévisibles.

Au cœur de l'AMC réside sa capacité à surveiller en temps réel les conditions du canal et à prendre des décisions adaptatives en conséquence. Lorsque le canal présente des signes de dégradation, tels qu'une baisse du rapport signal sur bruit (SNR) en dessous d'un seuil critique, le système de transmission AMC réagit en ajustant la modulation et le codage du signal pour compenser les effets néfastes du canal.

Un élément clé de l'AMC réside dans l'utilisation de techniques de modulation et de codage flexibles et adaptatives. Le choix de la modulation peut varier en fonction de la qualité du canal, allant des modulations plus simples comme la BPSK (Binary Phase Shift Keying) aux modulations plus complexes comme la QAM (Quadrature Amplitude Modulation). De même, différents codes correcteurs d'erreurs peuvent être sélectionnés en fonction des besoins de correction d'erreurs.

Mon mémoire s'attache à explorer le concept de codage et de modulation adaptatifs (AMC) dans un système de transmission émetteur-récepteur dans le but d'atteindre un débit de transmission très élevé. Ce mémoire s'organise en trois chapitres distincts.

Chapitre 1 : Ce chapitre rappelle les concepts de base et les définitions essentielles de la théorie de l'information, offrant ainsi un socle solide pour comprendre les principes de l'AMC.

Chapitre 2 : Ce chapitre explore en profondeur le concept de la technique de modulation et codage adaptatifs (AMC), en mettant l'accent sur ses principes de base et les différentes techniques de modulation AMC.

Chapitre 3 : Ce chapitre se concentre sur une simulation visant à estimer le canal mobile à bruit blanc, une étape cruciale pour améliorer la qualité des communications sans fil.

Chapitre 1

Généralité sur la théorie de l'information

1.1 Introduction

À l'ère du numérique, les flux d'informations sont omniprésents. Cette réalité souligne l'importance fondamentale de la capacité à les transmettre de manière efficace. C'est dans ce contexte que la théorie de l'information s'impose comme un champ crucial, fournissant une approche rigoureuse pour comprendre les défis et les opportunités liés à la transmission d'informations à travers divers moyens de communication.

Fondée sur les recherches pionnières de Claude Shannon dans les années 1940, la théorie de l'information s'apparente à un langage universel pour quantifier l'information. Elle s'intéresse aux aspects fondamentaux de la communication, tels que la mesure de la quantité d'information, la compression des données et la lutte contre le bruit.

Ce chapitre a pour objectif de nous guider à travers les concepts fondamentaux de la théorie de l'information. Nous découvrirons les notions d'entropie, d'information mutuelle et de capacité du canal, des outils essentiels pour comprendre les mécanismes sous-jacents à la transmission de données.

1.2 Notion de message numérique

Un message numérique est une séquence d'éléments qui peuvent prendre l'une des q valeurs possibles. L'ensemble de ces valeurs est appelé "alphabet". Les éléments, qui peuvent également être considérés comme des variables aléatoires discrètes, sont qualifiés de q – aires.

Dans le cas particulier et fréquent où l'alphabet est constitué uniquement de deux valeurs, notées traditionnellement 0 et 1, les éléments sont dits binaires. La représentation d'un élément dans un message q – aire peut être exprimée sous forme d'une séquence binaire, ce qui explique l'importance du système binaire. Un texte est un exemple de message numérique, car il est composé de caractères provenant d'un alphabet fini.

Par conséquent, une source discrète est créée selon les principes de la théorie de l'information. Maintenant que nous avons clarifié le concept de message numérique, nous pouvons aborder la présentation d'une chaîne de transmission numérique [1].

1.3 Théorie de l'information – Théorème de Shannon

Dans les systèmes de communication numérique, les informations sont transmises de la source au récepteur à travers un canal de transmission où elles sont représentées par des séquences de symboles binaires. Ce mode de transmission permet l'utilisation de diverses techniques de traitement de l'information telles que la compression, le cryptage et la correction d'erreurs.

Les perturbations sur le canal peuvent causer des erreurs de transmission, que le codage de canal tente de minimiser en ajoutant de la redondance aux données pour suivre une loi définie. Un canal de transmission est défini comme un système physique permettant le transfert d'information entre des points distants, et le taux d'erreur binaire (BER) mesure le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total de bits transmis.

En 1948, Shannon a énoncé dans "A Mathematical Theory of Information" le théorème fondamental de la théorie de l'information : il établit que des probabilités d'erreur de décodage faibles peuvent être obtenues à tout débit de transmission R inférieur à la capacité du canal C ($R < C$), en utilisant des longueurs de blocs importantes.

Shannon a démontré que les performances moyennes d'un ensemble de codes choisis aléatoirement conduisent à une réduction significative de la probabilité d'erreur de décodage à mesure que la longueur des blocs augmente.

Shannon a démontré que pour un canal à bruit blanc et gaussien, on peut exprimer sa capacité comme suit :

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ (bits/symbols)} \quad (1.1)$$

Avec :

- C : Capacité du canal en bits par seconde (bits/s)
- W : Largeur de bande du signal (Hz).
- S : Puissance moyenne reçue (Watt)

- N : Puissance moyenne du bruit reçu (Watt) dans la bande W

En d'autres termes, il est possible d'obtenir des transmissions extrêmement fiables en utilisant des codes de taux inférieurs à la capacité du canal. Cependant, ce théorème ne donne pas de directives sur la manière de créer de tels codes [2].

1.4 Chaîne de transmission

La chaîne de transmission (illustrée dans la figure 1.1) peut être divisée en trois blocs distincts :

- L'émetteur : dont la fonction est de générer un signal correspondant au message et adapté au canal de transmission.
- Le canal : qui peut prendre différentes formes telles que des lignes, des câbles coaxiaux, des guides d'ondes, des fibres optiques, de la lumière infrarouge, des canaux hertziens, etc.
- Le récepteur : chargé de reconstruire le message à partir du signal reçu après sa propagation dans le canal.

Pour transmettre l'information, l'émetteur associe le message numérique à une grandeur physique, en ajustant celle-ci en fonction du milieu de transmission. Le récepteur effectue ensuite l'opération inverse, reconstituant le message initial émis par la source à partir du signal reçu. Le milieu de transmission représente l'espace physique situé entre l'émetteur et le récepteur [3]. Cette notion est illustrée par la figure 1.1, qui met en évidence les différents blocs composant la chaîne de transmission numérique.

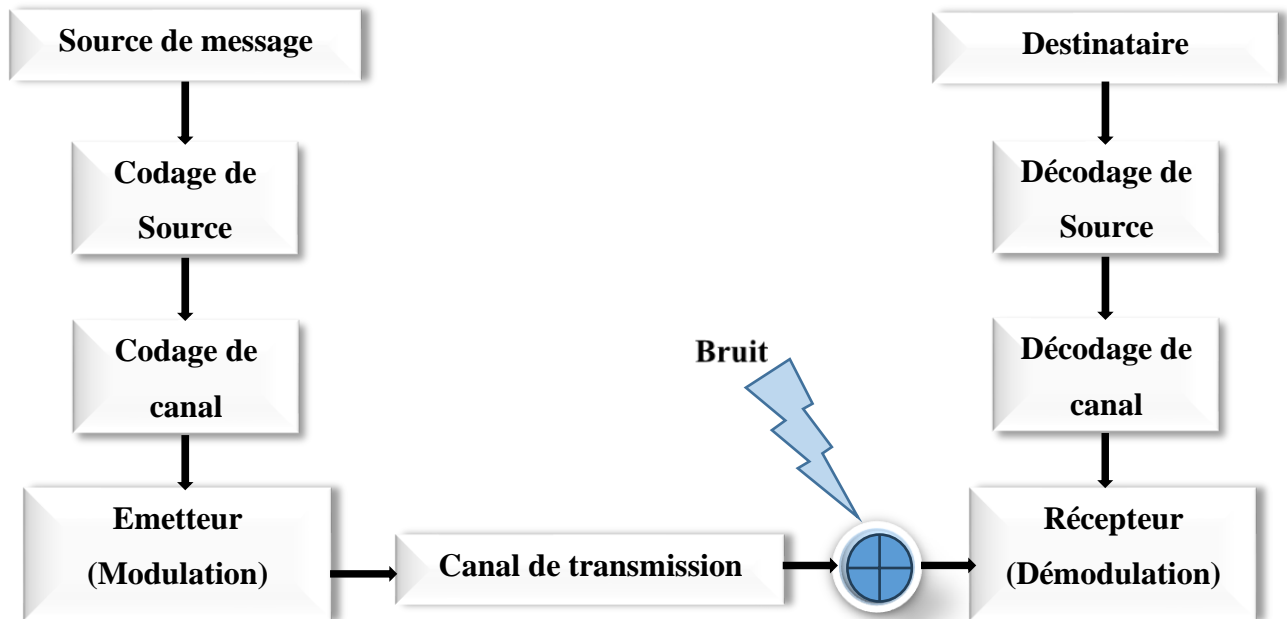


Figure 1. 1: Chaîne de transmission numérique

1.4.1 La source de messages

Dans une transmission numérique, le message à envoyer doit être converti en format numérique. Si le signal à transmettre est analogique (comme la parole ou une image), il doit être converti en format numérique à travers un processus de numérisation. Cette opération de numérisation comprend trois étapes principales : l'échantillonnage, la quantification et le codage [4].

1.4.2 Codage de source

Dans le cadre de la transmission numérique, les messages à envoyer doivent être présentés sous forme numérique, ce qui signifie qu'ils sont représentés par une série de symboles discrets prenant des valeurs dans un ensemble fini. Si les messages sont initialement analogiques, ils doivent être convertis en format numérique. Lorsque les messages sont binaires, la source est composée d'éléments binaires indépendants et distribués de manière identique sur l'alphabet $\{0,1\}$ avec des probabilités p_0 et p_1 [5].

Le débit binaire D qui représente le nombre d'éléments binaires émis par unité de temps est défini par :

$$D = \frac{1}{T_b} (\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (1.2)$$

- L'unité de débit binaire D est le bit par seconde.
- La rapidité de modulation R (exprimée en Bauds) est définie comme le nombre de signaux émis par le modulateur par unité de temps :

$$R = \frac{1}{T} (\text{bauds}) \quad (1.3)$$

- Où T représente la durée du signal.

La rapidité de modulation R peut s'exprimer en fonction du débit binaire D par la relation suivante :

$$R = \frac{D}{\log_2 M} \quad (1.4)$$

1.4.3 Codage canal

Le codage canal joue un rôle crucial dans la protection des informations émises contre les perturbations susceptibles d'altérer leur contenu pendant la transmission à travers le canal. Son objectif est d'ajouter une redondance afin de détecter et éventuellement corriger les erreurs lors de la réception, selon la stratégie adoptée. La transformation de l'information $D(x)$ provenant du codage source en une séquence codée $C(x)$ est essentielle. Conformément au théorème fondamental du codage canal, pour s'approcher de la capacité du canal de transmission, il est impératif de coder l'information avant de la transmettre. Les opérations de codage de canal sont conçues pour préparer le signal avant son émission, notamment par la dispersion d'énergie (brassage), le codage correcteur d'erreur et l'entrelacement. Les signaux codés, issus de divers composants tels que le son, les données et les images de plusieurs programmes, sont ensuite multiplexés. Le signal binaire résultant transporte toutes les informations de synchronisation des différentes composantes des programmes. L'entrelacement vise à rendre le signal aussi aléatoire que

possible pour éviter les longues séquences de "zéros" ou de "uns", qui créent des pics énergétiques dans le spectre.

Pour le codage correcteur d'erreur, différents algorithmes sont disponibles selon l'application, parmi lesquels le codage RS (Reed-Solomon) et le codage CC (codage convolutif) [6].

1.4.4 Modulation

Le message numérique issu du codeur canal, étant une séquence d'éléments binaires abstraits, nécessite d'être associé à une représentation physique sous forme d'un signal électrique pour être transmis. Cette tâche, généralement effectuée par l'émetteur, est connue sous le nom d'opération de modulation. La modulation implique l'association de chaque mot de n éléments binaires du message à un signal $s_i(t)$, $i = 1 \dots, M = 2^n$ de durée $T = nT_b$.

Le choix des signaux dépend des caractéristiques physiques du milieu de transmission. L'émetteur assure également l'adaptation du signal modulé à ce milieu.

Parmi les autres traitements réalisés par l'émetteur, on trouve le filtrage du signal modulé pour limiter sa bande passante. Lorsque la bande allouée à la transmission est centrée autour d'une fréquence élevée, le modulateur peut générer un signal dont le spectre est centré autour d'une fréquence intermédiaire plus basse, suivi d'un changement de fréquence par l'émetteur pour recentrer le signal modulé autour de la fréquence désirée.

La conversion numérique/analogique peut être effectuée au sein des traitements gérés par l'émetteur, bien que la tendance actuelle soit de retarder cette étape autant que possible.

De nombreux systèmes réalisent désormais la modulation numérique jusqu'à la fréquence intermédiaire. Les dernières étapes du traitement de l'émetteur incluent généralement un dernier filtrage d'émission (analogique à la fréquence finale) et l'amplification, où un modèle équivalent peut être développé [7].

1.4.4.1 Les types de modulations

Nous allons maintenant présenter les types de modulation les plus répandus, en utilisant les modulations suivantes [8] :

► La modulation numérique BPSK

La modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) consiste à moduler la phase de la fréquence intermédiaire (FI) avec un signal numérique sérialisé qui présente deux états.

En substance, il s'agit d'une modulation d'amplitude sans porteuse, utilisant un signal modulant à deux niveaux. Initialement, il n'y a pas de corrélation évidente entre la phase et la fréquence de la FI et le signal modulant. Ainsi, pour aligner ces signaux, on les synchronise par le biais d'une simple bascule D après avoir centré le signal sur 0V par une translation de niveau. Ensuite, le signal modulant synchronisé et la FI sont combinés via un multiplicateur.

Ce processus permet de générer un signal modulé présentant deux états de phase, 0 et π avec les changements de phase se produisant au passage à zéro de la FI. Cette synchronisation contribue à adoucir les transitions spectrales. En l'absence de synchronisation préalable, les changements de phase se produiraient de manière aléatoire par rapport au signal porteur, ce qui compliquerait l'observation à l'oscilloscope. Cependant, d'un point de vue fonctionnel, cette synchronisation n'est pas nécessaire.

Dans la constellation, seuls deux points sont présents : l'un à 0° correspondant au niveau logique 1, et l'autre à 180° correspondant au niveau logique 0.

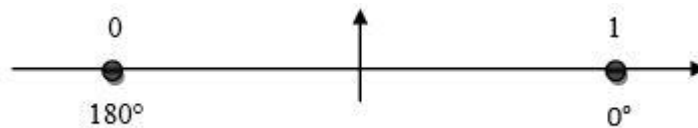


Figure 1. 2: Constellations modulation BPSK

➤ La modulation numérique QPSK

À partir d'un oscillateur local à la fréquence quadruple, deux signaux FI en quadrature sont générés. Le train de données binaires est ensuite divisé en deux sous-ensembles, appelés le composant cosinus (I ou In-phase) et le composant sinus (Q ou Quadrature). Chaque paire de valeurs, ou doublet forme un symbole. Pour des raisons électroniques, les signaux I et Q sont centrés sur 0V, ce qui permet de les considérer symboliquement comme prenant deux niveaux, +1 et -1, correspondant aux états binaires.

Les états de phase du signal modulé sont représentés en coordonnées polaires dans le plan I, Q. En fonction des combinaisons de valeurs de I et Q, un schéma appelé constellation est obtenu.

Le diagramme ci-dessous illustre les constellations de la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

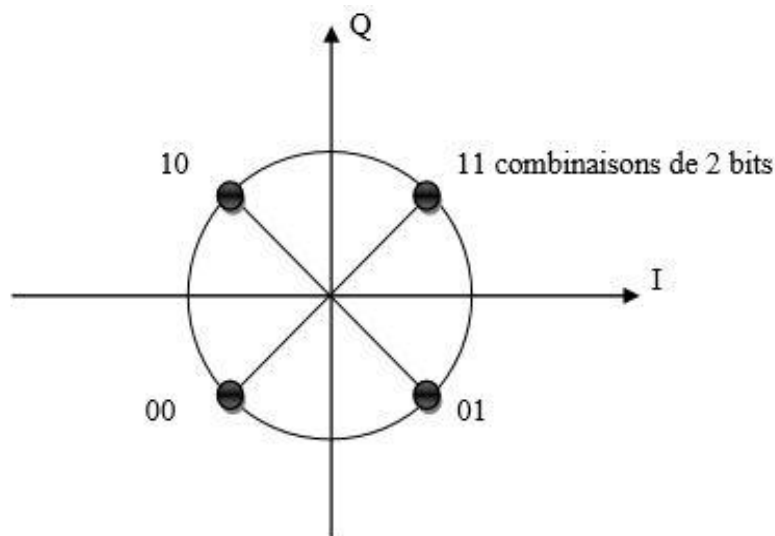


Figure 1. 3: Constellations modulation QPSK

➤ La modulation numérique 16QAM

Après avoir atteint 4 niveaux, la valeur de I peut adopter l'une des 4 amplitudes disponibles, de même pour la valeur de Q. Dans le cas de la modulation 16QAM, cela nous permet de transmettre 2 bits sur I et 2 bits sur Q, ce qui totalise 4 bits par symbole.

Chaque niveau de tension pour I et Q comprend donc 4 valeurs possibles, ce qui donne une constellation de 16 points. Avec ces 16 symboles distincts, il devient possible de transmettre 4 bits, soit 2^4 , grâce à la modulation 16QAM.

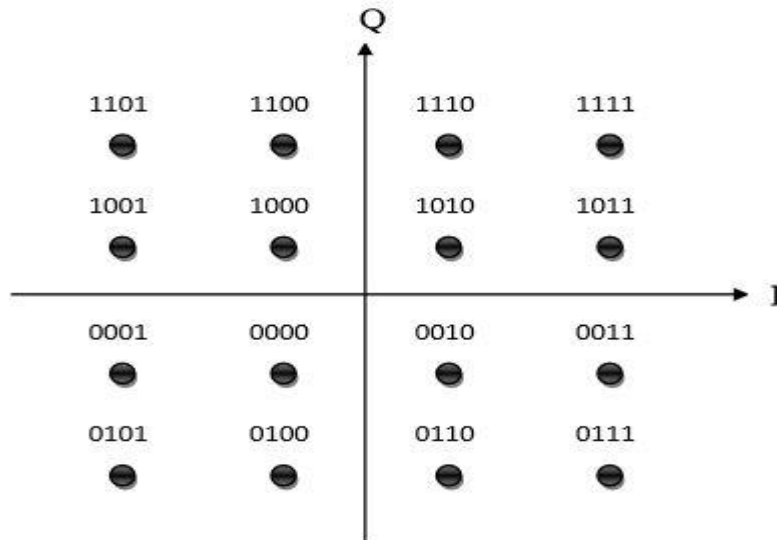


Figure 1. 4: Constellations modulation 16QAM

1.4.5 Le canal de transmission

Un canal de transmission est un médium physique permettant de transmettre des informations d'un expéditeur à un destinataire, dans le cas des communications sans fil, l'atmosphère est considérée comme le canal de propagation. Le travail d'un système de transmission sans fil est de convertir un signal électrique émis en un signal électrique reçu via des ondes électromagnétiques. Par contre, quels que soient les moyens physiques utilisés, le signal transmis est indubitablement altéré par diverses perturbations de nature aléatoires et imprévisibles [9].

1.4.6 Démodulation

Le processus de démodulation implique l'utilisation d'un démodulateur de signal, en se basant sur l'observation du signal bruité, doit déterminer quel message a été émis. La méthode de détection dépend à la fois des techniques de mise en forme du signal utilisées et des caractéristiques du canal de communication.

La démodulation permet de récupérer chaque symbole émis à partir de chaque signal modulé reçu sur une durée donnée, représentée par τ_m . En fournissant une tension continue ou un symbole binaire en sortie, lorsque celle-ci est quantifiée, le démodulateur accomplit sa tâche [3].

1.4.7 Le décodeur canal

Le décodage canal vise à récupérer l'information binaire utile codée lors de la transmission. Le processus de codage renforce la fiabilité de la transmission en ajoutant des bits de parité qui peuvent corriger les éventuelles erreurs de transmission causées par la dégradation du canal. Ainsi, plusieurs algorithmes de décodage sont disponibles. Une classification courante distingue les algorithmes algébriques des algorithmes probabilistes. Les algorithmes algébriques exploitent les propriétés mathématiques des codes, utilisant par exemple la résolution d'équations pour le décodage. Quant aux algorithmes probabilistes, l'algorithme de Viterbi se distingue en étant largement utilisé pour décoder les codes convolutifs [10].

1.4.8 Le décodage source

Le décodage de source implique la reconstruction de l'information originale à partir de la séquence reçue en utilisant l'algorithme spécifique de décodage de source.

1.5 Critère de choix entre les techniques de transmission

Les caractéristiques principales permettant de comparer entre les différentes techniques de transmission sont les suivantes [11] :

- **Le taux d'erreur binaire (TEB)**

L'acronyme BER, ou TEB pour Taux d'Erreur Binaire, est utilisé pour évaluer la qualité d'un système de transmission. Il dépend de la technique de transmission et du canal de transmission utilisés, et il représente le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total de bits émis. Cet indicateur est particulièrement adapté pour évaluer

l'efficacité des algorithmes de transmission, car il vise à minimiser les erreurs tout en maximisant la quantité d'information transmise. Bien que le BER ne soit jamais strictement nul, une valeur suffisamment faible peut garantir une qualité de transmission satisfaisante, répondant ainsi à des critères de fidélité.

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bit émis}} \quad (1.5)$$

- **Erreur quadratique moyenne (EQM)**

Le MSE, abréviation de Mean Square Error, est un indicateur couramment utilisé pour évaluer les performances. Il calcule la moyenne des écarts quadratiques entre les symboles émis et les symboles estimés. Minimiser cette erreur quadratique est avantageux, car c'est une fonction quadratique simple à dériver. Naturellement, une faible valeur de l'erreur quadratique moyenne indique une meilleure estimation.

- **L'occupation spectrale**

La connaissance de l'occupation spectrale du signal émis est essentielle pour optimiser l'utilisation de la bande passante du canal de transmission. Les diverses techniques de modulation se distinguent par leurs niveaux d'efficacité en termes d'occupation spectrale et de puissance émise requise pour atteindre un certain niveau de probabilité d'erreur. En général, l'objectif est de réduire au minimum la probabilité d'erreur dans des conditions de transmission spécifiques.

- **Le rapport signal sur bruit (RSB)**

Le SNR, abréviation de Signal to Noise Ratio, est largement utilisé dans les systèmes de transmission numérique pour évaluer la qualité du signal reçu. Il représente la sensibilité du récepteur aux perturbations rencontrées lors de la transmission du signal à travers le canal. Le SNR est défini comme le rapport entre le signal et le bruit :

$$\frac{E_b}{N} \quad (1.6)$$

Avec :

- N_0 : La densité spectrale de puissance du bruit blanc en entrée du récepteur

- E_b : est l'énergie moyenne par bit du signal modulé.

Effectivement, lorsque le rapport signal à bruit est faible, le signal est davantage altéré par le bruit, ce qui rend plus ardue la tâche de réduire l'impact du bruit sur le signal. Il est donc essentiel de maintenir un rapport signal à bruit élevé afin de garantir que le signal reçu demeure fidèle à la transmission d'origine.

- **La complexité du récepteur**

La restitution du signal émis constitue le dernier élément crucial d'un système de transmission. Les progrès fulgurants dans le domaine des circuits intégrés de traitement des signaux ont largement contribué au développement des transmissions numériques. Avec la croissance de la complexité des systèmes et la baisse des prix pour le consommateur, l'adoption de solutions intégrées devient de plus en plus indispensable.

1.6. Codes Correcteurs d'erreurs

Après la publication de l'article "A Mathematical Theory of Communication" par Claude Shannon en 1948, le domaine de la théorie du codage est né. Dans cet article, Shannon a établi les limites du taux de communication sur des canaux bruyants, ce qui est également connu sous le nom de théorème de codage du canal bruyant. Fondamentalement, ce théorème indique qu'une communication à un débit R est réalisable avec une probabilité d'erreur très faible si R est inférieur à la capacité du canal C .

En d'autres termes, il existe des codes correcteurs d'erreurs efficaces pour de tels cas. À l'inverse, si R dépasse C , une transmission sans erreurs n'est pas possible. La figure 1.5 illustre un schéma de cette transmission.

Cependant, la démonstration du théorème de Shannon n'est pas constructive, donc elle ne fournit pas de guide pour la conception de ces "bons" codes correcteurs d'erreurs. La correction d'erreurs directe, ou codage de canal est une sous-discipline de la théorie du codage qui se concentre sur la recherche de tels codes.

L'idée principale est d'ajouter des informations redondantes au message transmis, de sorte que les erreurs de transmission puissent être corrigées à l'aide des données de parité ajoutées précédemment [12].

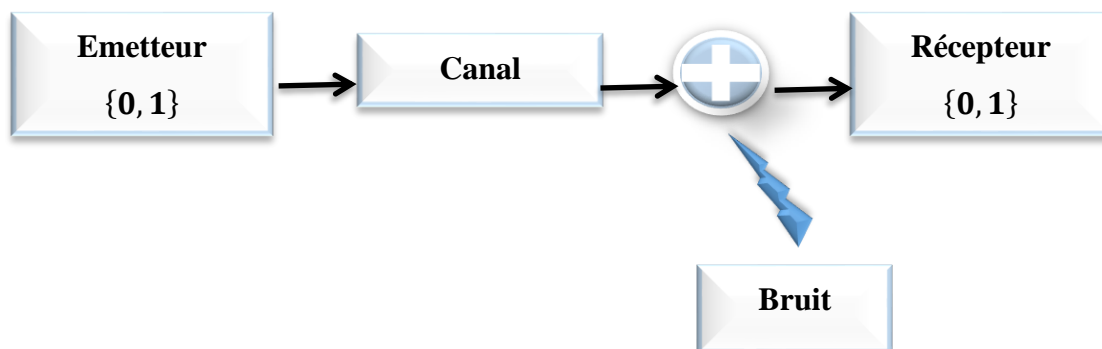


Figure 1. 5: Schéma simple de transmission sur canal bruité

1.6.1 Classification des codes Correcteurs

Les architectes de réseaux ont développé deux approches pour traiter les erreurs de transmission. La première implique l'ajout de redondance suffisante aux données pour que le récepteur puisse reconstruire les données originales à partir des données reçues.

La seconde consiste à incorporer juste assez de redondance pour permettre au récepteur de détecter les erreurs et de demander la retransmission des trames erronées.

La figure ci-dessous présente un aperçu des deux grandes familles de codes. Dans la première catégorie (à droite sur la figure), se trouvent les codes en blocs tels que les codes BCH, Reed Muller, Reed Solomon, Goppa, Golay et Hamming. La deuxième catégorie (à gauche sur la figure) comprend les codes en treillis, offrant une flexibilité accrue grâce au choix des paramètres et des algorithmes de décodage disponibles.

Par exemple, les codes convolutifs binaires systématiques récurrents, largement utilisés dans les modulations codées (TCM), et les codes concaténés parallèles (Turbo Codes) [3].

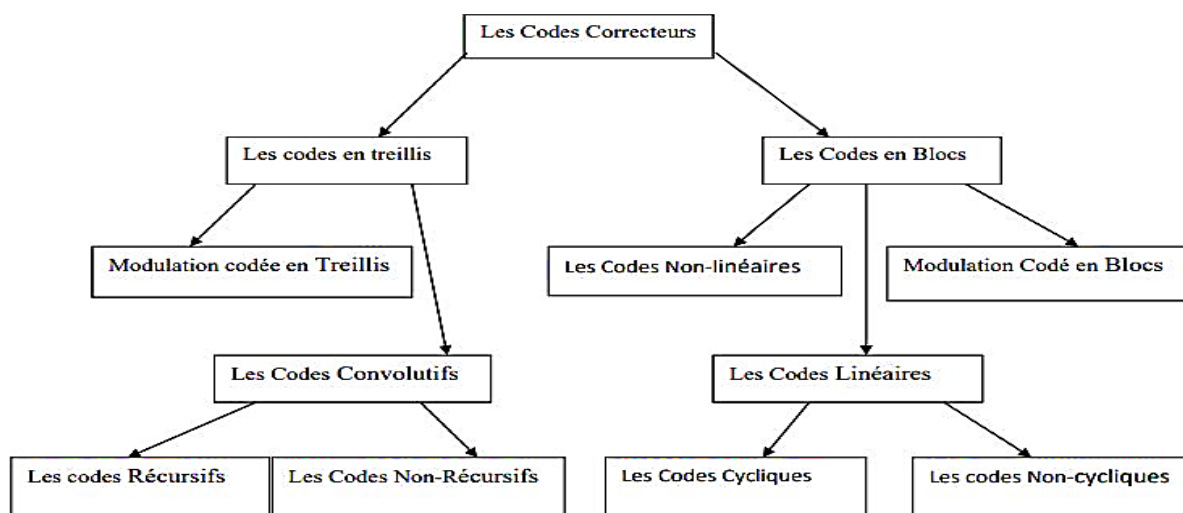


Figure 1. 6 : la grande famille de codage

1.6.2 Utilisation des codes Correcteurs

Les codes correcteurs d'erreurs sont employés dans divers domaines de transmission, tels que les communications par satellite, la téléphonie, les disques laser, la télévision haute définition, ainsi que dans le traitement d'images et de la parole, la cryptographie (pour les signatures et les cartes à puce), la compression de données, et bien d'autres applications encore [3].

1.6.3 Méthode de correction des erreurs de transmission

Ces bruits produisent un grand nombre d'erreurs groupées et pour cela des systèmes de détection et de correction d'erreurs ont été développés pour protéger l'intégrité de l'information binaire émise. Ces systèmes sont basés sur un codage supplémentaire de l'information.

On distingue deux stratégies en cas de détection d'erreurs par le récepteur :

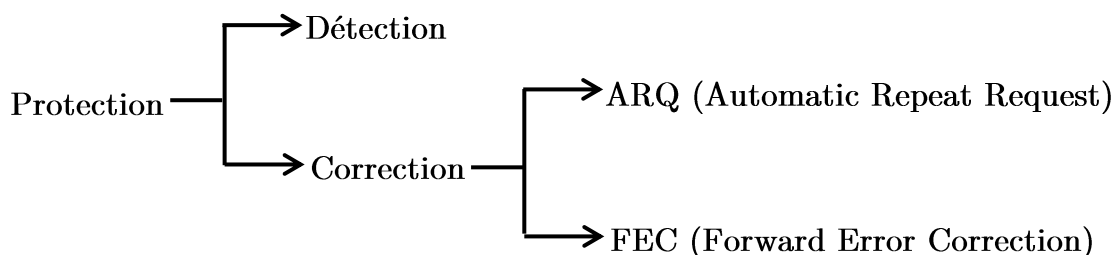


Figure 1. 7: Stratégies de protection contre les erreurs de transmission

- Soit une demande de réémission des bits erronés : c'est la stratégie ARQ (Automatic Repeat Request).
- Soit une correction par décodage canal, on parle de FEC (Forward Error Correction) [3].

1.6.3.1 Principe de l'ARQ

La méthode la plus courante pour gérer les erreurs dans les réseaux numériques consiste en la détection d'erreur suivie d'une retransmission. Les mécanismes d'accusé de réception permettent à l'émetteur de confirmer la réception sans erreurs des données transmises. Ces accusés de réception prennent généralement la forme de blocs de données spéciaux. L'émetteur prépare les trames en ajoutant des champs de supervision, d'adresse, de données et de détection d'erreur aux données, puis les transmet tout en conservant une copie en mémoire. Le récepteur renvoie des acquittements positifs ou négatifs. À chaque acquittement positif, le bloc de données correspondant est effacé, tandis qu'à chaque acquittement négatif, la trame qui n'a pas été correctement reçue est retransmise [13].

1.6.3.2 Principe de FEC

Le principe fondamental de la correction d'erreur directe (FEC) consiste à ajouter un certain nombre de bits de code à un signal d'utilisateur afin de diminuer la probabilité d'une erreur de bit lors de sa transmission. Pour encoder une séquence de signaux d'utilisateur de longueur k bits, il est nécessaire de trouver au moins 2^k codes distincts et orthogonaux - un mot de code distinct pour chaque combinaison de bits possible dans le signal d'origine.

La distance de Hamming (d) quantifie la différence de valeur entre les divers mots de code. Plus précisément, la distance de Hamming représente le nombre minimum de positions de bits par lesquelles les mots de code individuels se distinguent les uns des autres. Une grande distance de Hamming accroît la capacité du code à détecter et à corriger les erreurs induites par le bruit ou survenues pendant la transmission. Le nombre

maximal d'erreurs que peut corriger le code est limité à $\frac{d-1}{2}$. De même, le nombre maximum d'erreurs qu'il peut détecter est égal ou inférieur à d .

Il existe cinq types principaux de codes de correction d'erreurs vers l'avant [14]:

- Les codes en bloc (y compris les codes de Hamming).
- Les codes cycliques.
- Les codes BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem).
- Les codes de Reed-Solomon.
- Codes convolutifs (y compris les codes de Viterbi).

1.6.4 Mesure des performances des codes correcteurs d'erreurs

Le gain de codage désigne la différence d'énergie par bit utile entre deux systèmes, à un taux d'erreur donné (consultez la Figure 1.8). Lors de l'utilisation de techniques de codage avancées, la performance du code évolue généralement en trois étapes distinctes, comme illustré dans la Figure 1.8. La première étape correspond à une situation où le décodage ne converge pas à des rapports signal/bruit (SNR) faibles, ce qui entraîne une dégradation des performances par rapport à un système non codé ; cette phase est appelée la région de non-convergence. À partir d'un certain SNR, appelé seuil de convergence, le décodage entre dans une phase où la probabilité d'erreur diminue très rapidement avec l'augmentation du SNR, connue sous le nom de région du waterfall.

Enfin, il existe une région où la diminution de la probabilité d'erreur est moins rapide que dans la région du waterfall. Ce comportement est spécifique de la région du plancher d'erreur, également appelée error floor.

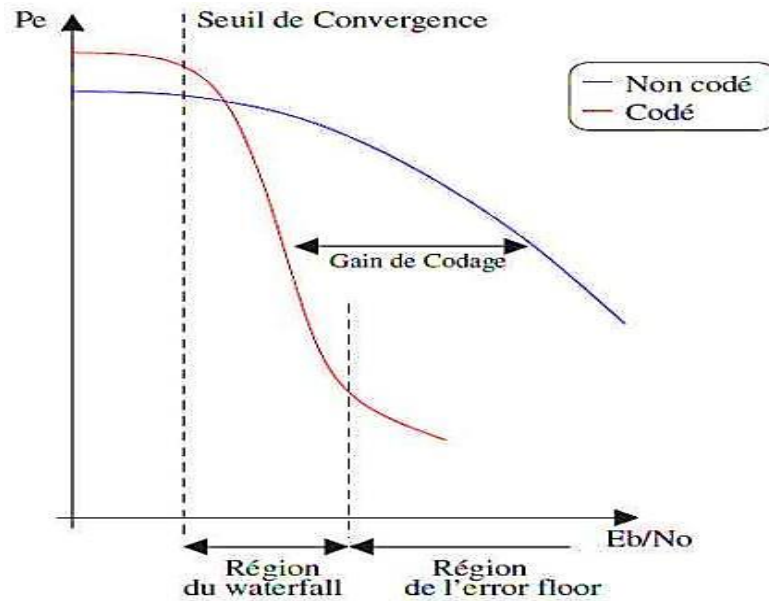


Figure 1. 8: Illustration des régions caractérisant les performances d'un code correcteur d'erreurs

Dans les systèmes de communication, l'évaluation des performances se fait généralement en utilisant le taux d'erreur binaire (BER, Bit Error Rate en anglais) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Toutefois, pour obtenir des résultats plus précis, surtout lors de la comparaison de codes avec des rendements différents, un autre critère est souvent utilisé, qui donne le BER en fonction de $\frac{E_s}{N_0}$ [15].

Où :

- E : représente l'énergie transmise dans un bit d'information.
- N_0 : désigne la densité spectrale du bruit.

1.6.5 Avantages et inconvénients

Les encodeurs correcteurs d'erreurs garantissent une transmission maximale du message avec fiabilité. À mesure que le nombre de bits de redondance augmente, la capacité de correction des erreurs s'améliore également. Cependant, l'utilisation d'un canal devient plus coûteuse à mesure que la longueur du message augmente.

Ainsi, la mémoire utilisée pour les codes correcteurs d'erreurs est plus onéreuse que la mémoire conventionnelle, en raison du matériel supplémentaire requis pour sa fabrication et des volumes de production plus faibles associés.

De plus, une mémoire utilisant des codes correcteurs d'erreurs peut être jusqu'à 2 à 3 % plus lente qu'une mémoire conventionnelle, en raison du temps supplémentaire nécessaire pour la vérification et la correction des erreurs.

Par conséquent, il existe un compromis entre la capacité de correction des erreurs et le coût accru de la mémoire et du canal [16].

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai abordé quelques notions générales concernant la théorie de l'information. Cette discipline offre un cadre précis pour appréhender les limites et les possibilités de la transmission de données à travers divers canaux de communication. Ses fondements reposent sur des concepts clés tels que l'alphabet, les messages numériques, les codes correcteurs d'erreurs, ainsi que la capacité des canaux de transmission. En explorant ces aspects généraux de la théorie de l'information, nous saisissons l'importance de garantir une transmission efficace de l'information, la nécessité de réduire les erreurs de transmission, et l'optimisation des performances des systèmes de communication.

Chapitre 2

Technique de modulation et codage
adaptatif AMC

2.1 Introduction

La qualité du signal reçu par un terminal est influencée par divers facteurs, notamment la distance par rapport à la station de base souhaitée, les interférences des autres stations, les pertes de propagation et le bruit. Pour améliorer la performance globale du système, ainsi que le débit et la couverture, le signal émis vers un utilisateur spécifique est ajusté pour prendre en compte les fluctuations de la qualité du signal. Ce processus est connu sous le nom d'adaptation du lien radio, ou "Link adaptation".

Une approche alternative à la gestion de la puissance pour contrer les variations du canal dans le temps consiste à compenser les affaiblissements. Plutôt que de maintenir une qualité de signal constante au récepteur, on adapte la modulation et le codage du signal transmis de manière à maximiser le débit de données lorsque le canal est favorable et à le minimiser lorsque le canal se détériore. Cette méthode est appelée modulation et codage adaptatifs (AMC). Elle offre une alternative au "Link adaptation" traditionnelle et peut augmenter la capacité globale du système. Par rapport à la gestion conventionnelle de la puissance, l'AMC permet une capacité bien plus élevée pour les systèmes radio à transmission de paquets. De plus, l'AMC maintient une puissance d'émission fixe pendant toute la durée de la trame, réduisant ainsi considérablement les interférences provenant d'autres utilisateurs.

Ce chapitre dévoile la théorie de la technique de codage et modulation adaptatifs (AMC), où le principe de base, la méthode d'adaptation et le mécanisme de rétroaction sont étalés respectivement. Également, l'étude des différentes techniques adaptatives proposées a fait l'objet de l'ultime section du présent chapitre.

2.2 Concept de la modulation et le codage adaptatif AMC

L'AMC est une technique de transmission où la modulation et le codage sont variés par l'émetteur afin de parer aux conséquences des évanouissements du signal provoqués par le canal. L'AMC a été largement étudiée, surtout vers la fin des années quatre-

vingt-dix, et son efficacité a été démontrée dans de nombreux travaux de recherche[17, 18, 19].

La technique de modulation et de codage adaptatifs (AMC) fait partie d'un schéma de transmission adaptatif dans lequel les paramètres de transmission, tels que la modulation, le débit de code et la puissance, sont ajustés en fonction des informations sur l'état du canal (CSI). Le concept de transmission adaptative nécessite qu'un nœud de destination renvoie le CSI du signal reçu au nœud source via un canal de rétroaction ; le nœud source contrôle ensuite sa puissance d'émission (ou son débit de code et/ou sa modulation) en fonction du retour CSI pour compenser les variations du niveau du signal reçu. Ce schéma a la capacité d'augmenter de manière significative le débit du système de communications sans fil en augmentant le débit de données moyen, l'efficacité spectrale et la capacité du système. La technique peut être réalisée à différentes échelles de temps, en fonction des capacités du système et de la vitesse à laquelle le CSI varie. Les communications sans fil à large bande utilisent l'AMC pour optimiser le taux de transmission et les performances en matière d'erreurs. Dans le schéma AMC, lorsque le taux d'erreur au niveau du récepteur augmente en raison du signal reçu brouillé et atténué résultant du canal, le récepteur renvoie ces informations à l'émetteur via un chemin de rétroaction. L'émetteur, à son tour, passe automatiquement à une technique AMC plus robuste, bien que moins efficace[20].

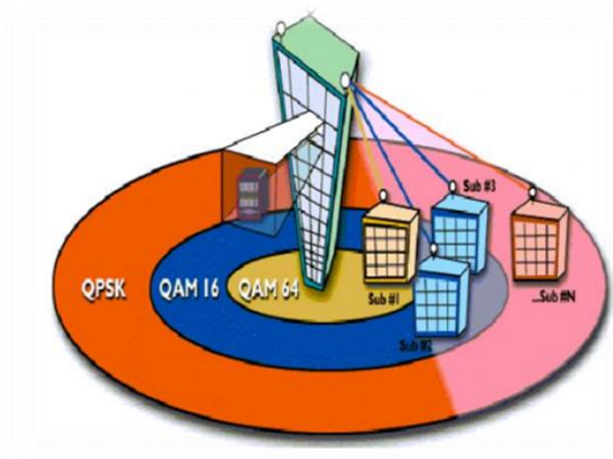


Figure 2. 1: Méthode d'utilisation d'un codage adaptatif AMC [20]

2.3 Principe de la technique AMC

L'utilisation de la modulation et du codage adaptatif AMC est l'une des techniques clefs permettant aux systèmes sans fil de futures générations de garantir une efficacité spectrale élevée [21, 22]. L'idée de base de l'AMC est de changer dynamiquement les schémas de modulation et de codage en fonction de l'état du canal dont l'objectif est d'optimiser l'efficacité spectrale globale. La décision, au sujet de choisir le schéma de modulation et de codage approprié, est effectuée du côté du récepteur selon l'état observé de canal avec l'information véhiculée par l'émetteur dans chaque flux transmis. L'AMC fournit la flexibilité d'adapter la combinaison modulation-codage aux conditions moyennes du canal radio pour chaque utilisateur. Avec l'AMC, la puissance du signal transmis est maintenue constante pendant toute la durée de la trame, ainsi les interférences provenant des autres utilisateurs sont significativement réduites, en faisant varier le nombre de modulations pouvant être supportées par un terminal et le taux de codage en fonction de la qualité actuelle du signal reçu.

Les modulations obligatoires sont BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16-QAM (16 array Quadrature Amplitude Modulation), 64-QAM (64 array Quadrature Amplitude Modulation), pour les parties montantes et descendantes. D'autre part, un code correcteur d'erreur (FEC : Forward

Error Correction) est également obligatoire. Ce codage est de type Reed-Salomon concaténé avec un Codage Convolutif (RS-CC). Cependant, dès lors que l'on utilise des sous-canaux, le codage Reed-Salomon ne doit plus être utilisé.

En combinant le type de modulation et le taux de codage, nous obtenons plusieurs combinaisons, appelées également schéma de modulation et de codage MCS (Modulation and Coding Scheme), qui ont été proposées par le standard, comme le montre le tableau 2.1. Ainsi, un utilisateur qui serait proche d'une station de base pourrait se voir attribuer, par exemple, une modulation 64-QAM avec un taux de codage de $3/4$. Cette combinaison lui permettrait de bénéficier d'un débit utile plus élevé sur le lien descendant [23].

Schéma MCS	Type de modulation	Taux de codage	Bits/Symbole
MCS 1	BPSK	$1/2$	0.5
MCS 2	QPSK	$1/2$	1
MCS 3	QPSK	$3/4$	1.5
MCS 4	16-QAM	$1/2$	2
MCS 5	16-QAM	$3/4$	3
MCS 6	64-QAM	$2/3$	4
MCS 7	64-QAM	$3/4$	4.5

Tableau 2.1: Schémas de modulation et de codage (MCS) [24]

2.4 Performances du système AMC

Les performances de l'AMC dépendent fortement d'une estimation précise du canal au niveau du récepteur et d'un chemin de rétroaction fiable entre cet estimateur et l'émetteur auquel le récepteur rapporte les informations sur l'état du canal (CSI). Afin de garantir une mise en œuvre de haute qualité, les étapes suivantes doivent être suivies [25] :

2.4.1 Estimation de la qualité du canal

L'expéditeur demande une estimation des conditions de canal attendues pour la prochaine période de transmission. Étant donné que ces connaissances ne peuvent être

acquises que grâce à la prédiction à partir d'estimations précédentes de la qualité des canaux, le système adaptatif ne peut fonctionner efficacement que dans un environnement où les conditions des canaux évoluent relativement lentement. Par conséquent, le délai entre l'estimation de la qualité et la transmission réelle par rapport à la fréquence Doppler maximale du canal est critique pour la mise en œuvre du système, car de mauvaises performances du système en résulteront si l'estimation du canal est obsolète au moment de la transmission [25].

2.4.1.1 Les techniques d'estimation proposées

Il existe une multitude d'estimateurs pour l'AMC qui ont été étudiés dans la littérature. Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons adopté cinq techniques d'estimation spécifiques.

2.4.1.2 Estimateur LS

L'estimateur de canal à moindres carrés (LS) est le modèle le plus simple, car il se base sur la division du signal reçu par le signal d'entrée, lequel doit être constitué de symboles pilotes connus. Il est important de noter qu'au récepteur, les symboles observés à la sortie de la DFT sont :

$$Y = XH + N \quad (2.1)$$

Où la matrice diagonale X contient les symboles transmis sur sa diagonale, tandis que le vecteur H représente la réponse fréquentielle du canal. L'estimateur LS minimise le paramètre :

$$(Y - XH)^H (Y - XH) \quad (2.2)$$

Les coefficients de l'estimateur LS sont donnés par la formule suivante [26]:

$$\hat{H}_{LS} = X^{-1} = \left[\frac{X_0}{Y_0}, \frac{X_1}{Y_1}, \dots, \frac{X_{N-1}}{Y_{N-1}} \right] \quad (2.3)$$

L'avantage principal de cet estimateur réside dans sa simplicité, nécessitant seulement une division par sous-porteuse. Cependant, son inconvénient majeur est une grande erreur quadratique moyenne. Cela est dû à l'utilisation d'un modèle de canal trop simplifié et au fait que cet algorithme ne prend pas en compte les corrélations fréquentielles et temporelles du canal.

2.4.1.3 Estimateur LMS

Nous étudions de cette section, une méthode pour améliorer la précision de l'estimateur à moindres carrés (LS). L'estimateur de canal LS a une structure très simple. Cependant, il souffre d'une grande dégradation dans la précision de l'estimation comparée à l'estimateur LMMSE. Cette méthode transfère la réponse impulsionnelle du canal à partir du domaine fréquentiel au domaine temporel et approxime les trajets multiples de faible énergie par des zéros. La méthode utilisée aide à supprimer l'influence de bruit et à améliorer la précision de l'estimation [27,28,29]. Puisque le bruit AWGN est identiquement distribué sur toute la bande, les composants qui ont une grande énergie sont plus fiables que ceux avec une faible énergie. Par conséquent, exclure les trajets non fiables aidera à améliorer la précision de l'estimation. Nous récapitulons cette méthode dans les étapes suivantes :

1. Estimer initialement le canal grâce à l'information pilote.
2. Obtenir la réponse impulsionnelle discrète du canal dans le domaine temporel $h(n)$, par la transformée de Fourier inverse (IFFT).
3. Ignorer les trajets dont les retards excèdent le plus grand retard de canal, ce qui peut être exprimé comme :

$$\tilde{h}(n) = \begin{cases} h(n), & n \leq \tau_{max} \\ 0, & n \geq \tau_{max} \end{cases} \quad (2.4)$$

Estimer le canal au domaine fréquentiel par l'application de la transformée de Fourier FFT sur le signal $h(n)$.

2.4.1.4 Estimateur LMMSE

L'estimateur linéaire à erreur quadratique moyenne minimale (LMMSE) minimise l'erreur quadratique moyenne entre le canal réel et estimé en utilisant la corrélation fréquentielle du canal. Ceci est réalisé par une transformation linéaire optimale l'appliquée à l'estimateur LS décrit dans la section précédente. On dénote par R_{gg} , R_{hh} , et R_{yy} les matrices d'autocovariance de g , h et y , respectivement, et par R_{gy} la matrice de covariance croisée entre g et y . On dénote en outre par $\sigma_n^2 = E\{|n|^2\}$ la variance de bruit. On suppose que le vecteur de la réponse impulsionnelle du canal g et le bruit gaussien n sont non-corrélés. On a alors :

$$a. R_{hh} = E\{hh^H\} = E\{(F_g)(F_g)^H\} = FE\{gg^H\}F^H = FR_{gg}F^H \quad (2.5)$$

$$b. R_{gy} = E\{gy^H\} = E\{g(XF_g + n)^H\} = R_{gg}F^HX^H \quad (2.6)$$

$$c. R_{yy} = E\{yy^H\} = EFER_{gg} + \sigma_n^2 I_N \quad (2.7)$$

R_{gg} Ainsi que R_{hh} et σ_n^2 sont supposés connus au niveau du récepteur. Basant sur la théorie des filtres adaptatifs, la solution optimale en termes d'erreur quadratique moyenne est [27,29, 30, 31]:

$$\hat{g}_{LMMSE} = R_{gy}R_{yy}^{-1} Y \quad (2.8)$$

Enfin, on a :

$$\hat{H}_{LMMSE} = R_{hh}(R_{hh} + \sigma_n^2(XX^H)^{-1})^{-1}\hat{H}_{LS} \quad (2.9)$$

L'estimateur LMMSE donne de meilleures performances par rapport à l'estimateur LS, particulièrement dans le cas de faibles SNR [15]. Néanmoins, L'inconvénient principal de cet estimateur demeure à sa complexité très élevée. L'évaluation de l'inverse de R_{hh} de XX^H , implique l'inversion de matrices de dimension $(N \times N)$ permettant une complication de calcul à chaque variation des données dans X .

2.4.1.5 Estimateur LMMSEM

La complexité de l'estimateur LMMSE peut être encore réduite en utilisant la décomposition en valeur singulière de la matrice d'autocorrélation \mathbf{R}_{hh} . Par conséquent nous pouvons appliquer une réduction de rang et utiliser seulement les éléments les plus significatifs de \mathbf{R}_{hh} . Cette simplification aura lieu aux dépens d'une petite réduction de performance.

Les estimateurs LMMSE modifiés sont largement étudiés [27,29,30] pour réduire la complexité qui caractérise les modèles LMMSE. Parmi eux, on s'intéresse à l'estimateur LMMSE, en utilisant la décomposition en valeur singulière, qui combine les trois techniques de simplification suivantes :

1. La première simplification consiste à remplacer $(\mathbf{X}\mathbf{X}^H)^{-1}$ dans l'équation (2.8) par son espérance $E\{(\mathbf{X}\mathbf{X}^H)^{-1}\}$. Assumant la même constellation de signal sur toutes les sous- porteuses et tous les points de la constellation équiprobables, on a :

$$E\{(\mathbf{X}\mathbf{X}^H)^{-1}\} = E\left\{\left|\frac{1}{X_k}\right|^2\right\} I_N \quad (2.10)$$

Définissant le rapport SNR moyen par :

$$\bar{\gamma} = \frac{E\{|X_k|^2\}}{\sigma_n^2} \quad (2.11)$$

Alors, dans l'équation (2.8) on peut faire l'approximation suivante :

$$\sigma_n^2(\mathbf{X}\mathbf{X}^H)^{-1} \approx \frac{\beta}{\gamma} I_N \quad (2.12)$$

2. La deuxième simplification est basée sur l'approximation à bas rang. On sait que la majeure partie de l'énergie dans le vecteur \mathbf{g} est contenue dans les premiers L trajets. Par conséquent, nous pouvons considérer seulement les trajets à énergie significative, c'est-à-dire, le coin gauche supérieur de la matrice d'auto-

covariance R_{gg} . Ainsi la taille effective de la matrice est réduite après l'utilisation de l'approximation à bas rang.

2. La troisième simplification consiste en l'utilisation de la décomposition en valeur singulière (SVD²) de la matrice R_{hh} :

$$R_{hh} = UDUH \quad (2.13)$$

Où U est une matrice unitaire contenant les vecteurs singuliers et D est une matrice diagonale contenant les valeurs singulières, $d_0 \geq d_1 \geq \dots d_{N-1} \geq 0$, sur sa diagonale. Combinant les techniques de simplification précédentes, l'estimateur LMMSE modifié est expliqué comme suit. Le système détermine d'abord le rang de la matrice exigé par l'estimateur, dénoté ρ , qui ne devrait pas être plus petit que L . Puis, on doit connaître la constellation du signal, la variance de bruit et la matrice d'auto-covariance de canal R_{hh} .

- Au récepteur, on calcule $\beta, \bar{\gamma}$, la matrice unitaire U , et les valeurs singulières d_k .

On obtient ainsi une matrice diagonale D de taille $N \times N$, ses éléments sont donnés par :

$$\delta_k = \begin{cases} \frac{\delta_k}{\delta_k + \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)}, & k = 0, 1, \dots, \rho - 1 \\ 0, & k = \rho, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

Par la prise en compte des ρ premières valeurs singulières correspondant aux valeurs les plus significatives de R_{hh} , la meilleure approximation de rang ρ de l'estimateur est :

$$\hat{H}_{LMMES} = UD_\rho \hat{U} \hat{H}_{LS} \quad (2.15)$$

Où D_ρ est une matrice de dimension $\rho \times \rho$ donnée par le coin gauche supérieur de la matrice D .

L'estimateur LMMSEM peut être interprété comme suit : d'abord projetant l'estimateur LS sur un sous-espace de petite dimension (aussi petit que L). La complexité de l'estimateur LMMSEM est inférieure à celle de l'estimateur LMMSE.

Cependant, cet estimateur présente des erreurs dues à la partie du canal ignorée par le sous-espace choisi.

2.4.1.6 L'égaliseur zéro forcing

Le zéro forcing est un filtre qui tente d'inverser exactement la fonction de transfert du canal, ce qui est à priori précisément le but recherché, idéalement, par l'égalisation. Ce faisant, l'interférence entre symboles est exactement compensée (pourvu que l'ensemble des filtres d'émission et de réception soit Nyquist), et l'on dit que l'interférence entre symboles est forcée à zéro. On a ainsi :

$$E(z) = \frac{1}{C(z)} \quad (2.16)$$

Dès maintenant, on peut s'apercevoir que cette démarche souffre de deux défauts :

D'abord, $C(z)$ peut posséder des zéros de module supérieur à 1, ce qui induit des pôles instables pour $E(z)$, si celui-ci doit être causal ; d'autre part, si (n) est une réponse impulsionnelle finie, alors $e(n)$ est à réponse impulsionnelle infinie. On peut tourner partiellement la première difficulté en introduisant un retard R lors de la résolution, ce qui permet de prendre en compte une éventuelle partie non causale (mais retardée), et tient compte du nécessaire retard lié à la mise en œuvre des filtres. Le choix de ce retard et à la fois difficile.

On peut écrire l'équation de convolution correspondant à l'inversion du canal :

$$\sum_{i=0}^{M-1} e(i)c(n-i) = \delta(n-R) \quad (2.17)$$

À la sortie de l'égaliseur, on obtient alors :

$$z(n) = a_{n-R} + b'(n) \quad (2.18)$$

Où $b'(n)$ est le bruit d'observation filtré par l'égaliseur. L'annulation des interférences entre symboles se fait généralement au prix d'une augmentation sensible du niveau de bruit.

En effet, la fonction de transfert du canal est en général de type passe-bas, et son inverse est de type passe-haut. Lorsque le bruit est large bande, il s'ensuit une forte augmentation du bruit en haute fréquence et une dégradation du rapport signal à bruit. Ainsi, en dehors du cas où l'on est assuré d'un faible niveau de bruit d'observation, cette solution n'est pas à retenir. On notera en outre que le canal est supposé parfaitement connu; dans cette méthode supervisée, les erreurs d'estimation de la réponse impulsionnelle se répercuteront alors sur les coefficients d'égaliseur et entraîneront une dégradation des performances[32].

2.4.1 Modification des paramètres

Le choix de la constellation appropriée et du rendement de codage à utiliser, lors d'une nouvelle transmission, est fait au niveau de l'émetteur en s'appuyant sur la prévision de l'état du canal. Un seuil de rapport signal sur bruit (SNR, Signal to Noise Ratio, en anglais) garantit un taux d'erreur binaire (TEB, BER - Bit Error Rate, en anglais) inférieur à une valeur limite TEB_0 , qui est définie par le système pour chaque constellation à chaque fois que le SNR est au-dessus du seuil. À partir du TEB, les seuils de SNR sont obtenus en fonction de leurs caractéristiques pour une constellation sur un canal AWGN. Comme décrit par la figure suivante, cette méthode consiste en un découpage de la gamme des SNR en $N+2$ sous-régions, par $N+1$ seuils. Chacune des N constellations est alors utilisée, pour fonctionner dans une zone particulière de SNR. Quand la valeur du SNR est comprise dans une zone, l'information associée à l'état du canal est envoyée de nouveau à l'émetteur. L'émetteur adapte alors la fréquence symbole, le rendement de codage et la constellation, en garantissant un TEB au-dessous du seuil TEB_0 . Ceci permet au système de transmettre les données avec une efficacité spectrale et un débit élevés quand le SNR est élevé, et la réduit quand le SNR est faible[33].

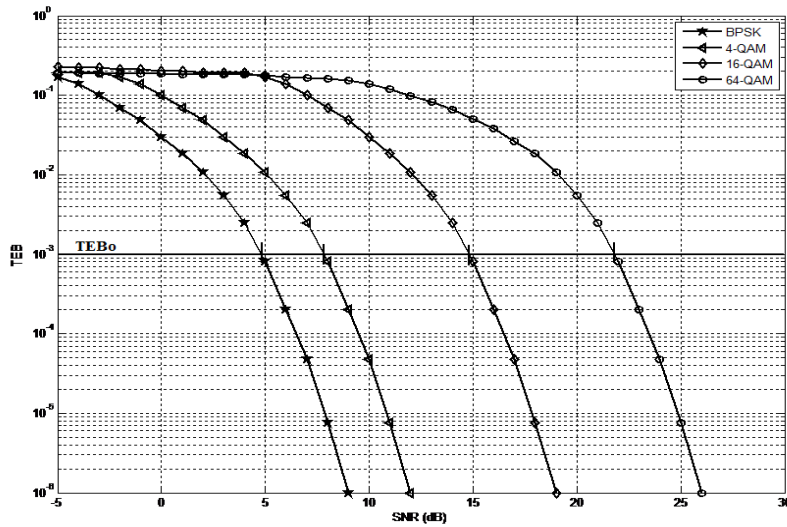


Figure 2. 2: *TEB* en fonction du SNR et seuils correspondants aux N codages et modulations utilisées par la méthode AMC [33]

2.4.2 Mécanisme de rétroaction

Une fois que le récepteur a estimé le rapport signal/bruit (SNR) du canal, il l'a converti en informations BER pour chaque mode candidat et, sur la base d'un BER cible, a sélectionné le mode qui produit le plus grand débit tout en restant dans les limites du BER cible, il doit transmettre les fréquences spécifiques au mode à l'émetteur afin que l'adaptation puisse être effectuée.

Cependant, le défi associé à la modulation et au codage adaptatif réside dans le fait que le canal mobile change au fil du temps, de sorte que le retour d'informations sur le canal devient un facteur limitant. Par conséquent, l'hypothèse d'un canal de rétroaction fiable et à évolution lente est essentielle pour obtenir des performances précises du schéma AMC. De cette manière, aucun retard ou erreur de transmission ne peut se produire dans le canal de retour, de sorte qu'aucune divergence n'apparaisse entre le SNR attendu et réel de la trame suivante. De plus, le récepteur doit également être

informé des paramètres du démodulateur et du décodeur qui doivent être utilisés dans le prochain paquet reçu [24].

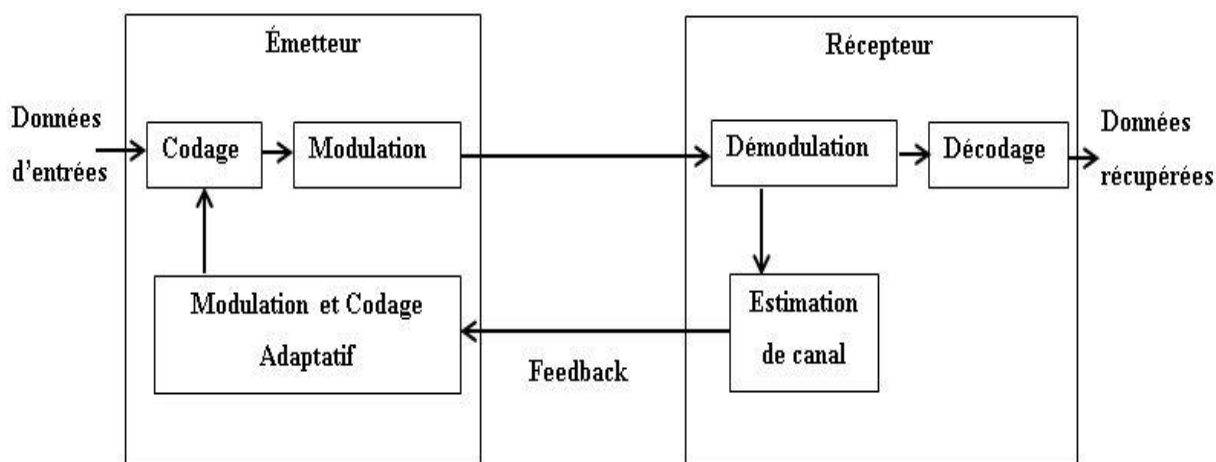


Figure 2. 3 : Diagramme de blocs de la modulation et du codage adaptatif [24]

2.5 Les avantages et défis et considérations de déploiement d'AMC

2.5.1 Les avantages

La technique AMC offre plusieurs avantages qui améliorent l'efficacité et la fiabilité de la transmission des données.

Dans cette explication, nous explorerons les principaux avantages du codage et de la modulation adaptatifs :

- **Efficacité spectrale améliorée :**

L'AMC optimise l'efficacité spectrale en ajustant dynamiquement les schémas de modulation et de codage selon les conditions du canal. Ainsi, lorsque les conditions du canal sont favorables, des schémas de modulation à ordre élevé (comme le QAM) sont utilisés pour transmettre davantage de données par symbole, augmentant ainsi le débit. En revanche, en cas de conditions défavorables, des schémas de modulation à ordre inférieur sont employés pour garantir une connexion stable.

- **Augmentation du débit de données :**

En s'adaptant aux fluctuations des conditions des canaux, l'AMC assure une utilisation optimale de la bande passante disponible. Dans des conditions idéales, cela permet

d'atteindre des débits de données plus élevés, ce qui est crucial pour les services à large bande afin de fournir une haute qualité de service aux utilisateurs.

- **Fiabilité améliorée :**

L'AMC améliore la fiabilité des transmissions en ajustant le schéma de codage de correction d'erreurs en fonction des conditions du canal. Dans de bonnes conditions, moins de corrections d'erreurs sont nécessaires, réduisant ainsi la latence et améliorant l'efficacité globale. En cas de dégradation du canal, une correction d'erreur renforcée est appliquée pour maintenir l'intégrité des données.

- **Meilleure qualité de service (QoS) :**

Le codage et la modulation adaptatifs contribuent à une meilleure QoS pour les utilisateurs. En cas de détérioration des conditions du canal, l'AMC réduit le débit et applique une correction d'erreur plus robuste, garantissant une connexion stable et minimisant les perturbations comme les appels interrompus ou les flux vidéo instables.

- **Conception de réseau flexible :**

L'AMC permet de concevoir des réseaux plus flexibles et résilients, adaptés à diverses conditions environnementales et géographiques. Il est particulièrement utile pour les réseaux satellites et sans fil desservant de vastes zones avec des conditions météorologiques ou des interférences variées.

- **Gestion améliorée du budget des liens :**

L'AMC optimise le bilan de liaison en ajustant les schémas de modulation et de codage pour maintenir un rapport signal/bruit (SNR) adéquat. Cela permet une utilisation plus efficace de l'énergie et des ressources disponibles.

- **Meilleure utilisation des ressources satellitaires :**

Dans les communications par satellite, l'AMC maximise l'utilisation des ressources coûteuses telles que la capacité des transpondeurs. En s'adaptant aux variations des

conditions de la liaison, il assure une utilisation efficace de la capacité satellitaire, profitant à l'opérateur et aux utilisateurs finaux.

- **Adaptation à la mobilité des utilisateurs :**

L'ACM est également pertinent pour les réseaux de communication mobile, comme les réseaux 4G et 5G. Il ajuste la modulation et le codage en fonction des variations d'intensité du signal et des niveaux d'interférence rencontrés par les appareils mobiles, garantissant une expérience utilisateur constante.

- **Efficacité énergétique :**

L'AMC contribue à l'efficacité énergétique des systèmes de communication en optimisant l'utilisation de la puissance de transmission et de la bande passante. Cela réduit la consommation d'énergie inutile, en ligne avec les objectifs de développement durable.

- **Réseaux évolutifs :**

À mesure que les réseaux de communication évoluent, l'AMC permet de les pérenniser. Il facilite l'adaptation aux nouvelles technologies, équipements et demandes des utilisateurs sans nécessiter de modifications majeures de l'infrastructure, assurant ainsi leur viabilité à long terme [34].

2.5.2 Défis et considérations de déploiement

Bien qu'AMC apporte des avantages significatifs, il existe des défis et des considérations à prendre en compte :

- **Équilibrer la vitesse d'adaptation et les frais généraux :**

Une adaptation rapide aux conditions changeantes du canal est essentielle, mais elle doit être équilibrée par rapport aux frais généraux introduits par les changements de signalisation et de configuration.

- **Compatibilité ascendante et interopérabilité :**

À mesure que les réseaux passent à la 5G, l'interopérabilité avec les systèmes et appareils existants doit être garantie lors de la mise en œuvre de l'AMC.

- **Aspects réglementaires :**

Pour garantir un partage équitable du spectre et minimiser les interférences, reste crucial lors de la mise en œuvre de l'AMC sur différentes bandes de fréquences [35].

2.6 Conclusion

En conclusion, le chapitre sur la technique de modulation et le codage adaptatif (AMC) met en lumière l'importance de l'adaptation du lien radio pour optimiser la qualité du signal et la performance des systèmes de communication. L'AMC offre une approche dynamique en ajustant la modulation et le codage en fonction des conditions du canal, ce qui permet de maximiser le débit de données lorsque les conditions sont favorables et de le réduire lorsque le canal se détériore. Cette flexibilité apportée par l'AMC permet de réduire les interférences, d'augmenter l'efficacité spectrale et d'améliorer la capacité globale des systèmes de transmission. En combinant adaptation du lien radio et modulation/codage adaptatifs, les systèmes peuvent offrir des performances optimales dans des environnements sans fil variables, assurant ainsi une communication fiable et efficace pour les utilisateurs.

Chapitre 3

Simulation

3.1 Introduction

Ce chapitre est un exposé des résultats de simulations que nous avons faites dans le cadre de ce mémoire. En utilisant le logiciel de simulation et de programmation python, nous proposons une analyse comparative des deux techniques classiques d'estimation, à savoir l'estimateur LS et l'estimateur LMS

3.2 Langage utilisé

Le choix du bon environnement de programmation est très important pour le développement des projets. Cela se fait suivant plusieurs facteurs : la puissance de compilation, la facilité d'utilisation, la disponibilité de plusieurs fonctionnalités et la communication avec d'autres environnements, etc. Afin de réaliser les différentes simulations de notre système, nous avons eu recours aux outils du langage Python.

Ce dernier est un langage de programmation de haut niveau et un environnement interactif pour le développement d'algorithmes, la visualisation et l'analyse des données, ou encore le calcul numérique. En utilisant Python, nous pouvons résoudre des problèmes de calcul scientifique plus rapidement qu'avec les langages de programmation traditionnels ; car il n'est pas nécessaire d'effectuer les tâches de programmation de bas niveau, comme la déclaration des variables, la spécification des types de données et l'allocation de la mémoire. Python offre également une vaste collection de bibliothèques et de modules, tels que NumPy, SciPy, Pandas et Matplotlib, qui facilitent encore davantage le développement rapide et efficace d'applications complexes.

3.3 Objectif

L'estimation du canal mobile à bruit blanc vise à caractériser l'environnement de transmission afin d'améliorer la qualité des communications sans fil. En raison des caractéristiques du canal de communication, telles que la réflexion, la diffraction, etc....Le signal transmis peut subir des distorsions et une atténuation. Pour compenser ces effets

et assurer une transmission fiable, il est nécessaire d'estimer correctement le canal de communication.

3.4 Simulation et commentaire

Nous proposons dans ce travail un système de transmission binaire AMC dans un canal mobile avec bruit blanc, qui utilise deux méthodes d'estimation différentes (par l'algorithme LS et l'algorithme LMS). La Technique AMC permet d'alterner le schéma de modulation et le taux de codage convolutionnel (BPSK1/2, QPSK 3/4, 16QAM 3/4 et 64QAM 2/3, où l'émetteur est le seuil SNR correspondant). Le modèle de simulation a été mis en œuvre en utilisant les paramètres du système indiqués dans le tableau 3.1.

Dans notre simulation on a utilisé les paramètres résumés dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Nombre de sous-canaux	1024
Nombre de pilotes	128
GI	256
Nombre de sous-porteuses	896
Longueur du canal	16
Schémas de modulation	BPSK,QPSK,16QAM,64QAM

Tableau 3.1 : Paramètres du système

3.4.1 Estimation d'un canal mobile avec bruit blanc à l'aide de l'algorithme des moindres carrés (LS)

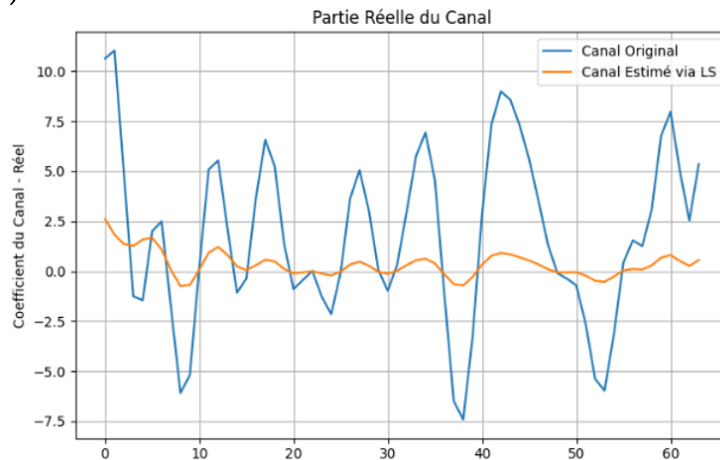


Figure 3. 1: Estimation du canal à l'aide de l'algorithme LS (Partie réelle du canal)

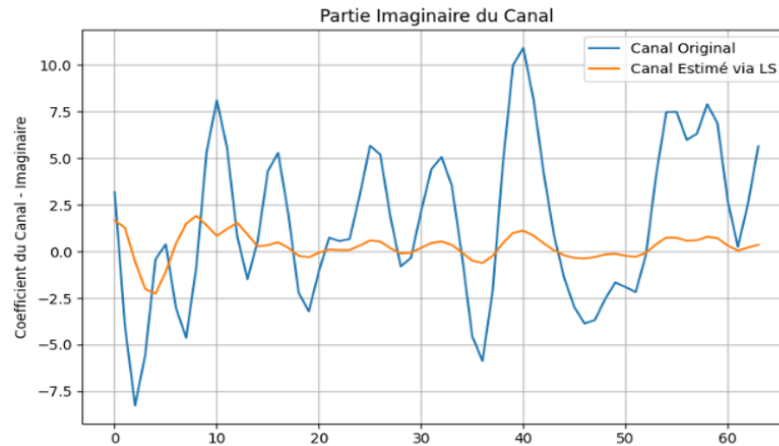


Figure 3. 2: Estimation du canal à l'aide de l'algorithme LS (Partie imaginaire du canal)

Commentaire

La Figure 3.1 et la Figure 3.2 montrent les résultats de l'estimation d'un canal mobile avec bruit blanc à l'aide de l'estimateur LS (moindres carrés).

Pour la partie réelle du canal (Figure 3.1), la courbe bleue représente les coefficients d'origine, et montre de fortes variations avec des pics positifs et négatifs, indiquant une forte volatilité dans le canal mobile. La courbe orange, quant à elle, montre les coefficients de canal estimés via l'algorithme LS. L'estimation suit une tendance douce par rapport aux fluctuations du canal d'origine, offrant plus de stabilité et moins sujette aux changements brusques. Cependant, cela peut indiquer une sous-estimation des changements rapides qui se produisent dans le canal mobile.

Pour la partie imaginaire du canal (Figure 3.2), la courbe bleue représente également les coefficients originaux, avec de grandes variations similaires à celles de la partie réelle. La courbe orange montre les coefficients estimés via l'algorithme LS, suivant une tendance douce et stable. Cependant, cette stabilisation ne capture pas tous les changements rapides dans le canal d'origine, ce qui peut conduire à des erreurs dans des conditions de canal très volatiles.

Interprétation

L'estimateur LS présente de bonnes performances globales en termes de stabilité et de réduction du bruit. Il est capable de fournir une estimation fiable du canal dans des conditions de bruit blanc, mais peut manquer de réponse aux changements rapides du canal en mouvement. Les variations rapides des canaux ne sont pas entièrement suivies par l'estimation LS, ce qui peut affecter les performances du système de communication, en particulier dans les environnements à propagation rapide ou très volatile. L'estimateur LS a tendance à lisser les différences soudaines, ce qui peut être à la fois un avantage (réduction du bruit) et un inconvénient (perte de détail dans les différences de canaux).

3.4.2 Estimation d'un canal mobile avec bruit blanc à l'aide de l'algorithme LMS (Moins carrés moyens)

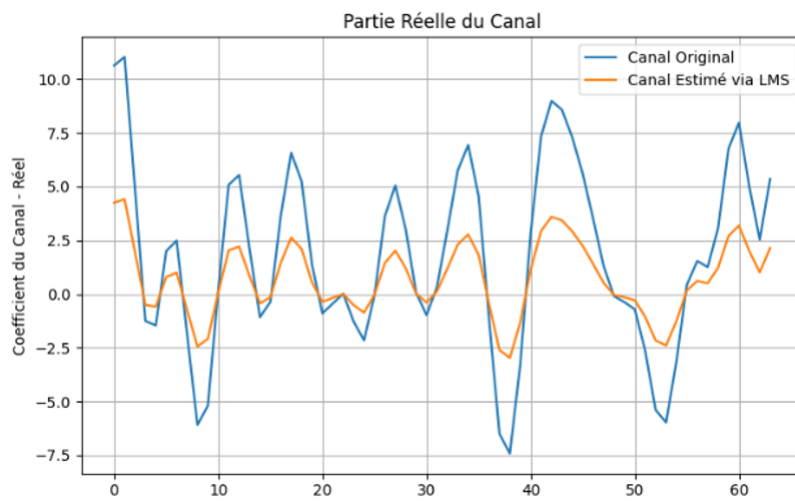


Figure 3. 3: Estimation du canal à l'aide de l'algorithme LMS (Partie réelle du canal)

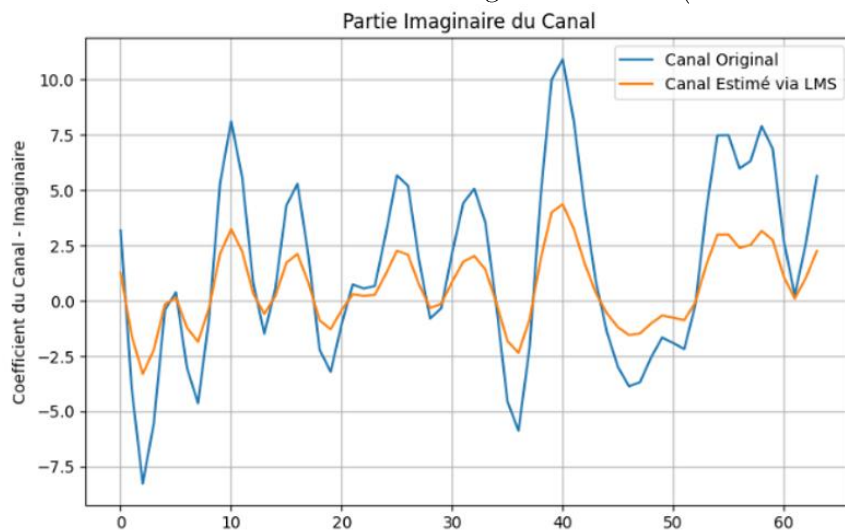


Figure 3. 4 : Estimation du canal à l'aide de l'algorithme LMS (Partie imaginaire du canal)

Commentaire

La Figure 3.3 et la Figure 3.4 montrent les résultats de l'estimation d'un canal mobile avec bruit blanc à l'aide de l'estimateur LMS (Least Mean Squares).

Pour la partie réelle du canal (Figure 3.3), la courbe bleue représente les paramètres d'origine du canal. De grandes variations avec des pics positifs et négatifs indiquent une forte oscillation dans le canal en mouvement. La courbe orange montre les paramètres de canal estimés via l'algorithme LMS pour la partie réelle. L'estimation suit de plus près les variations du canal d'origine que l'estimation LS. Il convient de noter que l'estimateur LMS est capable de capturer plus de détails et de fluctuations de canal, fournissant ainsi une estimation plus précise dans des conditions de changements rapides de canal.

Pour la partie imaginaire du canal (Figure 3.4), la courbe bleue représente les coefficients de canal originaux de la partie imaginaire du canal en mouvement, avec de grandes variations similaires à celles de la partie réelle, montrant des pics positifs et négatifs notables. La courbe orange montre les paramètres de canal estimés via l'algorithme LMS pour la partie imaginaire. Quant à la partie réelle, l'estimation suit plus précisément les variations du canal d'origine. L'estimateur LMS capture mieux les changements rapides, fournissant une estimation qui reflète plus précisément les fluctuations réelles du canal.

Interprétation

L'estimateur LMS montre une meilleure performance globale en termes de suivi des variations rapides du canal par rapport à l'estimateur LS. Il offre une estimation plus dynamique et réactive aux fluctuations rapides du canal mobile.

3.4.3 Les performances de débit du système AMC à l'aide de différentes l'algorithmes

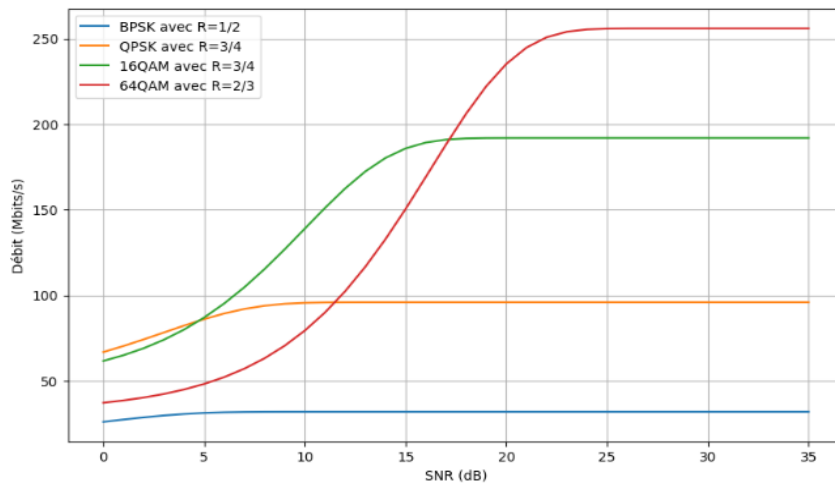


Figure 3. 5: Débit des schémas AMC pour LS

Commentaire

La Figure 3.5 montre les performances de débit d'un système de modulation et de codage adaptatifs (AMC) dans un canal mobile à bruit blanc utilisant l'algorithme de moindres carrés (LS). On note que BPSK avec un taux de codage $R = 1/2$ (ligne bleue) maintient un débit constant quel que soit le SNR, ce qui indique sa robustesse à faible SNR, mais faible débit. QPSK avec $R = 3/4$ (ligne orange) commence à augmenter considérablement à partir d'un rapport signal/bruit (SNR) d'environ 10 dB, pour atteindre un plateau à environ 18 dB, offrant un compromis entre robustesse et débit. 16QAM avec $R=3/4$ (ligne verte) et 64QAM avec $R=2/3$ (ligne rouge) montrent une augmentation rapide du débit de 12 dB et 15 dB, respectivement, atteignant des plateaux plus élevés autour de 22 dB, reflétant leur sensibilité au bruit. Mais la capacité de fournir des débits plus élevés dans de bonnes conditions de canal. En résumé, le choix de la modulation et du codage dans un système AMC doit être adapté dynamiquement en fonction des conditions du canal pour optimiser le débit tout en maintenant une qualité de service acceptable.

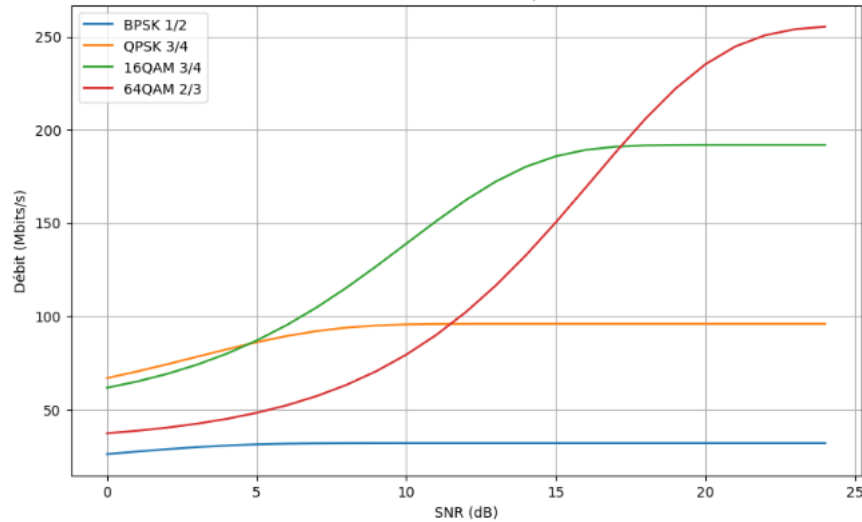


Figure 3. 6: Débit des schémas AMC pour LMS

Commentaire

La Figure 3.5 montre les performances de débit en fonction du SNR pour différents schémas d'un système de modulation et de codage adaptatifs (AMC) dans un canal mobile à bruit blanc utilisant l'algorithme de. On note que BPSK 1/2 (ligne bleue) maintient un débit constant d'environ 50 Mbit/s, faisant preuve d'une grande robustesse même à faible SNR, mais à débit limité. QPSK 3/4 (ligne orange) atteint un niveau stable à environ 100 Mbps et environ 10 dB SNR, indiquant une bonne adéquation entre robustesse et débit. 16QAM 3/4 (ligne verte) commence à augmenter considérablement à partir de 5 dB, pour atteindre 150 Mbps à 15 dB SNR, démontrant une meilleure efficacité au détriment d'une plus grande sensibilité au bruit. 64QAM 2/3 (ligne rouge) affiche la sensibilité SNR la plus élevée, avec un débit dépassant 200 Mbps à 15 dB et approchant 250 Mbps à 20 dB, reflétant une très haute efficacité dans des conditions favorables, mais nécessite un rapport signal/bruit (SNR) élevé.

Comparaison

Une comparaison des méthodes LS (moindres carrés) et LMS (moindres carrés moyens) pour évaluer les performances de débit d'un système AMC dans un canal mobile avec bruit blanc montre que les deux méthodes offrent des performances similaires, mais avec

quelques différences notables. La méthode LS montre des performances stables pour chaque schéma de modulation et de codage, avec des augmentations bien définies du débit en fonction du SNR. D'autre part, la méthode LMS montre une capacité plus rapide à s'adapter aux changements de rapport signal sur bruit (SNR), ce qui peut conduire à une augmentation plus rapide du débit pour certains systèmes de modulation tels que 16QAM et 64QAM. Quant au BPSK 1/2, les deux méthodes maintiennent un débit constant. Taux, ce qui indique une grande durabilité. bien que les deux méthodes atteignent une stabilité de débit similaire, LMS semble fournir une augmentation du débit légèrement plus rapide, ce qui peut être utile dans les environnements de communication où les conditions SNR changent rapidement.

3.4.5 Comparaison de l'efficacité spectrale d'un canal mobile avec bruit blanc par AMC-LS et AMC-LMS

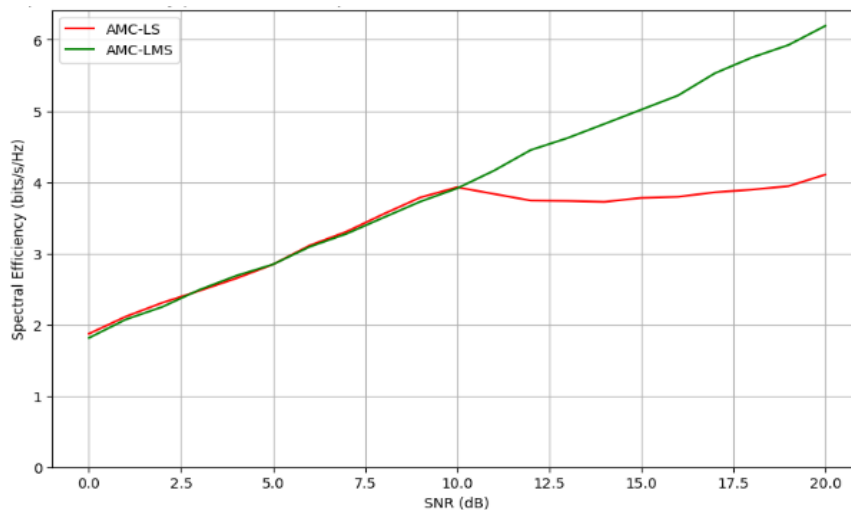


Figure 3. 7: l'efficacité spectrale par AMC-LS et AMC-LMS

Commentaire

La Figure 3.7 montre l'efficacité spectrale d'un canal mobile avec bruit blanc par AMC-LS et AMC-LMS, les deux méthodes montrent des performances similaires à partir d'un SNR de 10 dB, la méthode AMC-LMS commence à surpasser la méthode AMC-LS en termes d'efficacité spectrale. Cette tendance se poursuit et devient de plus en plus prononcée avec l'augmentation du SNR, où AMC-LMS montre une amélioration significative par rapport à AMC-LS. bien que les deux méthodes aient des performances

comparables à faible SNR, AMC-LMS devient de plus en plus efficace à mesure que le SNR augmente, ce qui en fait une méthode supérieure pour des conditions de canal avec un rapport signal sur bruit élevé.

3.4.6 Comparaison des performances en termes de TEB d'un canal mobile avec bruit blanc par AMC-LS et AMC-LMS

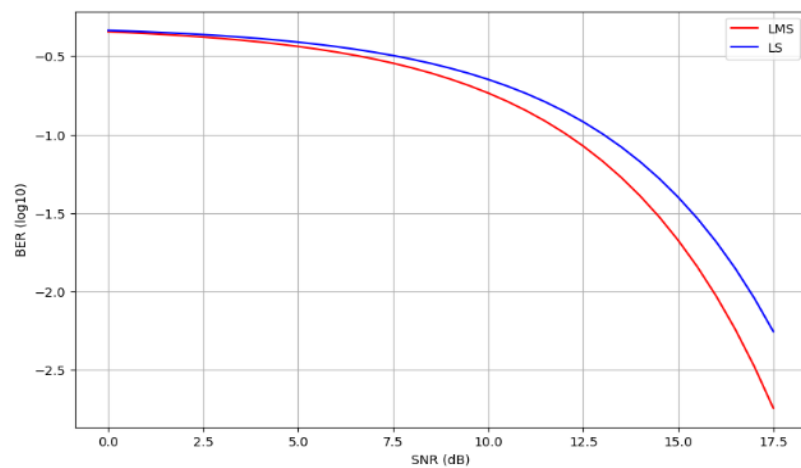


Figure 3. 8: Comparaison des performances en termes de TEB par AMC-LS et AMC-LMS

Commentaire

L'algorithme LMS surpasse systématiquement l'algorithme LS sur toute la plage SNR avec un faible rapport signal/bruit (SNR), l'algorithme LMS présente une meilleure capacité d'estimation de canal et donc un taux d'erreur binaire (BER) plus faible dans toute la plage SNR.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence la supériorité de l'estimateur LMS pour l'estimation des canaux mobiles à bruit blanc. Les résultats de simulation et les implications pratiques soulignent l'importance de cette approche adaptative et performante dans le domaine des communications sans fil modernes. L'adoption de l'estimateur LMS permettra aux systèmes de communication de relever les défis croissants des environnements de communication complexes et d'offrir des performances optimales en termes de fiabilité et de débit de données.

Conclusion générale

En conclusion, cette étude a permis d'approfondir la compréhension des principes fondamentaux à la base d'une communication numérique efficace et performante. Les résultats obtenus, notamment en ce qui concerne l'AMC et l'estimation des canaux de communication, ouvrent la voie à de nouvelles recherches et à l'optimisation des systèmes de communication existants.

En poursuivant dans cette voie, nous pouvons espérer relever les défis croissants de la communication numérique et offrir des solutions toujours plus performantes et fiables pour l'échange d'informations dans un monde en constante évolution.

Parmi les axes de recherche prometteurs, on peut citer :

L'exploration de techniques d'AMC encore plus sophistiquées permettant de s'adapter à des environnements de communication encore plus complexes et contraignants.

Le développement d'algorithmes d'estimation des canaux de communication encore plus précis et efficaces, notamment pour les canaux à évanouissement rapide et les canaux multitrajets.

L'intégration de l'AMC et de l'estimation des canaux de communication dans des architectures de communication de nouvelle génération, telles que les réseaux 5G et les réseaux définis par logiciel (SDN).

En nous concentrant sur ces domaines de recherche, nous pouvons continuer à faire progresser l'état de l'art en matière de communication numérique et contribuer à façonner l'avenir des systèmes de communication sans fil.

En résumé, cette étude a constitué une étape importante dans la compréhension des défis et des opportunités liés à un transfert d'informations efficace dans les systèmes de communication modernes. Les résultats obtenus et les perspectives d'avenir tracées ouvrent la voie à des recherches ultérieures et à des innovations prometteuses dans ce domaine crucial.

Bibliographies

- [1] M. Mansour « Application du Turbo-Code au codage de canal », Ecole Nationale Polytechnique, 2008
- [2] « Comparaison-entre-différentes-techniques-de-permutation-sur-les-turbo-codes.pdf.crdownload ».
- [3] M. C. S. Hanaa et M. B. R. Amel, « Simulation et comparaison d'une chaîne de communication avec Turbo code et LDPC sous Simulink Matlab. ».
- [4] Alain Glavieux « Channel Coding in Communication Networks from Theory to Turbocodes ».
- [5] B. Abdelhak, « Transmission en bande de base ».
- [6] « structure de la chaîne transmission numérique .PDF », page32.
- [7] G. Khadidja et B. MALIKA « Implémentation d'un CODEC Hamming sur ARDUINO MEGA ».
- [8] N. Abid et L. Charif « Étude et simulation de détecteurs linéaires Multi-utilisateurs CDMA ».
- [9] B. Alima et H. Oussama « Etude des systèmes CDMA multiporteuses basé sur les ondelettes » UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL, 2021 /2022.
- [10] E. Mourad et K. ouerdia « Etude et simulation de la liaison upLink (SC_FDPA) du standard 3GPP LTE » université Saad Dahleb de Blida, 2010/2011.
- [11] S. Samir « Sur l'égalisation adaptative dans les systèmes de communications numériques », université 08 mai 1945 Guelma, 2019/2020.
- [12] M. Kabát, « Forward Error Correction for Demanding Multimedia Transfers », 2015.
- [13] R. AG Dolla « Etude et simulation des protocoles ARQ et HARQ dans le cas du SISO SC-FDPA », Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2015-2016.
- [14] Martin P.Clark, « Forward Error Correction code ».
- [15] M. TEMER.Elias « Etude des Codes LDPC et application dans un système MIMO », ENSP, 2019.
- [16] M. LATIFA « Codage de Canal », 2016/2017.
- [17] « A.J.Goldsmith and S.G. Chua.Variable-rate variable-power MQAM for fading channels. IEEE Transaction on Communications, 45(10):1218–1230, October 1997. »
- [18] « M.S. Alouini, X. Tang, and A.Goldsmith. An adaptive modulation scheme for simultaneous voice and data transmission over fading channels. In 48th IEEE Vehicular Technology Conference, volume 2, pages 939–943, May 1998. »
- [19] « S.M. Alouini and A. Goldsmith. Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels. Wireless Personal Communications, 13:119–143, May 2000. »

- [20] « Abdallah Shami, Martin Maier, Chadi Assi, Technologies and Deployments, Springer; Softcover reprint of hardcover 1st ed. 2009 ».
- [21] « Goldsmith, A. J. et S. G. Chua, "Adaptive coded modulation for fading channels," IEEE Transactions on Communications, vol. 46, no. 5, pp. 595–602, May 1998. »
- [22] « Motorola et Nokia, "Proposal for standardization of very high rate mixed voice-data traffic capabilities, based on extending and enhancing 1x systems," 3GPP2, March 2000. »
- [23] « Hadj-Zerrouki.pdf ».
- [24] S. H. O. Salih et M. M. A. Suliman, « Implementation of Adaptive Modulation and Coding Technique using », vol. 2, n° 5, 2011.
- [25] « E. P. Lawrey: "Adaptive Techniques for Multiuser OFDM", Ph. D. Thesis, School of Engineering, James Cook University, December 2001. »
- [26] « J. J. Van de Beek, O. Edfors, M. Sandell, S. K. Wilson et O. P. Borjesson, "On Channel Estimation in OFDM Systems", IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 2, pp. 815-819. juillet 1995. »
- [27] « X. Ma, H. Kobayashi et S. C. Schwartz, "EM-Based Channel Estimation Algorithms for OFDM", EURASIP Journal on Applied Signal Processing, Vol. 2004, No. 10, pp. 1460-1477, 2004. »
- [28] « O. Edfors, M. Sandell, J. J. van de Beek, S. K. Wilson et P. O. Borjesson, "Analysis of DFT-Based Channel Estimators for OFDM". Wireless Personal Communications, Vol. 12, No. 1, pp. 55-70, janvier 2000. »
- [29] « P. Strobach. "Low-Rank Adaptive Filters". IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 44, No. 12, pp. 2932-2947. décembre 1996 ».
- [30] « S. Colcri, M. Ergen, A. Puri et A. Bahai, "Channel Estimation Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM Systems", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 48, No. 3, pp. 223-229. septembre 2002. »
- [31] « M. H. Hsieh et C. H. Wai, "Channel Estimation for OFDM Systems Based on Comb-Type Arrangement in Frequency Selective Fading Channels", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 44, No. 1, pp. 217-225, février 1998. »
- [32] « Geneviève Baudoin . RADOI-COMMUNICATION.2e édition.DUNOD.LONDON .2007. »
- [33] « Adaptive modulation and coding - Wikiwand ». Consulté le: 30 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.wikiwand.com/fr/Adaptive_modulation_and_coding
- [34] « Quels sont les avantages du codage et de la modulation adaptatifs? | TELETOPIX.ORG ». Consulté le: 1 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://teletopix.org/fr/quels-sont-les-avantages-du-codage-et-de-la-modulation-adaptatifs/>

Bibliographie

[35] Consulté le: 15 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur:
<https://forum.huawei.com/enterprise/en/adaptive-modulation-and-coding-amc-in-5g-networks/thread/696418599973044224-667213872962088960>