

Architectures fonctionnelles de transmission sans fils adaptées aux milieux industriels fortement bruités

Aamre Khalil

▶ **To cite this version:**

Aamre Khalil. Architectures fonctionnelles de transmission sans fils adaptées aux milieux industriels fortement bruités. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Lorraine, 2020. Français. NNT : 2020LORR0183 . tel-03176510

HAL Id: tel-03176510
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03176510

Submitted on 22 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Ecole doctorale IAEM-Lorraine

Architectures fonctionnelles de transmission sans fils adaptées aux milieux industriels fortement bruités

Thèse

Présentée et soutenue publiquement prévu le 28 septembre 2020

Par

Aamre KHALIL

Composition du jury

Rapporteurs :	Emmanuel Simeu	Maitre de Conférences - HDR, Université Grenoble Alpes
	Chafic Salame	Professeur, Université libanaise
Examinateurs :	Wilfried Uhring	Professeur, Université de Strasbourg
	Florence Azais	Chargé de Recherche CNRS, Université Montpellier II
	Mohamed Tabaa	Maitre de Conférences - HDR, EMSI Casablanca
Directeur :	Fabrice Monteiro	Professeur, Université Lorraine
Co-directeur :	Abbas Dandache	Professeur, Université Lorraine

Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance – LGIPM-
Bâtiment A de l'UFR MIM, 3 rue Augustin Fresnel, BP 45112, 57073, METZ Cedex 03

En ton nom et pour toi mon Dieu,
L'Omniscient et l'Omnipotent.
À mes parents.
À mes frères.
À la personne que j'aime.

Table des matières

Avant propos xiv

Introduction générale xvi

Partie I : État de l'art et étude théorique 1

Chapitre 1 : État de l'art 2

1.1. Introduction ... 3

1.2. Vue d'ensemble des technologies de communication industrielles filaire ... 3

1.2.1. Architecture des réseaux filaires d'automatisations industrielles ... 4

1.2.2. Réseaux et configuration des systèmes de communications industriels existant ... 5

1.2.2.1. Protocoles Ethernets industriels ... 5

1.2.3. Exigences et limites des réseaux filaires : ... 8

1.3. Evolution vers la communication sans fil industriel ... 8

1.3.1. Technologies de communications et réseaux de capteurs sans fil WSN ... 9

1.3.2. Standard IEEE 802.15.4 pour les communications sans fil ... 10

1.3.3. Avantages des réseaux non filaires ... 12

1.3.4. Problèmes et contraintes des communications sans fil ... 13

1.4. Réseaux de capteurs industriels sans fil IWSN ... 14

1.4.1. Architecture des plateformes IWSN ... 18

1.4.1.1. Topologie du réseau : ... 18

1.4.1.2. Schémas d'accès aux canaux ... 20

1.4.1.3. Couches d'interconnexion de systèmes ouverts (OSI) des IWSNs ... 20

1.4.2. Objectif des IWSN ... 23

1.4.3. WirelessHART ... 24

1.4.4. ISA100.11a ... 26

1.4.5. 6LoWPAN ... 27

1.4.6. ZIgbee ... 28

1.5. Les IWSN dans l'Internet des Objets Industriels IIOT 29
1.5.1. Internet des Objets connectés IOT 29
1.5.2. Industrie 4.0 31
1.5.3. Internet industriel et l'IOT 32
1.5.4. Rôles des IWSN dans l'internet industriel 33
1.5.5. Plateformes réseaux dédiés à l'IIOT 34
1.5.5.1. SIGFOX 34
1.5.5.2. LoRaWAN 34
1.5.5.3. NB-IoT 34
1.5.6. Protocoles de communication IOT : 35
1.5.6.1. MQTT 35
1.5.6.2. XMPP 35
1.5.6.3. AMQP 35
1.5.6.4. CoAP 35
1.5.6.5. DDS 35
1.6. Conclusion 35
Chapitre 2 : Modulation et codes correcteurs d'erreurs 36
2.1. INTRODUCTION 38
2.2. Techniques de modulations pour les réseaux de capteurs 38
2.2.1. QAM 39
2.2.2. PSK 41
2.2.3. FSK 44
2.3. ONDELETTE DISCRÈTE COMME TECHNIQUE DE MODULATION 46
2.3.1. Transformée en ondelettes continues (CWT) 46
2.3.2. Transformée en ondelettes discrètes DWT : 47
2.3.3. Analyse multi-résolutions et bancs de filtres 48
2.3.3.1. Analyse multi-résolutions 48
2.3.3.2. Bancs de filtres : 49
2.4. Familles des ondelettes : 52
2.4.1. Ondelette de HAAR : 53
2.4.2. Ondelette de Daubechies : 54
2.4.3. Ondelette de Symlet : 56
2.5. Transformée par paquets d'ondelettes discrète 57
2.5.1. IDWPT : 57
2.5.2. DWPT : 59

2.6. Codes correcteurs d'erreurs et améliorations de la communication 61
2.6.1. Capacite du canal de shannon : 61
2.6.2. Systemes a puissance limitee et a bande passante limitee 64
2.6.3. Efficacite de la bande passante des systemes modules 64
2.6.4. Codes de correction d'erreurs 64
2.6.5. Codes en bloc 64
2.6.6. Codage convolutif 66
2.6.7. Codes Reed Solomon 67
2.6.8. Contrôle de parité de faible densité (Low-density Parity Chec LDPC) 68
2.6.9. Rôle des codes correcteurs d'erreurs dans les IWSN 68
2.7. Conclusion 69
Partie II : Aspects fonctionnels et architecturaux 71
Chapitre 3 : Architecture fonctionnelle et canal industriel 72
3.1. Introduction 72
3.2. Environnement industriel de propagation 72
3.2.1. Conditions des milieux industriels 72
3.2.2. Caractéristiques d'un canal sans fil industriel 73
3.2.3. Bruit industriel 73
3.2.3.1. Bruit gaussien (AWGN) 73
3.2.3.2. Bruit impulsif 74
3.2.3.3. Canal multi-chemin : 75
3.2.4. Contraintes du milieu industriel bruité 76
3.2.4.1. Contraintes fréquentielles 77
3.2.4.2. Contraintes de capacité 78
3.2.4.3. Contraintes de disponibilité 78
3.2.5. Modèle de canal industriel utilisé 79
3.3. Architecture basée sur la modulation par ondelettes 80
3.3.1. Technique de modulation à la transmission 81
3.3.2. Technique de démodulation à la réception 81
3.4. Modes d'exploitations et scénarios 82
3.4.1. Mode Many to One (MtO) 82
3.4.2. La forme des signaux en émission et réception 83
3.4.3. Simulation des performances du mode MtO 84
3.4.4. Mode One to Many (OtM) 88
3.4.5. Simulation des performances du mode OtM 89

3.5. Conclusion 93

Chapitre 4 : Simulations en milieux industriel et amélioration des performances par les codes correcteurs d'erreurs 96

4.1. Introduction 95

4.2. Exploitation de l'architecture OtM 96

4.2.1. Performances de transmission dans un canal AWGN 97

4.2.2. Performances de transmission dans le canal industriel 99

4.3. Exploitation de l'architecture en MtO 101

4.3.1. Performances de transmission dans un canal AWGN 101

4.3.2. Performances de transmission dans le canal industriel 103

4.4. Combinaison des Reed Solomon et codes convolutifs 105

4.4.1. Technique de combinaison des codes correcteurs d'erreurs 105

4.4.2. Amélioration des performances sous OtM 106

4.4.3. Amélioration des performances sous MtO 107

4.5. Amélioration des performances par les Reed Solomon raccourcis 109

4.5.1. Reed Solomon Raccourci 109

4.5.2. Analyse comparative des codes Reed Solomon 109

4.5.3. Performances de communication sous OtM 110

4.6. Conclusion 112

Conclusion générale et perspectives 114

Publications 118

Bibliographie 120

Table des figures

1.1 Un exemple de la hiérarchie d'un système d'automatisation industrielle 5
1.2 Exemples de topologies de réseaux en étoile et en pair-à-pair 12
1.3 Classes de capteurs et applications de contrôle [16]. 16
1.4 Systèmes de capteurs pour les applications industrielles. 16
1.5 La taille du marché des WSN industriels installés dans le monde entier devrait être atteint d'ici 2025[27]. 17
1.6 Distribution des applications IWSN en 2018 [27] 18
1.7 Topologie maillée. 19
1.8 Topologie arborescente. 19
1.9 Topologie en étoile. 19
1.10 Pile de protocoles IWSN. 20
1.11 Familles de protocoles MAC sans fil. 21
1.12 problèmes de nœuds cachés et exposés. 22
1.13 Domaines d'application des IWSN. 23
1.14 Calendrier des plages horaires dans WirelessHART pour les dispositifs source et de destination. 25
1.15 Architecture de réseau ISA100.11a 26
1.16 Pile de protocoles 6LoWPAN [42] 28
1.17 pile de l'architecture ZigBee. 28
1.18 Les éléments clés de l'internet industriel [57] 33

2.1 Diagramme de constellation rectangulaire pour différentes valeurs de M pour la modulation MQAM. 39
2.2. Taux d'erreur sur les bits de MQAM pour différentes valeurs de points de la constellation M. 40
2.3 Diagramme de constellation pour différentes valeurs de M pour MPSK. 43
2.4 Taux d'erreur sur les bits de MPSK pour différentes valeurs de points de constellation M. 43
2.5 La modulation par déplacement de fréquence binaire 44
2.6 Banc de filtres d'analyse à 2 canaux. 50
2.7. Banc de filtres de synthèse à 2 canaux 51
2.8 Réponse impulsionnelle des filtres db4 et sym4 55
2.9 Fonction d'ondelettes de Daubechies 56
2.10 Schéma de levage des filtres de prédiction et de mise à jour 57
2.11 Décomposition et reconstruction à un niveau 57
2.12 Perspective de l'arborescence binaire complète de l'IDWPT pour le multiplexage orthogonal de quatre sous-porteuses [83][84]. 58
2.13 Perspective alternative de l'IDWPT pour le multiplexage orthogonal de quatre sous-porteuses [83][84]. 58

2.14 Perspective de l'arborescence binaire complète du DWPT pour démultiplexer orthogonalement quatre sous-porteuses [83][84]. 60
2.15 Perspective alternative du DWPT pour démultiplexer orthogonalement quatre sous-porteuses [83][84]. 60
2.16 Schéma de principe d'un système de communication numérique 61
2.17 Courbe de capacité du canal pour le canal AWGN 64
2.18 Code de bloc systématique 65
2.19 Codage par convolution 67

3.1 La simulation du canal sous bruit AWGN et sous AWGN plus le bruit impulsif 81
3.2 Architecture fonctionnel émetteur-récepteur 82
3.3 Banc de filtres de synthèse à 4 canaux 82
3.4 Banc de filtres d'analyse à 4 canaux. 83
3.5 Mode de transmission MtO 83
3.6 Architecture de transmission MtO 84
3.7 Signaux émis en MtO 84
3.8 Signal reçu après DWPT de l'utilisateur 2 85
3.9 BER pour un canal AWGN en MtO 8 utilisateurs 86
3.10 BER pour un canal industriel en MtO 8 utilisateurs 87
3.11 BER pour un canal AWGN en MtO 16 utilisateurs 88
3.12 BER pour un canal industriel en MtO 16 utilisateurs 89
3.13 BER pour un canal AWGN en MtO 32 utilisateurs 90
3.14 BER pour un canal industriel en MtO 32 utilisateurs 91
3.15 Mode de transmission OtM 90
3.16 Architecture de transmission OtM 90
3.17 BER pour un canal AWGN en OtM 8 utilisateurs 91
3.18 BER pour un canal industriel en OtM 8 utilisateurs 92
3.19 BER pour un canal AWGN en OtM 16 utilisateurs 92
3.20 BER pour un canal industriel en OtM 16 utilisateurs 93
3.21 BER pour un canal AWGN en OtM 32 utilisateurs 93
3.22 BER pour un canal industriel en OtM 32 utilisateurs 94

4.1 Architecture de communication avec codage. 97
4.2 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 8 récepteurs en mode OtM. 98
4.3 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 16 récepteurs en mode OtM. 99
4.4 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 32 récepteurs en mode OtM. 99
4.5 BER dans un canal industriel à R=50 sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 8 récepteurs en mode OtM. 100
4.6 BER dans un canal industriel à R=50 sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 16 récepteurs en mode OtM. 100
4.7 BER dans un canal industriel à R=50 sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 32 récepteurs en mode OtM. 101
4.8 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 8 utilisateurs en mode MtO. 103
4.9 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 16 utilisateurs en mode MtO. 103
4.10 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 32 utilisateurs en mode MtO 104

4.11 BER dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 8 utilisateurs en mode MtO 104
4.12 BER dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 16 utilisateurs en mode MtO 105
4.13 BER dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 32 utilisateurs en mode MtO 105
4.14 Architecture de communication avec combinaison de codage 107
4.15 Exemple d'entrelacement matriciel 107
4.16 Comparaison des performances SNR pour un BER de 0.1 dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif, codage Reed Solomon et combinaison des codages en mode OtM 108
4.17 Comparaison des performances SNR pour un BER de 0.1 dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif, codage Reed Solomon et combinaison des codages en mode OtM 108
4.18 Comparaison des performances SNR pour un BER de 0.1 dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif, codage Reed Solomon et combinaison des codages en mode MtO 108
4.19 Comparaison des performances SNR pour un BER de 0.1 dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif, codage Reed Solomon et combinaison des codages en mode MtO 108
4.20 Comparaison des performances des différentes combinaison de RS dans un canal AWGN 111
4.21 BER dans un canal AWGN avec la combinaison des CC, RS et RS raccourcis pour le mode OtM 112
4.22 BER dans le canal industriel avec la combinaison des CC, RS et RS raccourcis pour le mode OtM 112

Liste des tableaux

1.1 IEEE 802.15.4 Bande RF 11

2.1 Efficacité de la largeur de bande du MAQ pour différentes valeurs de M. 39
2.2 Bande passante de transmission et efficacité de la bande passante PSK pour différentes valeurs de M 43
2.3 Propriétés des familles d'ondelettes soutenues de manière compacte [74] [75] 52

3.1 Dispersion des retards τ_{rms}réelles 77
3.2 Puissances simulés et retards des canaux LOS et NLOS [114] 77
3.3 Paramètres de simulation 86
3.4 Paramètres de simulation 91

4.1 Paramètres de simulation 98
4.2 SNR en dB à un BER linéaire fixe de 0,1 pour un canal AWGN et le canal industriel sous le mode OtM avec 8,16 et 32 récepteurs 101
4.3 Paramètres de simulation 102
4.4 SNR en dB à un BER linéaire fixe de 0,1 pour un canal AWGN et le canal industriel sous le mode MtO avec 8,16 et 32 utilisateurs 106
4.5 SNR en dB à un BER linéaire fixe de 0,1 pour un canal AWGN et le canal industriel sous les modes MtO et OtM 110
4.6 Taux de codage et capacité de correction des erreurs 111
4.7 SNR en dB à un BER linéaire fixe de 0,1 pour un canal AWGN et le canal industriel sous les modes OtM 112

Liste des acronymes

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACK	Acknowledgement
ADU	Application Data Unit
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
AMRT	Accès multiple par répartition dans le temps
ANSI	American National Standards Institute
APDU	Application protocol data unit
APSDE	Application support data entity
APSME	Application support management entity
AMR	Analyse multi-résolutions
ASK	Amplitude Shift Keying
AWGN	Additive white Gaussian noise
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary phase-shift keying
CAN	Controller Area Network
CCI	Commodity Channel Index
COAP	Constrained Application Protocol
CRC	Contrôle de redondance cyclique
CSMA	Carrier Sense Medium Access
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CWT	Continuous wavelet transform
DCS	Distributed control system
DDS	Data Distribution Service
DWPT	Discrete wavelet packet transform
DWT	Discrete wavelet transform
FEC	Forward error correction
FFD	Reduced Function Device
FSK	Frequency-Shift Keying
GPS	Global Positioning System
GTS	Guaranteed Time Slot
HART	Highway Addressable Remote Transducer
HPF	High-pass filter
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IDWPT	Inverse discrete wavelet packet transform
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IIC	Industrial Internet Consortium
IIOT	Industrial internet of things
IOT	Internet of things
ISM	Industriel, scientifique et médical
IWSN	Industrial wireless sensor network
LAN	Local Area Network
LDPC	low-density parity-check
LLC	Logical Link Control
LOS	Line-of-sight

LPF	Low-pass filter
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine 2 machine
MAC	Media Access Control
MCU	Microcontrôleur
MDPQ	Mobile Device Proficiency Questionnaire
MIC	Message integrity code
MPDU	MAC protocol data unit
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NB-IOT	Narrowband IoT
NLOS	Non- line-of-sight
NRZ	Non-retour à zéro
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
OMG	Object Management Group
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
Pan ID	Personal Area Network identification
PDP	Panneau de distribution de puissance
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Couche physique
PLC	Programmable logic controller
PPDU	PHY Protocol Data Unit
QoS	Quality of service
RFD	reduced function devices
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SNR	Signal-to-noise ratio
SPE	Spatial Processe estimation
TDMA	Time-division multiple access
UCMM	unconnected messages
ULB	Ultra large bande
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWB	Ultra wideband
WAN	Wide Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless personal Area Network
WPM	Wavelet packet modulation
WPT	Wavelet packet transform
WSN	Wireless sensor network
XMPP	Extensible Messaging and Presence Protocol

Avant propos

Ce projet de thèse effectué sous la direction du professeur Fabrice Monteiro et la co-direction du professeur Abbas Dandache. Les travaux ont été menés dans le laboratoire LGIPM (Laboratoire de Génie Informatique, de Production et de Maintenance) au sein de l'équipe ASC (Architectures des Systèmes Complexes coopératifs embarqués sûrs).

Les travaux précédents de notre équipe ont fait l'objet de plusieurs thèses et publications se focalisant sur les architectures dédiées au traitement des codes correcteurs d'erreurs, les architectures de processeurs, les architectures de réseaux sur puce et les architectures pour les transmissions sans fil à haut débit et à faible coût énergétique, adaptés pour les réseaux de capteurs sans fil WSN et réseaux de capteurs industriels sans fil IWSN, en se focalisant sur les aspects performances, fiabilités et configurabilités.

Cette étude se veut d'être une contribution aux travaux précédents de l'équipe, notamment le travail du Dr Mohamed Tabaa qui s'inscrit dans le domaine des réseaux de capteurs par radio impulsionnelle exploitant la technologie ULB-RI, ainsi que le travail du Dr Mouhamad Chehaitly qui a développé une architecture numérique adaptative pour les systèmes de transmission sans fil fiables utilisant la modulation par paquets d'ondelettes discrètes, et en fin le travail du Dr Safa Saadaoui modélisant un canal industriel de transmission avec une architecture fonctionnelle basée sur les ondelettes utilisant la transformé inverse par paquets d'ondelettes discrètes IDWPT dans la transmission, et la transformé par paquets d'ondelettes discrètes à la réception.

Ainsi, nous avons proposé dans notre travail des solutions pour améliorer le rendement de notre architecture, en particulier l'intégration des codes correcteurs d'erreurs pour réduire l'impact du bruit sur les transmissions dans les milieux industriels, par conséquent renforcer la fiabilité du système, en ajoutant à cela l'exploitation de plusieurs scénarios et techniques de transmission multi-utilisateur pour de meilleures performances et une configurablité adaptés aux milieux industriels.

Introduction générale

Avec le succès de ces dernières années des technologies sans fil dans l'électronique grand public, des technologies sans fil standard sont envisagées pour un déploiement dans les environnements industriels également. Les applications industrielles impliquant des sous-systèmes mobiles ou simplement le désir d'économiser le câblage rendent les technologies sans fil attrayantes. Néanmoins, ces applications sont souvent soumises à des exigences strictes en matière de fiabilité et de délais. Dans les environnements câblés, la synchronisation et la fiabilité sont bien assurées par les systèmes de bus de terrain (qui sont une technologie mature conçue pour permettre la communication entre les contrôleurs numériques et les capteurs et actionneurs en interface avec un processus physique). Lorsque des liaisons sans fil sont incluses, les exigences en matière de fiabilité et de synchronisation sont nettement plus difficiles à satisfaire, en raison des propriétés défavorables des canaux radio.

L'automatisation industrielle est l'un des anciens domaines qui a récemment fait l'objet de nombreuses recherches et études sur les communications et réseaux de capteurs sans fil. Le WSN offre une solution alternative peu coûteuse, nécessitant peu de maintenance, facile à installer et à utiliser, flexible et évolutive pour les systèmes câblés actuels de l'industrie. Néanmoins, les exigences du WSN pour l'industrie par rapport au WSN général ont conduit à l'émergence des réseaux de capteurs sans fil industriels IWSN. Ils ont pour but de fournir les réseaux WSN à l'environnement industriel difficile sans réduire les paramètres de qualité nécessaires qui doivent être respectés ; en d'autres termes, fournir une communication sans fil fiable, robuste et rapide pour les applications critiques malgré les défis possibles dus à la nature de l'environnement industriel tels que la propagation par trajets multiples causés par des obstacles, le bruit d'autres dispositifs, l'interférence et la coexistence dans la bande ISM.

Le terme « usine intelligente » est apparu comme une révolution industrielle en raison des avancées technologiques qui ont émergé. Le concept de fabrication intelligente apparaît en Allemagne comme la 4ème révolution industrielle (Industrie 4.0). Sa principale portée est la mise en œuvre de la communication des machines, à la fois verticalement et horizontalement dans la hiérarchie de fabrication par l'intermédiaire de l'Internet des objets (IoT). En outre, il s'appuie sur les visions et les outils des précédents paradigmes de fabrication, allant des machines à faible coût et dédiées aux machines très variées et flexibles, mais promettant de nouveaux niveaux de réactivité, de flexibilité et de productivité en intégrant l'utilisation des IWSN. Dans le travail de cette thèse, nous avons proposé une architecture de communication sans fil numérique fonctionnelle pouvant opérer dans un milieu industriel fortement bruité, et qui est basé sur l'utilisation de la modulation par ondelettes, renforcé par l'utilisation des codes correcteurs d'erreurs.

Cette recherche peut potentiellement résoudre la question de la recherche d'un système de modulation plus efficace sur le plan de l'utilisation de la bande passante, de complexité et de meilleures performances, dont les performances peuvent être supérieures à celles des systèmes actuels. La modulation par paquets d'ondelettes (WPM) s'est avérée être une technique efficace avec des caractéristiques intéressantes comme son adaptabilité et sa flexibilité et ses caractéristiques améliorées par rapport à l'OFDM. Grâce à la WPT et des bancs de filtres, on est capable de générer des impulsions orthogonales en fréquence et en temps permettant de les intégrer dans des systèmes de communications sans fil souples à base de modulation multiporteuse. Le choix de l'onde adéquate permet d'atteindre l'optimum grâce à la propriété de la multirésolution temps/fréquence des systèmes. Avec cela, s'ajoute

l'utilisation de la transformée en paquets d'ondelettes discrètes, qui permet de réduire significativement la sensibilité aux interférences subite dans le canal de propagation, au moyen de la caractéristique d'orthogonalités. Les environnements industriels bruités s'accompagnent de contraintes difficiles à affronter, telles que le retard dû aux effets de réflexion, de diffraction et de diffusion, le bruit provenant des champs électriques et le taux d'erreur sur les bits (BER) relativement élevé. Ces inconvénients ont des effets destructeurs sur les performances de la transmission de données sans fil. Ce problème peut être résolu par l'utilisation des codes correcteurs d'erreurs. Le codage FEC a le potentiel d'accroître la fiabilité en améliorant les BER, ce qui permet de réduire le nombre de retransmissions nécessaires. On peut alors obtenir à la fois une amélioration de la latence des nœuds du réseau. Pour maximiser l'efficacité des codes FEC, la puissance du code doit être adaptée à l'état actuel du canal. Plus l'état du canal est mauvais, plus le code FEC doit être puissant. Cependant, pour obtenir une stratégie de codage optimisée, nous avons travaillé dans cette thèse sur deux types de codes largement utilisés dans les IWSN, les Reed Solomon et les codes convolutifs, que nous avons adaptés à notre architecture pour avoir de meilleurs résultats.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la comparaison des performances des codes correcteurs d'erreurs sous plusieurs combinaisons, appliqué à un système de communication multi-utilisateur basé sur la modulation par ondelettes, destiné à être utilisé dans un environnement industriel fortement bruité. L'architecture sera exploitée sous deux modes, le premier est le One to Many OtM avec une communication entre un émetteur et plusieurs récepteurs, le second est le mode Many to One MtO avec une communication entre plusieurs émetteurs et un récepteur. Le fonctionnement de l'architecture sera simulé dans un canal industriel proposé dans nos travaux de recherche, qui s'approche le mieux d'un vrai environnement bruité, et son rendement sera amélioré grâce à l'utilisation des deux codes précédemment mentionnés, une technique de combinaison de ces deux codes sera aussi proposée tout en utilisant la méthode de raccourcissement des Reed Solomon pour améliorer et optimiser la performance et le rendement énergétique de l'architecture.

Ce rapport est composé de 4 chapitres décrits ci-dessous :

Le premier chapitre est un état de l'art qui décrit l'évolution de la communication numérique industrielle, en passant par une vue d'ensemble des technologies de communication filaire industrielle vers la non-filaire. Nous allons tout d'abord décrire les standards utilisés et les problématiques rencontrées dans le milieu industriel, puis nous allons discuter des réseaux de capteurs sans fil industriels IWSN, leur rôle dans les environnements industriels, les problèmes qui apparaissent lors de leur déploiement ainsi que les technologies et les mises en œuvre actuelles du sans-fil. Te nous allons finir par une présentation de l'industrie 4.0 en passant par l'internet des objets IOT et l'internet industriel et ces standards.

Le chapitre 2 commence par présenter les concepts de base des systèmes de modulation numérique les plus répandus dans les réseaux de capteurs sans fil, des schémas de modulation et de démodulation expliqués en détail. On présente ensuite le concept de base des ondelettes, puis la définition de la transformée continue et discrète et l'analyse multirésolutions et bancs de filtres. On présente ensuite certaines propriétés importantes des familles d'ondelettes. Les paquets d'ondelettes discrètes sont ensuite définis et la représentation de la transformation par paquet d'ondelettes discrètes et de la transformation inverse est également donnée. Ce chapitre finira par une introduction au concept des codes correcteurs d'erreurs, avec leur rôle dans l'amélioration des performances des systèmes de communications et Réseaux de capteurs sans fil.

Le chapitre 3 commencera par fournir un contexte théorique des conditions des milieux industriels bruités, et de ses principales caractéristiques avec une présentation des différentes contraintes de ce type de milieu, en expliquant en détail le modèle de canal industriel que nous allons utiliser tout au long des simulations. La partie suivante portera sur notre proposition architecturale au niveau fonctionnel, ayant pour but d'offrir une bonne exploitation de modulation par paquets d'ondelettes discrètes et

codage/décodage par des codes correcteurs d'erreur, tout en visant la minimisation de la consommation pour une utilisation multiutilisateur, avec deux modes d'exploitation : Many to One (MtO) pour une utilisation depuis plusieurs utilisateurs vers un seul récepteur, et One to Many (OtM) pour une utilisation avec un seul utilisateur vers plusieurs récepteurs. Les performances de notre architecture seront évaluées en présence de bruit additif gaussien et bruit industriel.

Le dernier chapitre portera principalement sur la recherche d'une bonne configuration de codage avec les codes de correction d'erreurs, principalement les Reed Solomon et les codes convolutifs, pour améliorer la fiabilité de notre architecture de communication numérique. Dans ce chapitre, notre architecture sera testée et simulée pour différentes configurations utilisateurs/codages avec nos deux modes de transmissions. Le choix de l'ondelette optimale a été déjà choisie dans une étude précédente. Par la suite, plusieurs simulations avec les différentes modes du canal de propagation industriel seront effectuées dans l'objectif d'améliorer la fiabilité de notre architecture multiutilisateur avec l'utilisation d'un code correcteur d'erreur à la fois. Les performances sur le plan des taux d'erreur binaire (BER) seront évaluées. Deux techniques seront exploitées pour renforcer la robustesse de l'architecture de communication, en utilisant une combinaison de deux codes correcteurs d'erreur différents, ensuite l'utilisation des codes Reed Solomon raccourcis pour de meilleurs résultats.

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale ainsi que des perspectives et travaux futurs.

Première partie
État de l’art et étude théorique

Chapitre 1
État de l'art

1.1. Introduction **3**
1.2. Vue d'ensemble des technologies de communication industrielles filaire **3**
1.2.1. Architecture des réseaux filaires d'automatisations industrielles 4
1.2.2. Réseaux et configuration des systèmes de communications industriels existant 5
1.2.2.1. Protocoles Ethernets industriels 5
1.2.3. Exigences et limites des réseaux filaires : 8
1.3. Evolution vers la communication sans fil industriel **8**
1.3.1. Technologies de communications et réseaux de capteurs sans fil WSN 9
1.3.2. Standard IEEE 802.15.4 pour les communications sans fil 10
1.3.3. Avantages des réseaux non filaires 12
1.3.4. Problèmes et contraintes des communications sans fil 13
1.4. Réseaux de capteurs industriels sans fil IWSN **14**
1.4.1. Architecture des plateformes IWSN 18
1.4.1.1. Topologie du réseau : 18
1.4.1.2. Schémas d'accès aux canaux 20
1.4.1.3. Couches d'interconnexion de systèmes ouverts (OSI) des IWSNs 20
1.4.2. Objectif des IWSN 23
1.4.3. WirelessHART 24
1.4.4. ISA100.11a 26
1.4.5. 6LoWPAN 27
1.4.6. ZIgbee 28
1.5. Les IWSN dans l'Internet des Objets Industriels IIOT **29**
1.5.1. Internet des Objets connectés IOT 29

1.5.2. Industrie 4.0 31
1.5.3. Internet industriel et l'IOT 32
1.5.4. Rôles des IWSN dans l'internet industriel 33
1.5.5. Plateformes réseaux dédiés à l'IIOT 34
1.5.5.1. SIGFOX 34
1.5.5.2. LoRaWAN 34
1.5.5.3. NB-IoT 34
1.5.6. Protocoles de communication IOT : 35
1.5.6.1. MQTT 35
1.5.6.2. XMPP 35
1.5.6.3. AMQP 35
1.5.6.4. CoAP 35
1.5.6.5. DDS 35
1.6. Conclusion 35

1.1. Introduction

Grâce au succès et au développement constant des technologies sans fil, de plus en plus d'applications pour les réseaux sans fil apparaissent chaque jour dans le domaine industriel, donnant forme au concept d'usine intelligente où les capteurs et les actionneurs peuvent interagir intelligemment entre eux afin de créer des étages de fabrication intelligents avec une gestion plus efficace des ressources, des pertes d'énergie minimales et des capacités d'autorécupération en cas de défaillance. C'est pour cela que ce chapitre représente un état de l'art de l'évolution de la communication industriel depuis en premiers lieux la technologie de communication filaire avec une présentation de son concept, ses architectures et ses limites. Par la suite, nous allons décrire de la même manière l'évolution vers les technologies de communications sans fil en présentant ses avantages et inconvénients. Ce qui ouvrira après une partie sur les réseaux industriels de capteurs sans fil et ses architectures principales. Et pour conclure, nous allons parler du rôle que jouent les IWSN dans l'internet des objets industriels.

1.2. Vue d'ensemble des technologies de communication industrielles filaire

Dans presque toutes les usines et tous les sites industriels, les liens de communication transportent des informations vitales entre les machines, les commandes et les dispositifs de surveillance. Des mises à jour périodiques à la gestion continue des processus et de la fabrication, un flux de données stable et sûr est essentiel aux opérations. Une grande partie des informations de contrôle et d'état transférées dans les environnements industriels — position de l'actionneur, température ou niveaux de liquide, par exemple — sont transmises par de petites trames qui nécessitent une largeur de bande et une vitesse de connexion relativement faibles. À l'autre bout, la transmission de fichiers volumineux, tels que les journaux d'activité d'un cycle de production, nécessite le déplacement très efficace d'un grand nombre de données. Un réseau de communication industriel est une épine dorsale pour toute architecture de système d'automatisation, car il constitue un moyen puissant d'échange de données, de contrôle des données et de flexibilité pour connecter divers appareils.

L'utilisation de réseaux de communication numériques dans les industries au cours de la dernière décennie a permis d'améliorer la précision et l'intégrité des signaux numériques de bout en bout. Ces réseaux, qui peuvent être soit un LAN (Local Area Network, qui est utilisé dans une zone limitée) soit un WAN (Wide Area Network, qui est utilisé comme système global), permettent de communiquer de grandes quantités de données en utilisant un nombre limité de canaux. La mise en réseau industrielle a également conduit à la mise en œuvre de divers protocoles de communication entre des contrôleurs numériques, des appareils de terrain, divers outils logiciels liés à l'automatisation et également à des systèmes externes.

La communication de données fait référence à la transformation d'informations ou de données, le plus souvent sous forme numérique, d'un émetteur à un récepteur par une liaison (qui peut être un fil de cuivre, un câble coaxial, une fibre optique ou tout autre support) reliant ces deux éléments. Les réseaux de communication traditionnels sont utilisés pour permettre la communication de données entre les ordinateurs, les ordinateurs et leurs périphériques et autres dispositifs. D'autre part, le réseau de communication industriel est un type spécial de réseau conçu pour assurer le contrôle en temps réel et l'intégrité des données dans des environnements difficiles sur de grandes installations.

Les exemples de réseaux de communication industriels comprennent Ethernet, Modbus, DeviceNet, ControlNet, etc. Les trois principaux mécanismes de contrôle utilisés dans le domaine de l'automatisation industrielle sont les automates programmables PLC, le contrôle et l'acquisition de données SCADA et le système de contrôle distribué DCS. Tous ces éléments concernent les instruments de terrain, les appareils de terrain intelligents, les PC de contrôle de supervision, les contrôleurs d'E/S distribués et les combinaisons interfaces homme machine IHM.

1.2.1. Architecture des réseaux filaires d’automatisations industrielles

Les systèmes de communications industrielles peuvent être très complexes, et ils sont généralement structurés en plusieurs niveaux hiérarchiques. Chaque niveau hiérarchique a un niveau de communication approprié, ce qui impose des exigences différentes au réseau de communication. La figure 1.1 présente un exemple de la hiérarchie d’un système d’automatisation industrielle.

Les différents niveaux doivent répondre aux différentes exigences d’un niveau particulier. Il est donc évident qu’aucun réseau de communication ne répond à lui seul aux exigences de chaque niveau. Par conséquent, les différents niveaux peuvent utiliser des réseaux différents en fonction des exigences telles que le volume de données, la transmission de données, la sécurité des données, etc. En fonction de leur fonctionnalité, les réseaux de communication industriels sont classés en trois niveaux généraux qui sont examinés ci-dessous.

- **Niveau du terrain :** Le niveau le plus bas de la hiérarchie de l'automatisation est le niveau du terrain, qui comprend les appareils de terrain tels que les actionneurs et les capteurs. Les appareils de terrain élémentaires sont parfois classés comme le sous-niveau de l'élément. La tâche des appareils de terrain consiste à transférer des données entre le produit fabriqué et le processus technique. Les données peuvent être à la fois binaires et analogiques. Les valeurs mesurées peuvent être disponibles pour une courte période ou pour une longue période. Les réseaux industriels de terrain constituent une grande catégorie, qui se distingue par des caractéristiques telles que la taille des messages et le temps de réponse. En général, ces réseaux connectent des dispositifs intelligents qui travaillent en coopération dans un réseau distribué à temps critique. Ils offrent des capacités de diagnostic et de configuration de niveau supérieur, généralement au prix d'une intelligence, d'une puissance de traitement et d’un prix plus élevé.

La technologie de communication la plus sophistiquée utilisée à ce niveau est un bus de terrain (par exemple ProfiNET, Profibus, HART, ControlNet, DeviceNet, CAN Bus et Foundation Field Bus), qui permet un contrôle réparti entre les appareils de terrain et les contrôleurs intelligents.

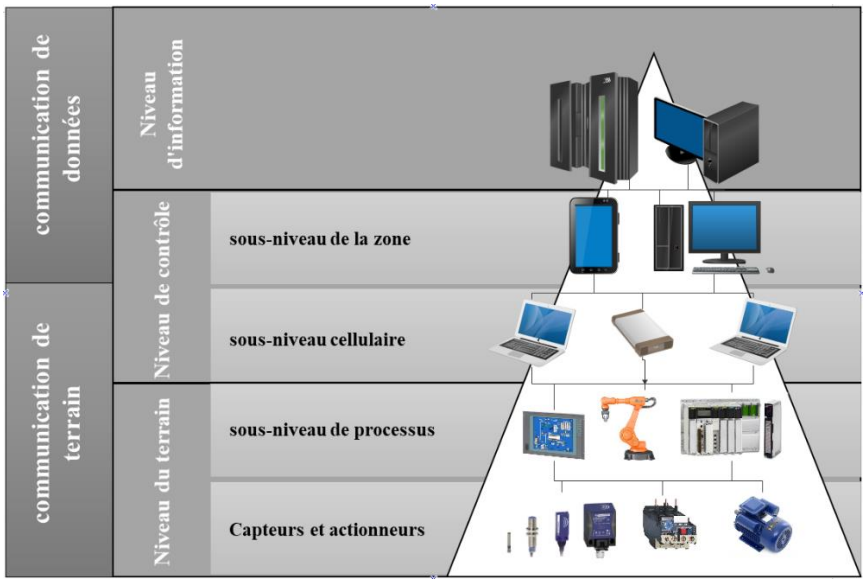


Figure 1.1. Un exemple de la hiérarchie d'un système d'automatisation industrielle.

- **Niveau de contrôle :** Au niveau du contrôle, le flux d'informations consiste principalement en un chargement de programmes, de paramètres et de données. Dans les processus où les temps d'arrêt des machines et les réajustements sont courts, cela se fait pendant le processus de production. Dans les petits contrôleurs, il peut être nécessaire de charger des sous-programmes au cours d'un cycle de fabrication. Cela détermine les exigences en matière de synchronisation. Il peut être divisé en deux : les sous-niveaux de cellule et de zone.
- **Niveau d'information :** Il s'agit du niveau supérieur du système d'automatisation industrielle qui recueille les informations de son niveau inférieur, c'est-à-dire le niveau de contrôle. Il traite de grands volumes de données qui ne sont ni en usage constant ni critiques en termes de temps. Des réseaux à grandes échelles existent à ce niveau. Les réseaux étendus Ethernet sont donc couramment utilisés comme réseaux au niveau de l'information pour l'échange d'informations de planification et de gestion des usines. Parfois, ces réseaux peuvent se connecter à d'autres réseaux industriels via des passerelles.

1.2.2. Réseaux et configuration des systèmes de communications industriels existant

Il existe de nombreux réseaux de communication différents conçus pour interconnecter des appareils de terrain industriels et divers modules d'E/S. Ils sont décrits sur la base de certains protocoles. Un protocole est un ensemble de règles qui sont utilisées dans la communication entre deux ou plusieurs appareils. Sur la base de ces protocoles, les réseaux de communication sont classés en plusieurs types. Certaines normes de communication industrielles courantes et populaires sont décrites ci-dessous.

1.2.2.1. Protocoles Ethernets industriels

Tout comme les protocoles de bus de terrain, l'Ethernet industriel est un protocole de communication bidirectionnel entièrement numérique. Actuellement, les protocoles de bus de terrain sont plus populaires que l'ethernet dans la section des protocoles industriels entièrement numériques, mais la popularité de l'ethernet augmente chaque année. L'ethernet industriel est largement utilisé depuis des années déjà au niveau du routage des systèmes de traitement. L'ethernet industriel utilise une méthode de poignée de main pour confirmer que les commandes sont reçues par l'appareil. Le contrôleur continue à envoyer la commande jusqu'à ce que le dispositif récepteur vérifie la commande avec une réponse.

Les complications qui ont empêché une plus large utilisation de l'Ethernet industriel sont souvent des éléments environnementaux sévères des usines de traitement. L'Ethernet a été adapté pour la première fois dans un environnement de bureau où la saleté, les vibrations ou la température ne sont pas un problème. Lorsque l'Ethernet est utilisé dans un environnement industriel, il peut être nécessaire d'utiliser des composants plus robustes, comme des connecteurs avec une protection IP67 [1].

L'un des avantages de l'Ethernet industriel par rapport aux protocoles de bus de terrain est qu'une vitesse de transfert de données plus élevée de 100 Mbps permet un contrôle plus précis des applications et réduit le risque de collision de données, ce qui est particulièrement important dans les processus où la vitesse et les temps de réponse sont critiques. En outre, l'Ethernet industriel permet d'étendre considérablement les réseaux grâce à la mise en cascade des commutateurs [2].

a. HART :

Le protocole HART est né du besoin économique de combiner les propriétés numériques et la boucle de courant 4-20mA dans un seul câble. Il a été développé à l'origine par Emerson Electric Co. dans les années 1980, mais a ensuite été complètement ouvert et les droits ont été transférés à Field COMM Group en 2015. Field COMM Group est le résultat de la fusion des actifs de Fieldbus Foundation et de la HART Communication Foundation, sa mission est de promouvoir des normes mondiales pour l'intégration des dispositifs numériques aux systèmes sur site et de diriger le développement d'un modèle d'information unifié des dispositifs d'automatisation des processus sur le terrain.

Au fil des ans, le protocole HART a fait l'objet de plusieurs révisions pour améliorer ses capacités et ajouter de nouvelles fonctionnalités sans compromettre sa compatibilité avec les anciens appareils. La révision 4 a introduit l'identification facultative du fabricant, qui est devenue obligatoire plus tard dans la version 5. Avec la révision 6, les caractéristiques électriques des actionneurs et autres dispositifs de sortie ont été définies, davantage d'informations d'état ont été ajoutées aux dispositifs et de nouvelles couches physiques ont été introduites pour une communication plus rapide entre le dispositif et le(s) hôte(s). La dernière révision est la révision 7, qui a introduit la couche physique radio WirelessHART 2.4GHz et la transmission de messages HART sur les réseaux basés sur le protocole Internet (HART-IP) [3].

b. DeviceNet :

DeviceNet est un réseau numérique multipoint permettant de connecter des dispositifs industriels simples (capteurs et actionneurs) et des dispositifs de haut niveau (automates programmables et ordinateurs). Il est généralement utilisé dans l'automatisation industrielle et de processus, principalement aux États-Unis, et il gagne maintenant en popularité en Europe, au Japon et en Chine. DeviceNet suit le modèle OSI (Open System Interconnection) qui spécifie sept cadres de couches pour la mise en œuvre des protocoles de réseau.

Les couches de liaison physique et de données de DeviceNet sont définies par la spécification CAN. CAN a été développé par Bosch en Allemagne pour le marché automobile européen afin de remplacer la complexité du câblage coûteux pour un réseau automobile à faible coût. DeviceNet utilise une topologie tronc/ligne/départ, ce qui signifie que la source d'alimentation et le câblage du signal se

trouvent dans un bus à paires torsadées séparé. Grâce à cette topologie, les nœuds peuvent être retirés et insérés avec le réseau en marche, ce qui permet de réduire les temps d'arrêt de la production. L'alimentation électrique du réseau est fournie par une source d'énergie connectée directement au réseau, qui alimente les émetteurs-récepteurs CAN des nœuds.

Devicenet est un réseau basé sur la connexion. Chaque nœud de DeviceNet est établi par un UCMM[3] ou un port non connecté du groupe 2. En outre, ces nœuds peuvent être un client, un serveur ou les deux. Les connexions de dispositifs clients typiques s produisent des demandes et consomment des réponses. Les dispositifs de serveur typiques effectuent le contraire, consomment les demandes et produisent des réponses. Les télégrammes DeviceNet utilisent l'identifiant CAN 11-bits uniquement pour identifier chacun des messages. Ces télégrammes sont divisés en quatre groupes. DeviceNet utilise le protocole industriel ouvert CIP dans la couche application, ce protocole est strictement orienté vers les objets et il est également utilisé dans ControlNet et EtherNet/IP ; cela signifie qu'il est indépendant du support physique et de la couche liaison de données.

c. Modbus :

Modbus est largement utilisé dans l'industrie, généralement pour transmettre des signaux provenant d'appareils d'instrumentation et de contrôle vers un contrôleur principal ou un système de collecte de données. Les données sont envoyées par bits binaires à un rythme défini : le débit en bauds. Indépendamment de la couche, une simple unité de données de protocole (PDU) est utilisée, qui spécifie comment les données sont transférées. Selon l'utilisation de la couche, des champs supplémentaires sont utilisés, il s'agit de l'ADU (Application Data Unit). Le Modbus utilise des méthodes de demande/réponse pour communiquer et les actions sont spécifiées par des codes de fonction.

Une requête lancée par un client vers un serveur contiendra des informations sur l'adresse du serveur, le format de cette adresse dépend de la couche mais la règle de base est de s'assurer que chaque appareil a une adresse unique. Le code de fonction est utilisé pour spécifier au serveur l'action à effectuer, il est codé en 1 octet allant de 1 à 255 décimales. Les champs de données sont des informations supplémentaires que le serveur peut utiliser en fonction du code de fonction reçu. Le champ de données peut être vide, et dans ce cas cela signifie que le serveur n'a pas besoin d'informations supplémentaires, seul le code de fonction spécifie l'action. Par exemple, pour demander des données à un appareil, le code de fonction demandera de lire certains registres et le champ de données spécifiera lesquels. En cas de fonctionnement correct, le serveur lancera une réponse contenant le même code de fonction et dans le champ de données la réponse de données, par exemple les données demandées. En cas d'erreur, le champ de données contient un code d'exception qui peut être utilisé par le client. Enfin, des contrôles d'erreurs supplémentaires peuvent également exister selon l'ADU.

L'utilisation du protocole Modbus permet à des appareils tiers de se connecter aux onduleurs à condition qu'une "carte de registre" soit fournie pour comprendre comment les données sont organisées. Cependant, le manque de standardisation est un réel problème : pour la programmation, un code différent doit être écrit pour chaque modèle d'onduleur car tous peuvent avoir une cartographie spécifique et il est nécessaire de s'appuyer sur les documents fournis par le fabricant qui ne sont pas toujours mis à jour au même rythme que les onduleurs.

d. Profibus PA :

Le protocole PROFIBUS PA est l'un des nombreux protocoles Profibus qui sont construits sous l'organisation mère de Profibus International. Ce qui différencie Profibus PA des autres protocoles est qu'il est conçu spécifiquement pour l'automatisation des processus. Profibus PA a été conçu pour fonctionner dans des environnements dangereux et pour être utilisé avec Profibus DP par l'intermédiaire du coupleur DP/PA. Le Profibus PA combine la méthodologie maître-esclave et le passage de jetons dans un réseau maître-esclave, où les maîtres envoient des commandes aux esclaves et les esclaves

répondent en conséquence. Chaque segment de réseau du Profibus PA contient jusqu'à 31 appareils esclaves. La topologie commune du Profibus est la topologie de bus, où tous les dispositifs sont connectés par un nœud à un seul câble. L'inconvénient de cette topologie est que si le câble est rompu, l'ensemble du segment de bus tombe en panne. Une autre topologie commune est la topologie en étoile, où chaque appareil est connecté indépendamment à un contrôleur central. La topologie en étoile nécessite plus de câble mais est plus résistante aux pannes [4].

1.2.3. Exigences et limites des réseaux filaires :

Bien que les réseaux filaires industriels aient fait l'objet de plusieurs années de développements et ont été largement utilisé, en plus des nombreux avantages à mettre en œuvre ces réseaux par rapport ou parallèlement à d'autres déploiements, les limitations sont nombreuses :

- **Limitations physiques** : Les fils se rompent et les mauvaises connexions peuvent provoquer des "ondes stationnaires" qui dégradent les performances. En outre, les fils captent le bruit électronique.
- **Coût d'installation et de maintenance** : La conception et l'installation du câblage sont généralement des tâches longues et coûteuses. L'entretien du câblage extérieur oblige généralement les techniciens à monter sur un poteau ou à descendre dans un trou, juste pour accéder au fil. Et puis, il peut être extrêmement difficile de localiser le problème.
- **Incompatibilité des protocoles** : Les systèmes existants dans les installations industrielles sont souvent liés à des protocoles incompatibles. Connecter ces systèmes et les faire communiquer entre eux est, au mieux, une tâche difficile.
- **Manque de mobilité et d'adaptabilité** : Lorsque les produits ou les processus changent, les installations de production doivent changer. Le câblage doit être déplacé ou réacheminé pour s'adapter aux changements. Cela peut représenter un énorme casse-tête et une dépense considérable.
- **Distance et espace limités** : Plus le fil est long, plus il devient sensible au bruit électrique et plus il sera difficile de localiser les problèmes lorsqu'ils surviennent. Les fils peuvent être endommagés, sertis et coupés dans des endroits difficiles à trouver. Si le fil doit passer à l'extérieur, il est difficile de le protéger contre les conditions climatiques extrêmes. Il n'est pas non plus pratique de toronner des fils dans des endroits où ils pourraient être exposés à des températures extrêmes, gêner le déplacement de machines, etc.
- **Logistique du câblage** : Dans les configurations sophistiquées, la complexité du câblage peut être écrasante. Cela signifie un temps d'installation plus long et des délais de réparation plus longs.

1.3. Evolution vers la communication sans fil industriel

Ces dernières années, la surveillance et le contrôle des processus industriels utilisant la communication numérique sans fil ont suscité beaucoup d'intérêt dans l'industrie de transformation. Une usine de traitement utilise une grande quantité de capteurs et d'actionneurs pour surveiller et contrôler le processus. La plupart des systèmes de contrôle en usage aujourd'hui sont câblés, ce qui présente un certain nombre d'inconvénients. La quantité de fils requis dans une plante typique est écrasante. La flexibilité est limitée, car l'ajout de nouveaux appareils au système nécessite l'installation de nouveaux fils entre le contrôleur et l'appareil. Pour améliorer la situation, de nombreux chercheurs étudient comment faire des réseaux de capteurs sans fil industriels IWSN une option viable pour la surveillance et le contrôle des processus industriels. Un IWSN se compose de plusieurs nœuds de capteurs répartis dans un environnement, où ils surveillent généralement diverses propriétés. Comme les nœuds dans un

IWSN sont souvent alimentés par des piles et la durée de vie requise est souvent de l'ordre de plusieurs années, les exigences énergétiques sont très strictes. Cela impose de grandes exigences aux technologies des capteurs sans fil.

1.3.1. Technologies de communications et réseaux de capteurs sans fil WSN

Les industries des communications, de l'informatique et de l'électronique grand public se regroupent rapidement, créant des produits et des services qui permettent d'établir des liens et d'échanger des données sans utiliser des fils, mais les communications sans fil ne sont pas nouvelles, les premières communications sans fil ont été établies entre les navires et le rivage, puis il y a eu l'apparition de la radiodiffusion qui a fini par être le moyen dominant de diffusion des nouvelles et des divertissements. Au cours de ces années, les technologies radio ont progressé rapidement et comprenaient de nombreuses autres applications dans les domaines de la défense nationale et de la sécurité publique, ainsi que dans le monde des affaires et de l'industrie. Il existe aujourd'hui trois principaux types de communications sans fil, les réseaux étendus sans fil appelés WAN, les réseaux locaux sans fil appelés WLAN, qui jouent tous les deux un rôle parallèle dans le monde des réseaux, et les réseaux personnels PAN qui sont plus aptes à être exploités dans les WSNs qui nous intéressent.

Un réseau de capteurs sans fil consiste en un ensemble de dispositifs qui recueillent, communiquent et relaient les données des capteurs vers un centre de stockage où les informations peuvent être manipulées, affichées et protégées pour une analyse ultérieure. Chaque dispositif est considéré comme un nœud du réseau, et certains nœuds ont plus de responsabilités que d'autres ; l'hétérogénéité du système dépend de l'application.

Ils ont été mis en place dès les années 1950 par la marine américaine ; il a été plus récemment utilisé pour surveiller les océans [5]. L'utilisation de WSN à faible puissance s'est avérée efficace pour la surveillance des environnements naturels extérieurs [6], des structures [7] et des machines [8]. Les systèmes de surveillance des machines sont plus souvent développés en tant que solutions sans fil afin de réduire la consommation d'énergie, les coûts de maintenance et la flexibilité de mise en œuvre. L'utilisation de dispositifs de surveillance sans fil permet non seulement de réduire le nombre d'agents de maintenance, mais aussi de prévoir facilement et à distance les pannes de machines.

De nombreux systèmes de surveillance de l'habitat, comme ceux décrits dans [9], utilisent un grand nombre de nœuds dispersés dans une zone pour collecter périodiquement des quantités relativement faibles de données, telles que des relevés d'humidité ou de température. Des nœuds de plus haute responsabilité, ou coordinateurs, sont positionnés à la limite de la zone pour collecter les paquets de données du trafic. Les coordinateurs sont chargés de relayer les données vers le lieu de stockage, qui peut être un serveur, un ordinateur local ou une carte mémoire portable sur puce. Pour la surveillance des vibrations des machines, par rapport à l'humidité ou à la température, une quantité beaucoup plus importante de données doit être collectée (et transmise, si une analyse plus approfondie est nécessaire). En outre, les environnements intérieurs des usines contiennent davantage de sources d'interférences telles que des objets métalliques, des lignes électriques à haute tension et d'autres appareils fonctionnant sur la même fréquence comme les téléphones portables.

Les WSN sont généralement construits à partir d'un réseau dense de nœuds dans une zone déterminée [9]. L'aspect pratique et la nécessité d'avoir un réseau dense dépendent de l'application. Par exemple, dans un grand habitat contrôlé périodiquement pour la température, l'humidité et la pression ambiante, un réseau dense et homogène est idéal. En effet, les nœuds ont tous la même fonction et une cartographie dense serait utile pour décrire la zone dans tous ses détails. Dans une usine de fabrication industrielle, cependant, un réseau dense n'est pas forcément la meilleure solution. Si les nœuds surveillent les vibrations et la température des machines, il n'est pas nécessaire de disposer de nœuds supplémentaires pour effectuer des mesures là où il n'y a pas de machines. Au lieu de cela, l'application

pourrait impliquer l'introduction de nœuds redondants qui acheminent les informations autour des obstacles dans l'installation.

Dans tout réseaux de capteurs suivant le standard IEEE 802.15.4, il existe généralement jusqu'à trois types de classifications de dispositifs : nœud final, routeur et coordinateur, le standard sera détaillé juste après cette partie :

- Le nœud final est un dispositif qui n'effectue que les mesures des capteurs qu'il transmet aux routeurs ou aux coordinateurs de son voisinage. Il n'achemine ni ne relaie les informations transmises par ses voisins. Les nœuds finaux sont généralement des appareils à faible consommation d'énergie fonctionnant sur piles et qui passent la plupart de leur temps en sommeil profond ou dans un état de courant ultra faible (de l'ordre de micro-ampères). Ils contiennent un émetteur radio, une unité de traitement et des capteurs ou des connecteurs de capteurs.
- La classification des dispositifs de routage décrit généralement un nœud de capteur homogène aux dispositifs finaux du système, mais il est en outre capable de relayer les paquets de données des voisins autour de lui vers le coordinateur du réseau. Dans la plupart des applications de surveillance de l'habitat, chaque dispositif est à la fois un routeur et un nœud de capteur, de sorte que les dispositifs finaux ne sont visibles qu'à la limite de la zone surveillée. Le travail d'un routeur exige qu'il se réveille périodiquement pour relayer les paquets, ce qui augmente le nombre de transmissions qu'il effectue pendant le fonctionnement du système et épuise donc les ressources supplémentaires de la batterie. Plusieurs tentatives ont été faites pour optimiser les schémas de routage de données WSN afin de permettre aux nœuds de routage de consommer un minimum d'énergie [10].
- La classification de coordinateur fait référence à un dispositif qui contrôle le réseau. Ces dispositifs sont généralement équipés d'une double architecture de communication, agissant comme une passerelle entre un réseau et un autre (c'est-à-dire WSN et Internet). Ils sont parfois appelés "routeurs frontaliers" [11]. En effet, dans les applications de surveillance typiques, ces dispositifs existent à la frontière ou à l'extrémité de la zone surveillée et se connectent soit à l'internet, soit à l'ordinateur de l'utilisateur. Cette connexion à un réseau extérieur permet un stockage efficace des données collectées par l'ensemble du réseau mondial de surveillance des frontières. Les dispositifs de coordination peuvent être conçus pour établir des réseaux personnels (PAN) avec un numéro d'identification de réseau personnel (PAN ID), et plusieurs coordinateurs peuvent exister dans un WSN en utilisant des PAN ID distincts. Le coordinateur PAN est également l'appareil qui détermine le canal dans la largeur de bande allouée sur lequel communiquer avec les appareils environnants. Le saut de fréquence ou de canal est fréquemment étudié pour éviter d'avoir trop de dispositifs communiquant sur une fréquence à la fois [12]. Les coordinateurs PAN doivent disposer d'une radio pour communiquer avec les nœuds de capteurs WSN et disposent généralement d'une seconde forme de communication (c'est-à-dire USB, Ethernet ou Wi-Fi) pour stocker les données en toute sécurité sur un dispositif de stockage amovible, un intranet ou l'Internet. Comme le coordinateur est le goulot d'étranglement du flux de données sortant du WSN et entrant dans le stockage, il est généralement alimenté en permanence.

1.3.2. Standard IEEE 802.15.4 pour les communications sans fil

La norme IEEE 802.15.4 définit le protocole et l'interconnexion des appareils par communication radio dans un PAN en spécifiant les couches physiques PHY et de contrôle d'accès au support MAC, qui pourraient être utilisées par un large éventail de protocoles de couche supérieure.

Le domaine d'application que les réseaux basés sur cette norme peuvent couvrir varie des produits de consommation (par exemple, la télécommande commune pour les produits électroniques) et des

systèmes d'automatisation et de sécurité résidentiels, aux soins de santé, à la surveillance des véhicules (par exemple, les capteurs de pression des pneus), à la surveillance des terres agricoles et aux systèmes de contrôle et de surveillance industriels.

Les bandes de fréquences sans licence diffèrent selon les régions du monde, de sorte que la norme IEEE 802.15.4 utilise trois bandes possibles, dont au moins une peut être utilisée en fonction de l'endroit où la norme est appliquée pour la mise en œuvre du réseau. Le tableau 1.1 montre les bandes de fréquence utilisées par la norme IEEE 802.15.4. Parmi les trois bandes, la bande de 2,4 GHz est largement adoptée car c'est la seule bande sans licence disponible dans le monde entier qui présente le débit de données le plus élevé et 27 canaux différents.

Tableau 1.1. IEEE 802.15.4 Bande RF

Bande RF	Plage de freq.	Débit de données	Canaux	Zone Geo.
868 MHz	868.3	20 kbps	0 -1	Europe
915 MHz	902-928	40 kbps	1-10	Amérique-Australie
2400 MHz	2405-2480	250 kbps	11-26	Monde entier

La consommation d'énergie est une préoccupation majeure de l'article 802.15.4, afin de garantir une longue durée de vie des piles, l'énergie doit être prélevée à un taux extrêmement faible ou en petites quantités à un cycle d'utilisation de faible puissance, ce qui signifie que les appareils ne sont actifs que pendant une courte période. La norme permet aux appareils d'être inactifs pendant 99 % du temps, c'est pourquoi les débits de données pris en charge sont relativement élevés afin de minimiser le cycle de service des appareils.

a. Topologies :

La norme IEEE 802.15.4 comprend deux types d'appareils : les appareils à fonctions complètes (FFD) et les dispositifs à fonction réduite (RFD).

- FFD : ils sont capables d'acheminer les données du réseau entre les nœuds et fonctionnent également comme un RFD. Un coordinateur WPAN est une forme spéciale de FFD qui, en plus des capacités de routage, est responsable de la mise en place et de la maintenance du réseau.
- RFD : il s'agit d'un simple nœud terminal qui ne peut parler qu'à un FFD car ils n'ont pas de fonctionnalité de routage. Ils sont également appelés périphérique enfants car ils ont besoin d'un parent pour communiquer. Ils sont capables de passer par de longues périodes de sommeil car ils ne sont pas nécessaires à des fins de routage. En raison de leur faible fonctionnalité, ces dispositifs peuvent être déployés à un coût très faible.

Les FFD peuvent fonctionner selon trois modes, dont un Coordinateur PAN, coordinateur ou un appareil. Les dispositifs à fonction réduite ne fonctionnent que comme un dispositif terminal responsable d'applications très simples comme un interrupteur. Les IEEE 802.15.4 LR-WPAN sont basés sur des topologies en étoile ou de pair à pair. Dans une topologie étoile tous les appareils ne communiquent qu'avec un seul nœud central appelé PAN alors que dans les topologies peer-to-peer, les appareils peuvent communiquer avec n'importe quel d'autres appareils présents dans leur zone de couverture. La figure 1.2 illustre les topologies utilisées dans Réseaux IEEE 802.15.4.

b. La couche physique (PHY) :

La couche physique fournit des services de gestion de PHY et des services de données de PHY qui permet l'envoi et la réception de l'unité de données du protocole PHY (PPDU) sur le canal radio physique. PHY est également responsable de l'émetteur-récepteur radio activation et désactivation, sélection des canaux, évaluation claire des canaux.

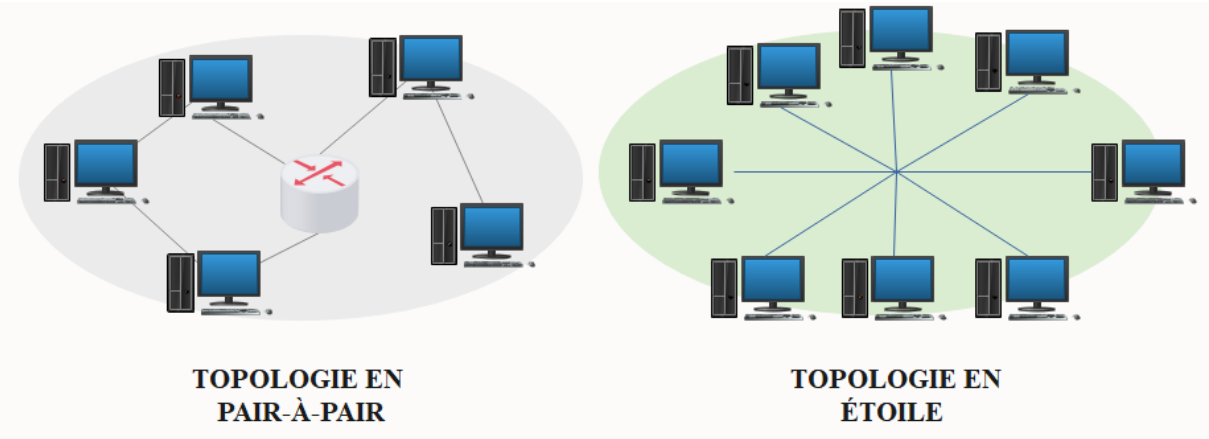


Figure 1.2 Exemples de topologies de réseaux en étoile et en pair-à-pair.

Les schémas de modulation sont utilisés pour réduire la consommation d'énergie, qui est la clé dans la norme en fixant le rapport entre la puissance de crête et la puissance moyenne à un. Les schémas de modulation utilisés pour transmettre les données qui sont incluses dans la norme IEEE 802.15.4 sont la modulation par déplacement de phase binaire (BPSK), la modulation par déplacement d'amplitude (Amplitude Shift Keying) (ASK) et la modulation par déplacement de phase en quadrature (OQPSK). Différents schémas de modulation peuvent être appliqués dans les bandes de 868 et 915 MHz en fonction de l'état du canal et fournissant différents débits de données ; dans la bande de 2,4 GHz, en utilisant la MDPQ, le débit de données peut théoriquement atteindre 250 kbps. La portée de la transmission radio dépend de l'environnement dans lequel l'appareil est placé. En plein air, la portée réalisable dépasse 200 mètres alors que cette portée diminue largement à 30 mètres pour l'environnement de la porte en raison d'effets tels que l'absorption, la réflexion et la diffraction pour n'en citer que quelques-uns.

c. La couche de contrôle d'accès au support (MAC) :

Le service de gestion MAC et le service de données MAC sont deux services fournis par la sous-couche MAC. L'envoi et la réception des unités de données du protocole MAC (MPDU) sur le service de données PHY sont activés par le service de données MAC. La sous-couche MAC assure également la gestion des balises, l'accès aux canaux, la gestion du SMT, la validation des trames, l'accusé de réception des trames et la possibilité de mettre en œuvre des mécanismes de sécurité différents en fonction des exigences de l'application.

L'accès aux canaux se fait de manière CSMA (Carrier Sense Medium Access) avec évitement des collisions. Deux modes sont disponibles : le mode CSMA-CA à fentes ou à balises et le mode CSMA-CA sans fentes. Dans le mode CSMA-CA à fentes, la nouvelle structure SuperFrame est autorisée et prend en charge les créneaux horaires garantis (GTS) pour la livraison en temps voulu des tracés critiques.

1.3.3. Avantages des réseaux non filaires

Le fonctionnement de presque toutes les usines et de tous les sites industriels dépend d'un flux de données vital entre les machines, le contrôle et les dispositifs de surveillance. Dans tout type d'applications, en partant des mises à jour périodiques, au statut de contrôle continu du processus, l'aspect le plus important de tout système de communication est la livraison en temps réel et sans défaillance. La norme du réseau filaire a naturellement gagné en popularité dans l'industrie comme

indiqué dans la première partie ; la filaire offre des performances élevées à un coût raisonnable, s'adapte à un large éventail d'utilisations et est presque universellement prise en charge.

Mais malgré tous ses avantages, la filaire présente les mêmes défauts que toutes les connexions câblées : équipement nécessaire pour la connexion et possibilités de placement limitées. La distance entre les nœuds est également un obstacle, car les limites de longueur de câble sont rapidement dépassées dans de nombreux environnements industriels. De plus, les nouveaux parcours de câbles, les déménagements ou les mises à niveau perturbent facilement les installations. Pour éviter les défauts de câblage, les utilisateurs finaux industriels et les intégrateurs de systèmes se tournent vers les technologies de communication sans fil. La clé d'une transition réussite réside dans en choisissant une mise en œuvre sans fil qui conserve les avantages d'Ethernet sans ajouter de nouvelles contraintes.

Les systèmes sans fil et WSN ont gagné en popularité au cours de la dernière décennie. Par rapport aux systèmes câblés et aux systèmes portables, les systèmes sans fil présentent de nombreux avantages :

- Les réseaux sans fil annulent le coût du fil auparavant nécessaire pour connecter les appareils et les contrôleurs. Les solutions sans fil permettent d'établir des réseaux sur des distances ou dans des applications où le prix du câble aurait pu être exorbitant. Comme le support des transmissions sans fil est l'air, il n'y a pas de limites à l'espace qui peut être couvert pour la transmission, mais aussi aucuns frais pour l'utilisation de l'air pour les transmissions de données tant que l'une des bandes ISM industrielles, scientifiques et médicales est utilisée. Les bandes radio ISM sont réservées au niveau international pour l'utilisation des champs électromagnétiques RF à des fins industrielles, scientifiques et médicales autres que les communications [13].
- Les appareils ne nécessitant pas d'alimentation continue peuvent être placés dans un environnement très polyvalent et flexible. Les systèmes câblés peuvent prendre des jours ou des semaines pour être correctement installés, isolés et mis en service. Les réseaux sans fil ne nécessitent que l'installation des points terminaux, ce qui permet de gagner des heures ou des jours pour chaque instrument installé. Autres éléments peuvent être ajoutés selon les besoins sans qu'il soit nécessaire de recourir à des instruments coûteux et perturbateurs le câblage et le travail. Un autre avantage est la facilité de reconfiguration et l'expansion. S'il est nécessaire d'agrandir une usine ou de déplacer des capteurs, il n'est pas nécessaire d'avoir un conduit coûteux à déplacer ou à ajouter.
- Les WSNs sont généralement conçus pour être autonomes. Les nœuds du réseau travaillent ensemble pour maintenir le flux de données vers la destination et, dans l'idéal, ne nécessitent pas de travail manuel supplémentaire une fois mis en place.
- Il existe de nombreuses ressources pour les dispositifs WSNs et très peu de formation est nécessaire pour les mettre en œuvre à côté d'une infrastructure existante. Cela permet d'économiser les coûts récurrents de formation des utilisateurs au fur et à mesure que de nouveaux appareils sont ajoutés au système.
- Les dispositifs WSNs sont généralement conçus pour avoir un faible encombrement afin d'être les plus polyvalents. En plus, les utilisateurs peuvent se déplacer d'une zone à l'autre tout en conservant leur connexion sans fil.

1.3.4. Problèmes et contraintes des communications sans fil

Même si la mise en œuvre des réseaux sans fil présente de nombreux avantages par rapport à d'autres déploiements ou parallèlement à ceux-ci, elle comporte de nombreux défis :

- **Durée de vie du système :** Dans un réseau où les appareils sont alimentés par des batteries, la consommation d'énergie est une préoccupation majeure dans la conception du système. Pour

que le système puisse collecter les données des capteurs sur une plus longue période tout en conservant son autonomie, les nœuds du réseau doivent être programmés pour économiser l'énergie chaque fois que cela est possible ou pragmatique. Les réseaux de capteurs sans fil fonctionnant sur piles passent généralement la majeure partie de leur temps (90 à 99 %) en mode veille, ou dans un état de très faible consommation (à l'échelle du microampère). Par conséquent, il est généralement plus important de rendre le courant en mode veille aussi faible que possible. En outre, la transmission de données pour les appareils 802.15.4 consomme une puissance de 15 à 40 mA, mais elle se fait sur une période relativement courte (10 à 100 ms), de sorte que la consommation d'énergie de la transmission réelle est compensée par le temps que l'appareil passe éveillé, à collecter des données et à interroger les capteurs. Par conséquent, il convient également de prêter attention au temps que le nœud ne passe pas en état de veille.

- **Interférences externes :** Il a été rapporté que les WSN sont fortement affectés par les interférences environnementales [14], y compris d'autres réseaux sans fil (tels que le Wi-Fi fonctionnant sur la même largeur de bande), les interférences électriques provenant de câbles à fort ampérage (généralement dans les environnements industriels) et les obstacles métalliques. En enfermant les appareils dans une structure métallique, l'effet des interférences électriques sur les cartes de circuits imprimés peut être réduit. Ainsi, tout courant induit par les champs magnétiques autour des câbles est dispersé sur le boîtier, sans atteindre l'unité de microcontrôleur (MCU) ou les circuits radio. Si un boîtier métallique est mis en place, l'antenne doit être montée à l'extérieur du boîtier, car les transmissions radio ne pourraient pas sortir du boîtier autrement.
- **Débit de données :** Comme mentionné, le maintien d'une faible consommation d'énergie est un défi majeur pour les réseaux de capteurs sans fil. L'une des méthodes d'économie d'énergie couramment mises en œuvre est le traitement sur puce. Les données des capteurs sont analysées ou traitées sur la carte avant leur transmission, de sorte que seules les données importantes sont transmises. Plus les paquets de données envoyés sur le support sans fil sont petits, moins le dispositif de transmission consomme d'énergie. Cela permet d'explorer et de développer des méthodes, des systèmes ou des algorithmes qui augmentent le débit de données du réseau tout en maintenant une faible consommation d'énergie globale.

1.4. Réseaux de capteurs industriels sans fil IWSN

Au cours de la dernière décennie, des avantages tels que la mobilité, le déploiement et l'extensibilité des réseaux sans fil, ainsi que la commodité d'avoir des appareils connectés sans avoir besoin de fils, ont orienté le succès des industries des technologies sans fil. Grâce à ce succès, de nombreuses applications ont commencé à apparaître dans différents domaines. L'industrie manufacturière et ses usines ont bénéficié de l'utilisation de ces technologies [15] en réduisant les coûts de maintenance liés au câblage, en augmentant la durabilité de l'environnement et en facilitant l'installation et la reconfiguration des usines. Les besoins et demandes constants de l'industrie manufacturière pour des applications de contrôle et de surveillance plus efficaces nécessitent l'utilisation de méthodes de collecte de données ou de capteurs fiables, intelligents et peu coûteux, capables de communiquer avec des appareils qui numérisent, transfèrent et traitent les informations recueillies.

Il existe différentes approches pour les classifications de l'automatisation industrielle : Selon [16], l'automatisation industrielle peut être divisée en deux domaines d'application : le contrôle des processus et l'automatisation industrielle. Le contrôle des processus comprend des applications telles que les processus liés à la pétrochimie. L'automatisation industrielle couvre la fabrication d'appareils et de produits de consommation. Pour [17], les systèmes d'automatisation industrielle peuvent être divisés en deux catégories : les systèmes en boucle fermée et les systèmes en boucle ouverte où les systèmes en boucle ouverte sont appliqués dans des opérations discrètes telles que le contrôle des actionneurs, tandis que les systèmes en boucle ouverte sont appliqués dans la surveillance des processus.

Indépendamment des critères de classification, l'automatisation industrielle s'appuie sur les données acquises du monde physique pour effectuer des procédures spécifiques. Le contrôle des processus de fabrication [18], la surveillance de la production [19] [20], ou le suivi des actifs [21] sont des exemples de tâches qui nécessitent l'information de capteurs pour effectuer des actions ou pour connaître les événements de production. Par conséquent, l'automatisation industrielle nécessite la mise en œuvre de systèmes et de réseaux de détection complexes qui intègrent un large éventail de dispositifs de terrain afin de répondre aux normes de qualité et de production. La Société internationale d'automatisation (ISA) a défini six classes différentes pour les applications de capteurs et de contrôle dans le domaine du marché. La figure 1.3 montre la catégorisation effectuée par l'ISA.

Dans les applications industrielles, les capteurs sont utilisés pour transformer les caractéristiques physiques mesurables du processus en valeurs de signal qui peuvent être transféré à une entité de traitement de l'information pour être analysé et ensuite introduit dans un système de contrôle de processus pour contrôler d'autres tâches soit directement au moyen de dispositifs automatiques ou de robots. Ce processus est illustré par la figure 1.4.

Les commandes industrielles sont des algorithmes qui répondent aux informations des capteurs, générant un signal qui actionne un mécanisme d'actionnement. Les contrôles industriels, connectés à des mécanismes de traitement de l'information, peuvent être considérés comme des moyens qui répondent à un état de changement de la connaissance d'un processus donné.

Cette connaissance est générée à partir des informations fournies par un processus de données utilisant des capteurs ou des réseaux de capteurs [22]. La robustesse des capteurs est un facteur clé pour une acquisition et une transmission fiable des données, car de fortes sources d'énergie électromagnétique peuvent réduire la qualité des mesures et des transferts, ce qui entraîne des erreurs. La vitesse d'acquisition des données est critique pour la performance d'un système. Les capteurs capables de transférer rapidement des données sont cruciaux pour un système de communication industriel de haute performance.

Le "temps réel" est la capacité d'un système à fournir un résultat requis dans un temps limité [22]. Un système de communication en temps réel est capable de transférer des données en temps réel. La meilleure façon de respecter les délais de transfert des données est d'utiliser des architectures centralisées, où les capteurs sont lus en cas de besoin par un système de gestion central utilisant des connexions point à point. Dans ce cas, le délai et la réaction aux événements sont minimes.

D'autre part, la technologie des microcontrôleurs est le moteur de la nouvelle génération de capteurs, car elle offre des fonctions qui vont au-delà de celles nécessaires pour générer une représentation correcte d'une quantité détectée ou contrôlée [23]. Les principaux avantages de ces nouveaux "capteurs intelligents" basés sur des microcontrôleurs sont : la capacité de mise en réseau, la possibilité de partager des données en temps réel dans l'ensemble d'une installation afin d'accroître l'efficacité et la productivité industrielles, la facilité de remplacement et de mise à niveau, la réduction des pannes de connecteurs et une plus grande mobilité. L'utilisation de capteurs intelligents dans une architecture centralisée est peu économique et réductrice, car seules quelques-unes de leurs qualités peuvent être exploitées.

L'architecture distribuée est plus adaptée aux capteurs intelligents, grâce à leurs capacités de mise en réseau et à leurs interfaces. L'utilisation d'architectures distribuées apporte d'autres avantages tels qu'une grande flexibilité, de meilleures performances, une maintenance prédictive, une installation simple et une réduction des coûts de câblage. Malheureusement, l'utilisation de cette architecture implique également des délais de transmission qui peuvent fortement affecter leurs performances.

Un réseau industriel est un réseau qui communique une sorte de système automatisé, ses systèmes de contrôle et de surveillance [24]. Les réseaux industriels câblés traditionnels offrent de nombreux avantages, mais ils nécessitent des câbles pour connecter les appareils, ce qui entraîne des coûts d'installation et d'entretien élevés en raison de la faible extensibilité et du taux de défaillance élevé des

connecteurs et des câbles. C'est pourquoi le niveau d'adoption des solutions sans fil au niveau du réseau de capteurs a gagné en popularité en raison des multiples avantages qu'offrent ces réseaux : détection continue, haute résolution et omniprésente ; soutien à la mobilité ; redondance et compacité [25]. La communication et le transfert de données dans un WSN se fait par la transmission d'ondes électromagnétiques dans l'air.

Sécurité	Classe 0	Une action d'urgence est nécessaire : - Arrêt d'urgence - Contrôle automatique des incendies - Détection des fuites
Contrôle	Classe 1	Contrôle en boucle fermée - critique - Contrôle direct des actionneurs, des pompes et des vannes - Arrêt automatisé
	Classe 2	Contrôle en boucle fermée - non critique - Optimiser les boucles de contrôle - Détournement de flux
	Classe 3	Contrôle en boucle ouverte - intervention humaine - L'opérateur effectue un réglage manuel
Surveillance	Classe 4	Alerte - entretien nécessaire - Maintenance basée sur les événements - Batterie faible - Surveillance des vibrations - Surveillance de la température des moteurs
	Classe 5	Enregistrement - entretien préventif - Dossiers d'entretien préventif - Collection Histoire

Figure 1.3 Classes de capteurs et applications de contrôle [16].

Les réseaux sans fil peuvent être considérés comme une extension des réseaux câblés et même si les réseaux sans fil semblent être la "prochaine étape" logique des systèmes câblés, il n'est pas possible de concevoir une usine moderne sans dispositifs câblés connectés car il existe toute une série d'applications industrielles qui nécessitent l'utilisation de câbles comme méthode de mise en réseau. Dans l'industrie manufacturière moderne, une mise en réseau industrielle complète est le résultat de l'intégration des réseaux câblés et sans fil.

C'est pourquoi l'industrie doit être consciente de l'importance de la compatibilité et de l'interopérabilité entre ces solutions, car l'absence d'accord sur des architectures communes a limité et ralenti sa croissance et son développement.

Même si des projets de recherche antérieurs tels que le projet RUNES [26] ont montré que l'adoption de systèmes embarqués en réseau sans fil est plus lente dans le secteur industriel que dans d'autres, la technologie des capteurs sans fil évolue rapidement vers des applications dans les usines de production et autres environnements industriels. Selon Grandviewresearch [27], le marché industriel des réseaux sans fil a doublé au cours des deux dernières années. Dans les cinq prochaines années, les réseaux industriels sans fil installés augmenteront de 553 %, ce qui signifie qu'il y aura près de 24 millions de capteurs et d'actionneurs sans fil. D'ici 2025, 39 % des nœuds déployés seront utilisés pour de nouvelles applications qui sont uniquement rendues possibles par la technologie WSN. WSN a un impact sur l'automatisation industrielle en perturbant l'automatisation câblée, en étendant les réseaux de capteurs

câblés et en proposant de nouvelles solutions de détection et de contrôle. La figure 1.5 montre la croissance prévue des points de détection sans fil industriels installés dans le monde entier d'ici 2025.

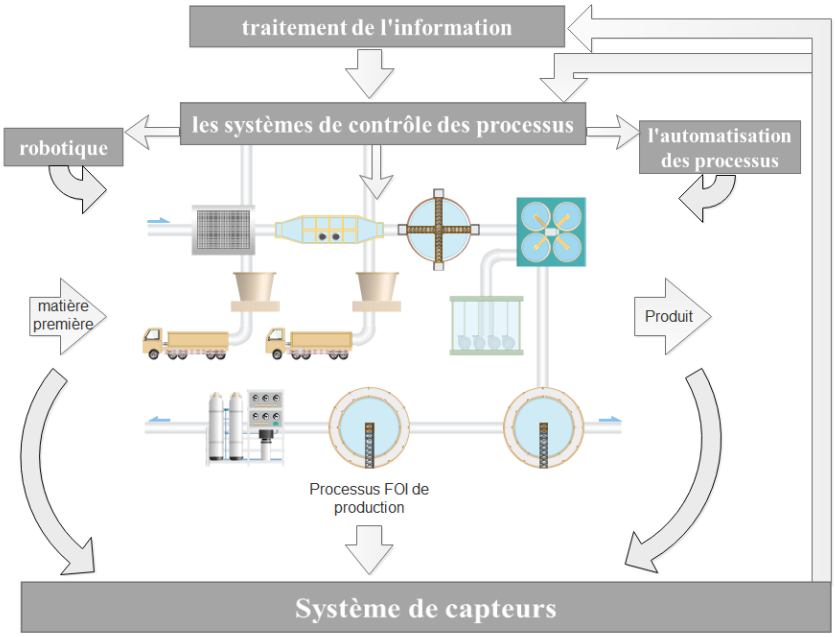


Figure 1.4 Systèmes de capteurs pour les applications industrielles.

La relation entre les nœuds WSN installés et les applications est très importante car, comme le montre la figure 1.6, ils auront une expansion et un impact proportionnels sur le marché des applications industrielles. La variété actuelle des applications possibles du WSN à l'automatisation industrielle est limitée au contrôle (ISA´s classification des applications classes 0 à 3) et à la surveillance (ISA´s classification des applications classes 4 à 5). Presque toutes les applications peuvent être classées dans une catégorie sur deux : Détection d'événements (ED) et Estimation de processus spatiaux (SPE) [27].

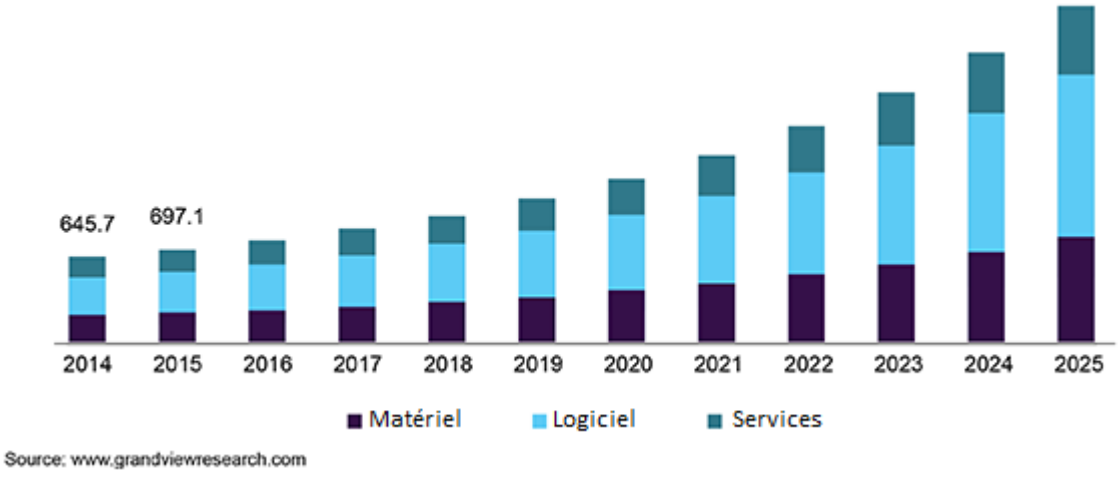


Figure 1.5 la taille du marché des WSN industriels installés dans le monde entier devrait être atteint d'ici 2025.

Dans les applications de détection d'événements, les capteurs sont utilisés pour détecter un événement, par exemple un changement de température d'une pièce ou la détection d'une vibration dans une machine. Dans le domaine de la SPE, le WSN vise à estimer un phénomène physique donné qui

peut être modélisé comme un processus de rançon bidimensionnel, par exemple, les niveaux d'émission toxique d'une cheminée. Il existe également des applications qui appartiennent aux deux catégories, comme le suivi des actifs [21].

Selon une enquête Grandviewresearch réalisée en 2018 auprès d'entreprises liées à l'automatisation industrielle, l'utilitaire est devenue l'application la plus utilisée pour laquelle les WSN sont utilisés dans l'industrie, 23 % des utilisateurs interrogés utilisant une solution sans fil. La figure 1.6 montre le graphique complet des applications du WSN dans l'industrie [27]. La plupart des applications industrielles actuellement utilisées effectuent une surveillance plutôt que de contrôler des problèmes de sécurité et de performance. Les utilisateurs finaux industriels doivent avoir confiance dans les solutions à ces problèmes avant de confier les fonctions de contrôle à un système sans fil. Il a déjà été dit [26] que le sans-fil ne devrait pas être utilisé pour des applications de contrôle critiques, car il faut tirer des leçons des déploiements réussis de la télémétrie avant de passer aux applications de contrôle.

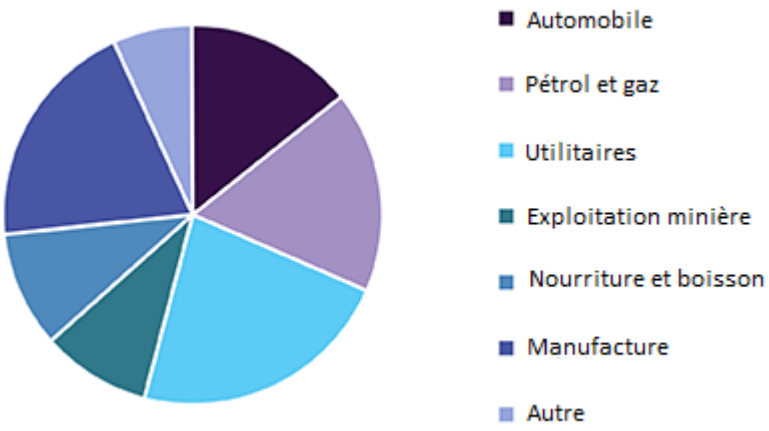


Figure 1.6 Distribution des applications IWSN en 2018 [27]

1.4.1. Architecture des plateformes IWSN

En outre, avant de présenter les différentes technologies sans fil industrielles disponibles qui peuvent répondre aux exigences strictes des types de systèmes industriels, il est nécessaire de comprendre l'architecture des réseaux de capteurs sans fil industriels (IWSN). La performance des IWSN est principalement influencée par de multiples composants, à savoir le matériel, la topologie, les schémas d'accès aux canaux, l'architecture du réseau, la collecte de données, l'interconnectivité et les schémas de sécurité. Il est donc très important de sélectionner soigneusement certains attributs. Certains des principaux facteurs d'influence sont examinés ci-dessous :

1.4.1.1. Topologie du réseau :

Elle influence grandement les domaines d'application cibles. En outre, toute architecture de réseau de capteurs industriels sans fil présente des topologies de réseau différentes, chacune ayant des caractéristiques différentes. En général, les nœuds d'un réseau sont généralement formés d'une topologie en étoile, en maille et en arbre [29].

- **Topologie maillée :** dans cette topologie, chaque nœud est connecté à plusieurs nœuds, ce qui permet aux réseaux d'offrir une meilleure fiabilité au sein de réseaux plus vastes et des caractéristiques d'autoréparation améliorées. Toutefois, cela entraîne des retards prolongés en

raison de la présence de plusieurs liens vers la passerelle et affecte également la possibilité de choisir la voie la plus stable pour la communication des informations.

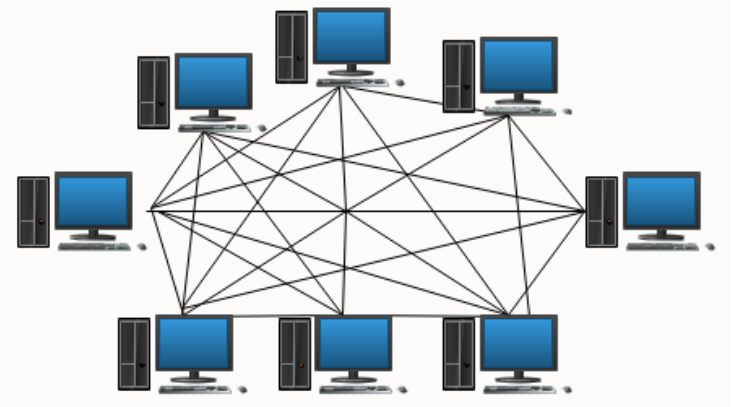


Figure 1.7 Topologie maillée.

- **Topologie arborescente :** offre des liens dédiés qui permettent de réduire les frais généraux d'information. En outre, un nombre fixe de sauts est déterminé pour la communication entre les nœuds, ce qui donne un comportement déterministe à la communication [30]. De plus, elle offre un champ d'information à gradient qui limite les paquets d'information s'écartant du chemin. En outre, un retard supplémentaire peut entraîner des applications industrielles sensibles au temps si des branches étendues sont utilisées.

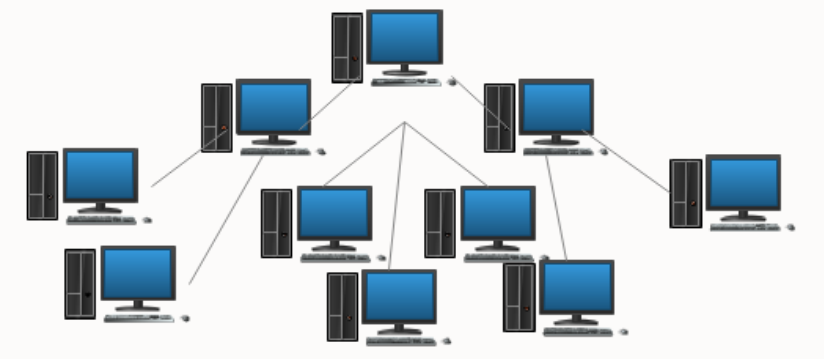


Figure 1.8 Topologie arborescente.

- **Topologie des étoiles :** L'amélioration de la transmission des données en temps réel est un avantage de cette topologie, ceci est dû à son offre d'accès direct à la passerelle. Cependant, un nombre accru de nœuds connectés entraîne une fiabilité réduite, en particulier dans les schémas d'accès aux canaux basés sur la contention [31].

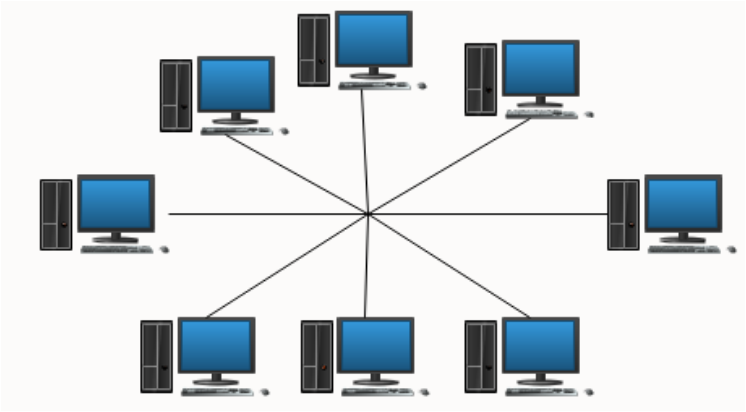


Figure 1.9 Topologie en étoile.

1.4.1.2. Schémas d'accès aux canaux

Il existe plusieurs schémas d'accès aux canaux proposés dans les réseaux industriels de capteurs sans fil, mais selon [32], seuls deux ont été mentionnés, à savoir le schéma d'accès moyen à répartition dans le temps (TDMA) et le schéma CSMA/Collision Avoidance (CSMA/CA). Ils sont tous deux dérivés des normes IEEE 802.15.4 et IEEE 802.15.4e et sont couramment utilisés pour accéder aux schémas de canaux.

- **TDMA :** Dans l'accès aux canaux basé sur la technologie TDMA, un accès par créneau temporel pour la communication de données est suivi. Ici, des balises de synchronisation synchronisent les nœuds et programment pour chaque nœud un créneau temporel prédéfini. Il en résulte un accès de canal garanti et convient à une utilisation dans le cadre d'un contrôle réglementaire et en boucle ouverte où des communications périodiques sont nécessaires.
- **CSMA/CA :** Dans l'accès au canal basé sur le CSMA/CA, les nœuds utilisent une communication opportuniste qui dépend de la disponibilité du canal pour accéder au canal. Cependant, en l'absence de bande passante dédiée, un nœud ne peut pas avoir un accès garanti au canal. Ce schéma n'est donc pas sûr à utiliser pour les zones d'application critiques. En outre, l'augmentation du nombre de nœuds connectés pose également un problème de fiabilité en utilisant ce schéma d'accès.
- **Hybride :** comme les deux systèmes ont des domaines d'application différents et que les systèmes industriels peuvent avoir les deux domaines ensemble, un système d'accès aux canaux hybrides de la TDMA et de la CSMA/CA a été introduit. Cela permet d'utiliser à la fois le TDMA et le CSMA/CA de manière adaptative, afin d'améliorer les performances globales du réseau [33].

1.4.1.3. Couches d'interconnexion de systèmes ouverts (OSI) des IWSNs

Les réseaux de capteurs sans fil suivent une architecture de communication très similaire au modèle OSI. Le modèle OSI a été créé au sein de l'Organisation internationale de normalisation (ISO). De plus, le modèle définit sept couches qui décrivent comment les applications s'exécutant sur des appareils conscients du réseau peuvent communiquer entre elles [34]. Le modèle est générique et s'applique à tous les types de réseaux et de médias. Cependant, dans un réseau de capteurs sans fil, seules cinq couches sont nécessaires, à savoir la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique, comme le montre la figure 1.10. Une discussion des caractéristiques les plus pertinentes de chaque couche de communication a été présentée par [34][35].

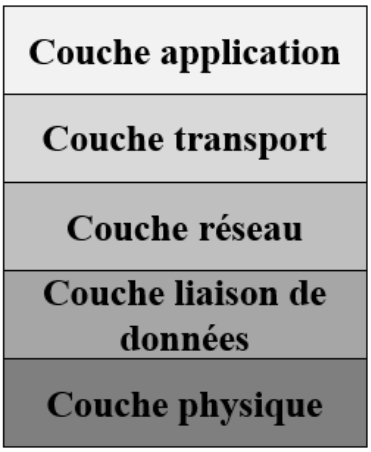


Figure 1.10 Pile de protocoles IWSN.

Voici les définitions qu'ils ont fournies de chaque couche de communication :

a. **Couche physique :** Elle est responsable de la sélection des fréquences, de la génération des fréquences porteuses, de la détection des signaux et de la modulation appropriée du signal en tenant compte des plages de fréquences autorisées pour l'application spécifiée. Elle doit également accorder une attention particulière aux contraintes inhérentes, notamment à la faible consommation d'énergie et à la conception du matériel.

b. **Couche de liaison de données :** la couche de liaison de données est divisée en deux sous-couches, le contrôle de liaison logique (LLC) et le contrôle d'accès au support (MAC). La sous-couche de contrôle d'accès au support n'est prise en compte qu'en raison de ses effets significatifs en termes de consommation d'énergie et de problèmes en temps réel. La fonctionnalité commune de la couche Liaison de données consiste à programmer les données disponibles pour la transmission dans le réseau global, en fournissant à chaque nœud le mécanisme permettant de décider quand et comment accéder au support partagé entre les autres nœuds pour transmettre ses données. Cette fonctionnalité relève de la responsabilité de ses protocoles de sous-couche MAC. En outre, les protocoles MAC existants dans les réseaux de capteurs sans fil sont divisés en trois catégories, comme le montre la figure 1.11 : ils sont basés sur la programmation, sans collision et basés sur la contention.

Voici la description de chaque protocole MAC :

- Protocole basé sur la planification : Ce protocole détermine le moment auquel un nœud peut commencer la transmission de données en utilisant un algorithme de planification centralisé pour éviter la collision des paquets de données. L'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) est un protocole basé sur la planification qui divise le canal partagé en N intervalles de temps permettant à un seul nœud à la fois dans chaque intervalle de temps de transmettre des données.
- Protocoles sans collision : Ils permettent la transmission simultanée de données sans interférences ni collisions en utilisant différents canaux radio pour chaque action de communication entre deux nœuds mobiles. En outre, il existe deux approches pour obtenir une communication sans collision : l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) et l'accès multiple par répartition en code (CDMA).

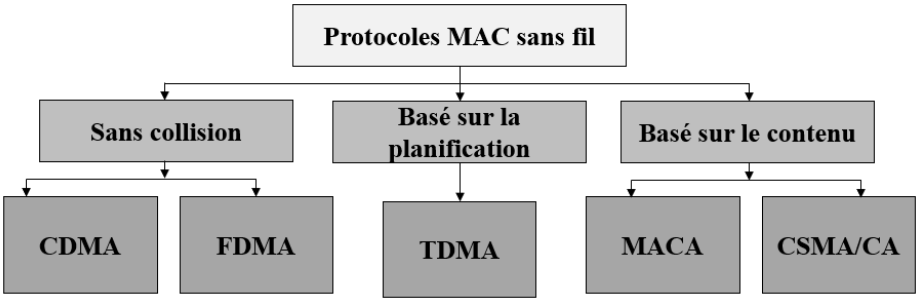


Figure 1.11 Familles de protocoles MAC sans fil.

- Protocoles basés sur le contenu : Ce type de protocole ne vise pas à éviter les collisions, mais à les gérer et à essayer de minimiser leur occurrence. Ainsi, un seul canal radio est partagé par tous les nœuds à la demande. Cependant, si deux ou plusieurs nœuds tentent d'utiliser ensemble le support partagé, une collision se produira. Ainsi, en cas de collision, des algorithmes distribués sont utilisés pour redistribuer le canal entre les nœuds concurrents, réduisant ainsi leur probabilité de collision ou évitant sa survenance.

En outre, selon [34], la plupart des protocoles MAC suivent un type de protocole basé sur la contention qui utilise des mécanismes de détection de la porteuse et/ou d'évitement des collisions. Ce type de protocole est connu sous le nom de CSMA/CA écoute le canal pour s'assurer qu'il est au repos avant de lancer la transmission. Toutefois, si le canal produit une tonalité d'occupation, le nœud attend un temps aléatoire avant de détecter le support ou continue d'écouter jusqu'à ce que le ralenti soit assuré avant la transmission [36]. De plus, dans les réseaux sans fil à bonds multiples qui utilisent également le CSMA/CA, des problèmes de nœuds cachés et exposés se produisent. Dans le cas du problème du nœud caché, nous prendrons l'exemple de deux nœuds A1 et A2 qui ne peuvent pas communiquer entre eux parce qu'ils sont hors de portée l'un de l'autre. Il en résulte que les nœuds A1 et A2 détectent le support dans un nœud voisin B et donc, parce que les deux nœuds A1 et A2 ont reçu un signal de ralenti de B et qu'ils ne sont pas conscients de l'activité de l'autre, ils transmettent des données ensemble et donc, cela entraîne une collision entre les paquets de données.

Alors que, dans le problème du nœud exposé, nous prendrons un autre exemple avec deux nœuds A1 et A2, et deux nœuds voisins B1 et B2. Dans ce problème, lorsque A1 transmet vers B1, A2 entend la transmission et ne transmet pas vers B2 en supposant que le support est occupé. Cependant, B2 et B1 ne sont pas à portée l'un de l'autre et une transmission simultanée réussie aurait été possible. Ces deux cas de figure sont présentés ci-dessous dans la figure 1.12 pour une meilleure visualisation :

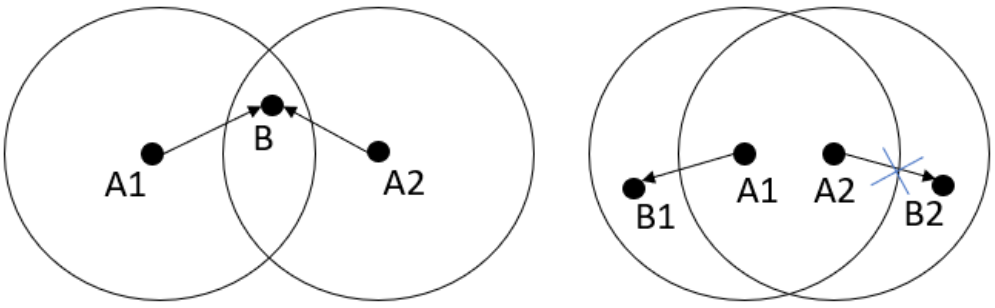


Figure 1.12 problèmes de nœuds cachés et exposés.

c. **Couche réseau :** La fonction importante de cette couche est le routage des données, permettant aux systèmes ouverts communicants d'établir, de maintenir et de terminer des connexions réseau. Tous les routeurs d'un réseau fonctionnent au niveau de cette couche. De plus, cette couche est conçue selon différents principes, selon [37] :

- Réseaux de capteurs centrés sur les données
- Les capteurs dont les caractéristiques sont basées sur les attributs et la connaissance de l'emplacement sont considérés comme idéaux
- Tenez toujours compte de la consommation d'énergie efficace
- L'agrégation de données d'utilisation n'est utilisée que lorsqu'elle n'entrave pas l'effort de collaboration des nœuds de capteurs.

d. **Couche transport :** Cette couche est utilisée pour accéder au système par l'intermédiaire d'Internet et d'autres réseaux externes.
e. **Couche d'application :** Cette couche rend le matériel et les logiciels des couches inférieures transparents pour les applications de gestion du réseau de capteurs.

1.4.2. Objectif des IWSN

Les domaines d'application des IWSNs peuvent être classés en deux catégories : la surveillance à distance et le suivi d'objets. Ces deux catégories peuvent être subdivisées en applications intérieures ou extérieures. La figure 1.13 présente une classification des applications possibles des IWSNs, dont la structure est similaire à celle donnée par [38] pour les WSNs.

Parmi ces applications, la surveillance de la fabrication industrielle est la plus utile pour la création d'un environnement industriel intelligent. Dans ces systèmes, de petits nœuds de capteurs sans fil sont installés sur des équipements industriels et servent à surveiller les paramètres critiques de chaque équipement, sur la base d'une combinaison de mesures, telles que les vibrations, la température, la pression et la qualité de l'énergie. Ces données sont ensuite transmises sans fil à un nœud de réception qui analyse les données reçues de chaque capteur. Sur la base des exigences de la production industrielle particulière, les applications possibles des environnements industriels intelligents peuvent être classées dans les trois groupes suivants [39] :

- Détection environnementale : Les applications de la détection environnementale couvrent les problèmes de détection des incendies, des inondations ou des glissements de terrain. Les applications de surveillance de la pollution de l'air, de l'eau et des matériaux de production font également partie de ce groupe. En outre, la détection environnementale peut être utilisée pour la surveillance de points d'intérêt, de zones et de barrières pour certaines questions de sécurité.
- Surveillance des conditions d'états : Les problèmes de surveillance des structures, des machines et des conditions humaines sont généralement couverts dans ce groupe. Par exemple, les informations sur la santé des structures et la surveillance de l'état des machines peuvent être prises en compte dans l'automatisation des usines.
- Automatisation des processus : Les applications de l'automatisation des processus fournissent des informations sur les ressources utilisées pour la production et la prestation de services, qui comprennent les matériaux, et sur l'état de la chaîne d'approvisionnement dans l'automatisation des processus industriels.

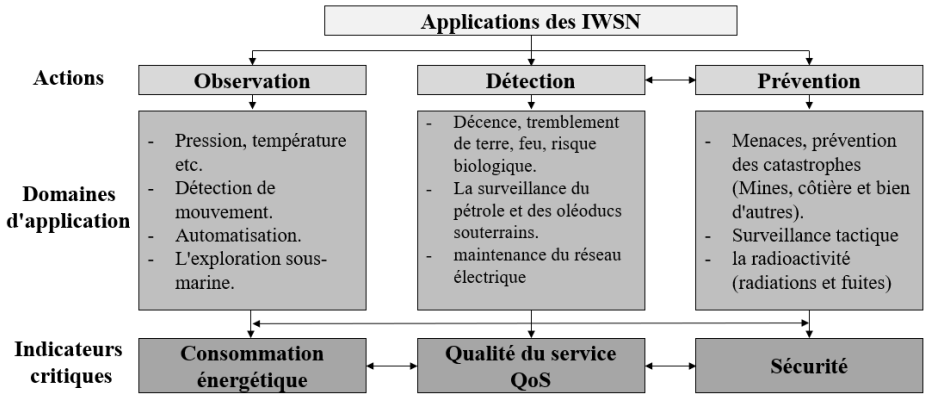


Figure 1.13 Domaines d'application des IWSN.

1.4.3. WirelessHART

WirelessHART est une extension sans fil du protocole HART utilisé pour le contrôle câblé. Le site Le protocole HART est la principale norme de communication pour le contrôle des processus et est la propriété de la Fondation de communication HART (HCF) qui regroupe plus de 230 entreprises membres. Dans le cadre du système HART traditionnel, les données sont communiquées par un signal analogique de 4 à 20 mA [40]. WirelessHART, qui a été lancé en septembre 2007, a été développé pour être rétro-compatible avec le vaste marché existant des appareils compatibles HART. Les dispositifs HART existants peuvent coexistent dans un réseau sans fil en utilisant un adaptateur sans fil.

Le réseau est conçu pour être un réseau autoorganisé et adaptable. Lorsque l'on ajoute une nouvelle unité, il est automatiquement intégré dans la carte du réseau et les tables de routage. Il est également conçu pour traiter les erreurs de manière adaptative en permettant plusieurs options de routage de la source vers destination. Si la liaison radio entre deux nœuds est en mauvais état, le message peut alors être transmis par un ensemble de nœuds différents. WirelessHART utilise également le saut de canal dans de manière pseudo-aléatoire entre 15 canaux de fréquence dans la bande ISM de 2,4 GHz.

WirelessHART est sécurisé au moyen de la norme industrielle de cryptage AES 128-bits. Le cryptage et l'authentification sont utilisés sur la couche réseau, ce qui assure une sécurité de bout en bout et empêche les autres nœuds du même réseau de décrypter le contenu. Un autre niveau d'authentification est appliqué sur la couche MAC permettant à tous les nœuds du réseau de vérifier qu'un paquet a été envoyé depuis une unité de réseau authentifiée. Toutefois, la couche MAC n'est pas cryptée et son contenu peut être lu par toute personne extérieure au réseau. L'algorithme d'authentification génère un champ de 4 octets appelé code d'intégrité du message (MIC) qui dépend du contenu du paquet ainsi que de la clé de chiffrement. Le destinataire vérifie un paquet reçu en faisant correspondre le champ MIC avec la valeur attendue. Si le champ MIC est incorrect, le paquet n'est pas accepté. En plus de cela, il existe également un contrôle des erreurs de bits au moyen d'un contrôle de redondance cyclique (CRC). Le CRC peut détecter les erreurs de bits qui se produisent pendant la transmission. Il ne vérifie cependant pas si un paquet provient d'un appareil de confiance au sein du réseau.

A. Tranches temporelles et superframes :

WirelessHART est un protocole d'accès multiple à répartition dans le temps (TDMA). Le domaine temporel est divisé en tranches de temps de 10 ms. La transmission des paquets doit commencer et se terminer dans un intervalle de temps selon un calendrier strict, comme l'illustre la figure 1.14. Le temps alloué pour l'évaluation de la voie libre (CCA), la transmission régulière de paquets et la réception de paquets ACK est régi par ce calendrier.

En outre, les intervalles de temps sont regroupés dans des "superframes", qui contiennent le calendrier des communications dans le réseau. Les superframes sont répétées périodiquement. Le nœud A peut par exemple transmettre dans le créneau horaire 1, tandis que le nœud B est programmé pour transmettre dans le créneau horaire 2. Certains créneaux horaires sont consacrés aux retransmissions, dans le cas où elles sont nécessaires. Le même horaire est ensuite répété dans la superframes suivante.

Il existe différents types de paquets. Certains ne sont pas reconnus par le nœud de destination, par exemple les paquets de diffusion. En général, cependant, le nœud de destination envoie un paquet d'accusé de réception (ACK) à la fin du créneau. Ceci est indiqué sur la figure 1.14 comme TsAck. si un TsACK n'est pas reçu par le nœud source, il peut essayer de retransmettre à nouveau dans un créneau temporel ultérieur de la superframes.

B. Couches de protocole :

WirelessHART repose sur le modèle de réseau commun OSI. Il dénote les différentes couches de protocole que l'on trouve dans une pile de communication. Les couches utilisées dans WirelessHART sont la couche physique, couche MAC, couche réseau, couche transport et couche application. Le but de la couche physique est de transmettre physiquement les bits de données réels, par exemple à l'aide d'une onde électromagnétique. La transmission consiste à représenter les données binaires par une forme d'onde et à moduler cette forme d'onde sur une onde porteuse. Une description plus détaillée de la couche physique est donnée dans la sous-section 1.3.2.

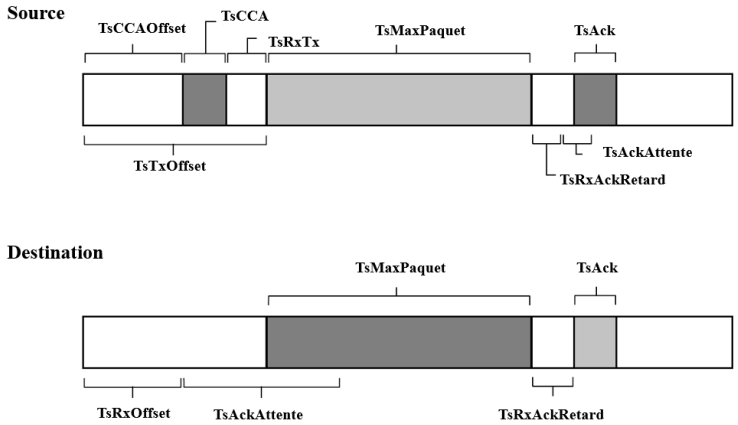


Figure 1.14 Calendrier des plages horaires dans WirelessHART pour les dispositifs source et de destination.

La couche de liaison de données contient des informations sur la source et la destination du paquet de données au niveau des nœuds. En plus de cela, il y a la couche réseau qui permet aux paquets d'être acheminés par d'autres nœuds sur son chemin vers sa destination finale. La couche transport est responsable de la fiabilité des communications entre les utilisateurs finaux d'un réseau. Enfin, la couche application contient les commandes spécifiques à l'application. Dans le cas de WirelessHART, il s'agit par exemple d'un numéro de commande et de données de mesure.

La taille en octets des différents champs est indiquée ainsi que la couche de protocole associée. Dans certains cas, la taille d'octet peut varier. Un exemple est l'adresse qui peut être courte ou longue. L'adresse longue, composée de huit octets, n'est utilisée que lorsqu'un nœud est en train de rejoindre le réseau. Une fois authentifié et connecté, le nœud utilise désormais une adresse courte, de 2 octets, qui est automatiquement attribuée. Pour obtenir une estimation des tailles de paquets types, considérez la taille minimale de l'en-tête WirelessHART pour un paquet normal, en utilisant uniquement les versions à adresse courte et zéro octet dans le champ de routage optionnel. L'espace requis pour les champs de l'en-tête s'élève alors à 44 octets. En plus des en-têtes, le paquet comprend également une commande WirelessHART ou des données de mesure. Un paquet ACK a une taille totale de 25 octets.

1.4.4. ISA100.11a

ISA100.11a est l'une des normes internationales pour les réseaux de capteurs sans fil industriels. Elle est basée sur le protocole IEEE 802.15.4, mais n'utilise qu'une bande ISM de 2,4 GHz (et non 1 GHz). ISA100.11a est la première norme de la famille ISA100 pour l'automatisation des processus. Elle a été approuvée par la Commission électrotechnique internationale (CEI) et a été adoptée comme norme internationale officielle (CEI 62734) en septembre 2014[30].

La norme ISA100.11a est soumise à un processus de normalisation ANSI, et le processus d'élaboration des normes a toujours été basé sur les besoins des clients. C'est une norme multifonctionnelle pour les capteurs industriels et les réseaux d'actionneurs, qui fournit une solution de fonctionnement fiable et sûre pour différentes applications industrielles. La norme ISA100.11a peut prendre en charge plusieurs protocoles grâce à une infrastructure sans fil relativement simple, comme HART, Profibus, Modbus, FF, etc. La norme ISA100.11a prend en charge plusieurs niveaux de performance pour répondre aux divers besoins d'application de l'automatisation industrielle. Par rapport à la norme Wireless HART ou WIA-PA, la norme ISA100.11a présente les avantages suivants :

- Technologie de tunnellisation et de cartographie : La norme ISA100.11a peut facilement et simplement transmettre divers protocoles d'application par l'intermédiaire de supports sans fil selon la technologie de « tunnelage » et de cartographie.
- Le mécanisme de routage du réseau fédérateur : celui-ci transmet les informations plus directement par l'intermédiaire d'un réseau fédérateur efficace, ce qui peut réduire le nombre de sauts pour la transmission de données sans fil, un problème particulièrement pressant dans les grands réseaux ;
- La flexibilité de la longueur des intervalles de temps et de la super longueur des trames [41].

L'architecture du protocole standard ISA100.11a suit la structure à sept couches de l'ISO/OSI. Toutefois, elle ne comporte que cinq couches, ce qui est identique à Ethernet. La couche physique (PHY) et les couches MAC ont été définies dans la norme IEEE802.15.4-2006 et fonctionnent sur les canaux 11-26 (où 26 est facultatif). La spécification définit également la couche liaison de données (DLL), la couche réseau (NL), la couche transport (TL) et la couche application (AL). Un réseau ISA100.11a typique se compose de plusieurs dispositifs différents (illustrés à la figure 1.15) [41]. Les dispositifs de terrain et les dispositifs d'infrastructure sont définis comme deux groupes principaux de dispositifs dans ce réseau.

Trois types d'appareils de terrain sont utilisés pour relier les processus, y compris toutes sortes d'instruments et d'actionneurs :

- Les dispositifs de routage, dont les capacités de routage peuvent être désactivées afin d'optimiser les performances du système (par exemple, la latence des messages ou la consommation d'énergie).
- Les dispositifs d'entrée/sortie, qui fournissent des données à d'autres dispositifs et/ou utilisent des données provenant d'autres dispositifs (par exemple, les capteurs ou actionneurs de terrain sont des dispositifs à fonction réduite sans capacité de routage et de propagation d'horloge, mais qui fournissent des données à d'autres dispositifs et/ou utilisent des données provenant d'autres dispositifs, par exemple des capteurs ou actionneurs de terrain). L'un des objectifs initiaux de la définition de ces types de dispositifs est de répondre aux exigences de complexité minimale et de faible consommation d'énergie.
- Les appareils portatifs, qui sont traités comme des appareils de terrain sans routage.

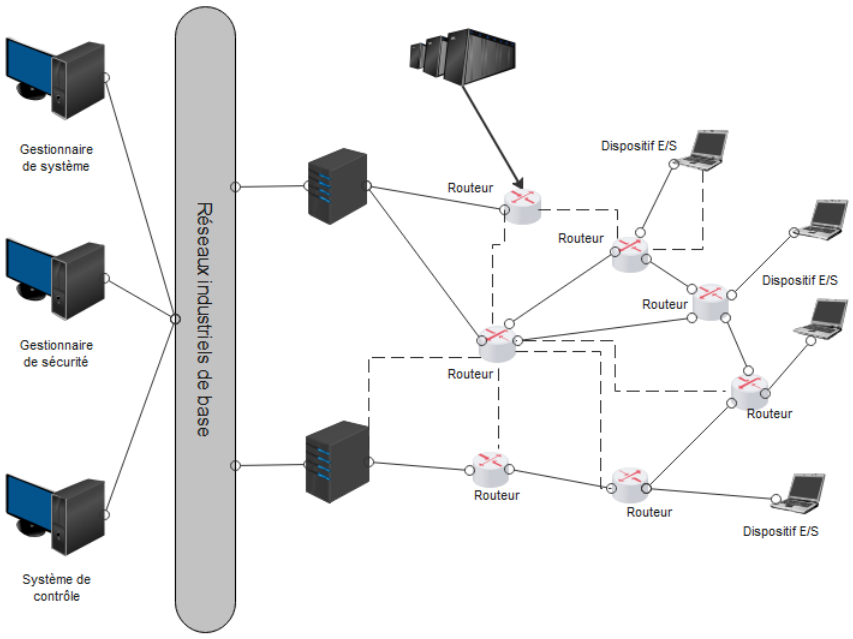


Figure 1.15 Architecture de réseau ISA100.11a

Les dispositifs d'infrastructure se composent de routeurs de base, de passerelles, de gestionnaires de systèmes et de gestionnaires de sécurité.

- Les routeurs de réseau fédérateur utilisent des réseaux fédérateurs, le routeur de réseau fédérateur achemine les données d'un sous-réseau vers la destination via les réseaux fédérateurs. Les réseaux fédérateurs ont généralement des débits de données plus élevés, mais ils ne sont pas couverts par la norme ISA100.11a.
- La passerelle est le dispositif d'interface entre le réseau de l'usine et le réseau ISA100.11.
- Les gestionnaires de systèmes sont responsables de la gestion des appareils, de la configuration des communications et de la gestion du système.
- Les responsables de la sécurité sont chargés de la gestion des clés de sécurité et fournissent des services de sécurité.

1.4.5. 6LoWPAN

L'IPv6 sur les réseaux personnels sans fil à faible puissance, 6LoWPAN, est une norme basée sur la norme 802.15.4 qui supprime les obstacles à l'utilisation de l'IPv6 dans les appareils embarqués à faible puissance et à traitement limité. Ce protocole permet d'utiliser l'IP directement sur de petits capteurs à faible coût. Sachant qu'il n'y a pas assez d'adresses au format IP actuel avec la version IP actuelle pour étendre l'internet des objets, 6LoWPAN part du principe de l'IPv6, dans le but de donner une adresse à chaque appareil.

Si un ensemble d'adresses IPv6 de 40 octets devait être placé dans une trame 802.15.4 de 127 octets, il y aurait peu de place pour une quelconque charge utile. Afin de donner une solution à ce problème, 6LoWPAN utilise la compression d'adresses sans état pour réduire l'adresse des appareils à une poignée d'octets.

6LoWPAN a été développé par l'Internet Engineering Task Force (IETF) comme une norme ouverte qui promet d'étendre les réseaux IP existants aux nœuds de capteurs individuels. La pile, illustrée dans la figure 1.16, spécifie UDP et non TCP comme transport, limitant tout encombrement inutile dans les paquets.

L'utilisation de l'internet sans fil intégré apporte de multiples avantages à un large éventail d'applications en les intégrant à l'internet des objets, par exemple : connexion aisée à d'autres réseaux IP sans passer par des passerelles de traduction ; intégration à l'infrastructure de réseau existante ; grande robustesse et fiabilité offertes par le protocole IP ; utilisation d'une norme ouverte et gratuite avec une documentation accessible à tous ; outils de gestion, de mise en service et de diagnostic des réseaux IP.

Les caractéristiques d'IPv6, telles qu'une structure d'en-tête simple et son modèle d'adressage hiérarchique, le rendent idéal pour une utilisation dans les réseaux sans fil intégrés avec 6LoWPAN. Les possibilités qu'offre IPv6 de créer des implémentations légères pour les faibles capacités de calcul et la conception d'un Neighbor Discover (ND) spécifiquement pour 6LoWPAN ont aidé cette norme à devenir une extension efficace d'IPv6 dans le domaine des réseaux sans fil embarqués qui a pu résoudre les problèmes d'intégration [42].

1.4.6. ZIgbee

C’est un protocole sans fil à faible débit de données et à faible consommation d'énergie destiné à l'automatisation, au contrôle et à la surveillance à distance [43]. L'Alliance ZigBee7 a été créée en 2002, afin de "développer des normes qui, à terme, offrent une plus grande liberté et une plus grande flexibilité pour un monde plus intelligent et plus durable" [44]. ZigBee est développé sur la base de la norme IEEE 802.15.4-2003 [45] et ne prend en charge que les topologies en étoile, en arbre et en maille. Autrement dit, ZigBee ne prend pas en charge la topologie des réseaux d'arbres en grappe [46].

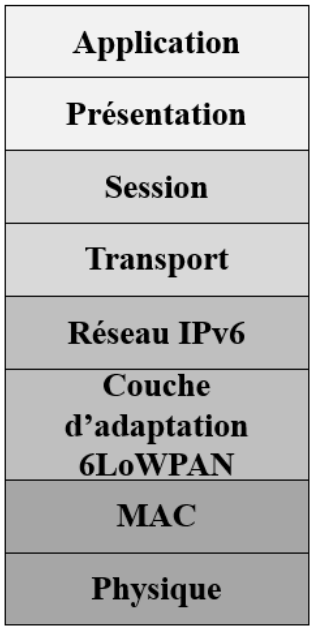


Figure 1.16 Pile de protocoles 6LoWPAN [42]

L'IEEE et la ZigBee Alliance ont travaillé en étroite collaboration pendant le processus de normalisation. Cependant, ces deux communautés ont des centres d'intérêt différents. Le groupe de travail IEEE 802.15.4 se concentre principalement sur la couche physique et la couche de liaison de données de la pile de protocoles, tandis que la ZigBee Alliance se concentre sur la spécification des couches supérieures (à partir de la couche réseau et au-dessus, voir figure 1.17), afin de fournir des réseaux interopérables, des services de sécurité, des interfaces d'application, ainsi que l'évolution du marketing et de l'ingénierie de la norme ZigBee.

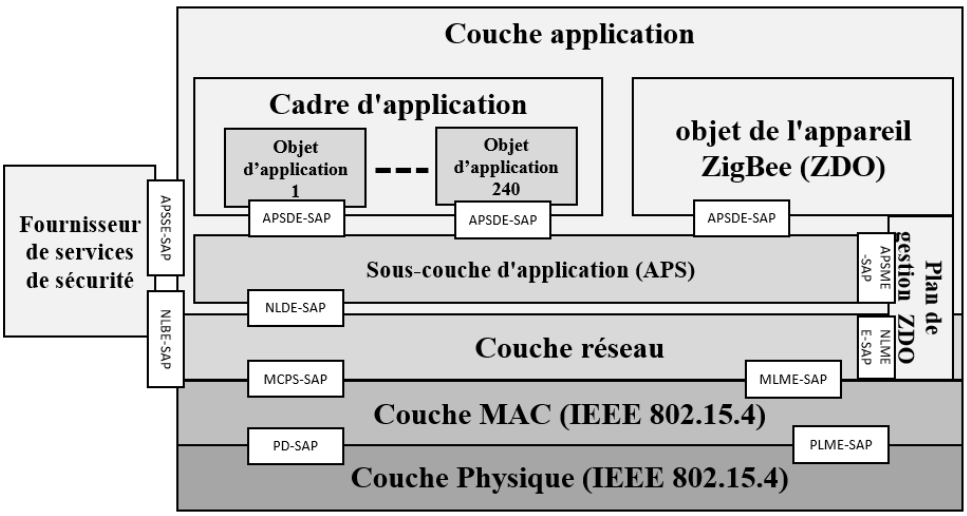


Figure 1.17 pile de l'architecture ZigBee.

La couche réseau ZigBeeTM est conçue pour faciliter la conservation de l'énergie et pour assurer une faible latence. Il fournit des fonctionnalités permettant de contrôler et d'utiliser la couche MAC ainsi qu'une interface de service avec la sous-couche de support d'application (APS) située au-dessus. La couche réseau ZigBee est responsable du démarrage d'un réseau, de l'attribution des adresses de noeud, de la configuration de nouveaux dispositifs, de la découverte d'autres réseaux ZigBee et de l'application des politiques de sécurité [46].

L'APS fournit une interface entre la couche réseau et la couche application [47] en fournissant des services qui sont offerts par deux entités : l'entité de service de données (APSDE) et l'entité de service de gestion (APSME). L'APSDE permet le transport des unités de données de protocole d'application (PDU) entre les appareils. Les services fournis par l'APSDE sont les suivants :

- Génération des PDU au niveau de l'application (APDU) - ajout d'un en-tête de protocole approprié aux APDU et génération des PDU APS.
- Création d'un lien logique unidirectionnel entre une paire d'identificateurs d'un groupe de points terminaux source et un point terminal de destination. L'APSDE est capable d'envoyer des messages d'un appareil à un autre une fois que ces deux appareils sont liés.
- Filtrage des adresses de groupe basé sur l'appartenance à un groupe de points terminaux.
- Fiabilité du transport - assurer la fiabilité des transactions en recourant à des tentatives de bout en bout.
- Rejet des paquets en double.
- Fragmentation et réassemblage des APDU plus longs que la charge utile d'un seul paquet de la couche réseau.

La couche d'application dans ZigBee se compose du cadre d'application et de l'objet périphérique ZigBee (ZDO). Le cadre d'application permet à chaque nœud ZigBee de définir jusqu'à 240 points d'extrémité d'application afin de transmettre et de recevoir des données d'application. Le ZDO fournit des fonctions telles que la découverte de services et de dispositifs, l'initialisation des coordinateurs, la gestion de la sécurité, la gestion des liaisons entre les points terminaux des applications et la gestion du réseau.

1.5. Les IWSN dans l'Internet des Objets Industriels IIOT

1.5.1. Internet des Objets connectés IOT

Le concept d'internet des objets trouve son origine dans les travaux réalisés en 1999 par des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT). L'idée a été mise en avant par Neil Gereshenfeld du Media Lab du MIT dans son livre « When Things Start to Think ». L'ancien directeur de l'Auto-ID Center du même institut, Kevin Ashton, est cité comme la première personne à utiliser le terme « internet des choses » dans le titre d'une présentation qu'il a faite à Procter & Gamble en 1999. [48]. Selon [49], l'internet des objets (IOT) est défini comme « des objets ayant une identité et des personnalités opérant dans des espaces intelligents utilisant des interfaces intelligentes pour se connecter et communiquer dans des contextes sociaux, environnementaux et d'utilisateurs » ; sémantiquement, l'IOT signifie « un réseau mondial d'objets interconnectés uniquement adressables, basé sur des protocoles de communication standard » [50]. L'IOT se concentre sur l'interconnexion de divers appareils (de petite ou grande taille, intelligents ou non de la perspective du traitement de l'information, mobile ou fixe) ensemble pour un réseau étendu (fonctionnant généralement sur IP).

L'IOT est un nouveau concept qui devient de plus en plus populaire dans le domaine des communications sans fil. L'idée de base de ce paradigme est la présence omniprésente de ressources informatiques autour de nous, qui sont capables d'interagir et de coopérer les unes avec les autres, grâce à des schémas d'identification uniques et des protocoles de communication convenus, afin de réaliser ensemble certaines tâches communes [50]. L'IOT devrait présenter un niveau d'hétérogénéité des dispositifs encore plus élevé que celui de l'internet actuel. Des dispositifs tels que les lecteurs d'étiquettes d'identification par radiofréquence (RFID) [51], les capteurs, les actionneurs, les téléphones portables, etc. devraient être des « choses » dans l'IOT.

L'un des problèmes les plus épineux de l'IOT est la consommation d'énergie des appareils, car nous nous attendons à ce qu'un grand nombre d'appareils à piles soient connectés l'IOT. En raison de limitations telles que la petite taille physique, l'environnement difficile, l'absence d'intervention humaine, etc., il est important d'utiliser efficacement les ressources énergétiques disponibles. Un autre problème est celui de la fiabilité. Nous ne voulons pas exiger que les dispositifs soient extrêmement fiables, car le fait de garantir la fiabilité des appareils individuels peut coûter très cher. Toutefois, la fiabilité d'un groupe de dispositifs qui tentent d'accomplir une tâche commune peut être beaucoup plus élevée que leurs fiabilités individuelles. Pour y parvenir, les dispositifs de l'IOT doivent être adaptés aux échecs des autres et être capables de s'autoconfigurer. En outre, puisque le nombre d'appareils dans l'IOT sera important, la configuration individuelle ne sera tout simplement pas réalisable dans la pratique.

Les travaux de [52] présentent les compétences suivantes liées à l'IOT :

- **Communication et coopération :** En se mettant en réseau avec les ressources de l'Internet et entre eux, les objets peuvent utiliser des services et des données et mettre à jour leur état. Différentes technologies sans fil sont concernées, par exemple GSM, UMTS, Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee et d'autres normes de mise en réseau en cours d'élaboration, notamment celles qui concernent les réseaux personnels sans fil (WPAN).
- **Adressabilité :** Les objets peuvent être adressés et localisés par le biais de services de recherche, de découverte ou de dénomination au sein de l'IOT. Et en raison de leur adressabilité, les objets peuvent également être interrogés et configurés à distance.
- **Identification :** Les objets peuvent être identifiés de manière unique dans l'IOT. Les technologies d'identification sont par exemple la NFC (Near Field Communication), la RFID et les codes-barres à lecture optique. Avec certains médiateurs, même les objets sans aucune ressource énergétique intégrée peuvent être identifiés. Grâce à l'identification, les objets peuvent être liés à des informations relatives à l'objet en question. Ces informations peuvent être obtenues à partir du serveur si le médiateur est en connexion avec le réseau.
- **Détection :** Les objets sont équipés de capteurs, avec lesquels ils peuvent collecter des informations sur l'environnement, les transmettre, les enregistrer ou y réagir directement.

- **Actionnement :** Les objets peuvent manipuler leur environnement à l'aide d'actionneurs. La conversion de signaux électriques en mouvement mécanique en est un exemple. Ces actionneurs peuvent être utilisés pour contrôler des processus du monde réel à distance via Internet.
- **Traitement intégré de l'information :** Les objets intelligents peuvent comprendre un processeur ou un microcontrôleur ainsi qu'une capacité de stockage. Grâce à ces ressources, les informations des capteurs peuvent être interprétées et traitées. Elles peuvent également fournir à l'objet une mémoire de la façon dont il a été utilisé.
- **Localisation :** Les objets intelligents peuvent être localisés et ils peuvent être conscients de leur emplacement. Les technologies appropriées pour la localisation sont par exemple le réseau de téléphonie mobile ou le GPS, l'UWB (Ultra-Wide Band), les mesures de temps par ultrasons, les technologies optiques et les balises.
- **Interfaces utilisateurs :** Les objets intelligents sont capables de communiquer directement ou indirectement avec les personnes. Différents types d'interfaces innovantes sont concernées ici, par exemple des interfaces tangibles, des affichages flexibles à base de polymères, et des méthodes de reconnaissance de gestes, de voix ou d'images.

1.5.2. Industrie 4.0

Le terme « Industrie 4.0 » provient de la stratégie de haute technologie du gouvernement allemand. L'industrie 4.0 représente la quatrième révolution industrielle favorisant l'usine intelligente où les systèmes cyberphysiques CPS surveillent les processus de fabrication et font des décisions décentralisées [53]. L'environnement industriel intelligent est un élément important dans Industrie 4.0 qui a la capacité de détecter l'environnement industriel, de reconnaître et de faire le suivi des objets cibles, l'obtention d'une gestion autorisée, le contrôle de la fabrication et la mise en réseau des systèmes de fabrication pour la production industrielle.

Comme il a été souligné en [54], plusieurs systèmes de détection et de communication avancés les technologies doivent être utilisées afin de créer un environnement industriel intelligent viable, y compris la découverte, qui implique l'exploration et la découverte d'objets ou de dispositifs dans l'environnement ; l'identification, y compris la reconnaissance des informations relatives aux dispositifs ou aux objets et les autoriser ; la communication, qui consiste à instaurer une communication en utilisant des protocoles spécifiques, communiquant avec d'autres appareils du réseau et partageant des données vers une plateforme dans le nuage pour un accès à distance ; et le contrôle de l'environnement industriel intelligent où des appareils sont faits à distance soit automatiquement sous certaines conditions.

Sur la base du contexte de l'Industrie 4.0, les principales caractéristiques des environnements industriels intelligents peuvent être caractérisées comme suit :

- **Détection environnementale :** Le besoin d'informations en temps réel sur l'environnement industriel est presque un incontournable dans chaque industrie. La détection de l'environnement implique une collecte de données efficace, qui peut être utilisée pour la planification, la prévention des accidents et l'analyse. En fonction des informations recueillies sur les objets ou des paramètres ambiants, tels que la température, l'humidité, les niveaux de poussière ou la présence de certains gaz, on peut prendre des mesures préventives contre des circonstances indésirables. Les installations industrielles et les équipements associés sont généralement localisés dans des environnements qui sont plus risqués que les zones résidentielles ou les bureaux. Le maintien d'un environnement de travail sûr est d'une importance capitale pour la gestion intelligente des usines. La sécurité des sites industriels l'environnement fait référence à la sécurité des personnes, des produits et des équipements. Les priorités sont en particulier dans

les domaines sensibles, l'intégrité des obstacles et les points d'intérêt clé. La détection environnementale peut fournir des alertes précoces adéquates et une détection prédictive des catastrophes. Les réseaux câblés (par exemple, les bus de terrain) et les communications sans fil (par exemple, les IWSN) sont des éléments importants dans un environnement connecté. En communiquant les uns avec les autres, ainsi qu'en partageant des données avec des serveurs distants ou des plates-formes en cloud, les différents dispositifs physiques de l'environnement intelligent peuvent tous être connectés par un réseau continu, ce qui leur permet de répondre à la fois aux changements d'état du système et aux demandes des utilisateurs de manière rapide et précise.

- **Surveillance des processus et des systèmes :** La surveillance des processus est importante dans de nombreux domaines industriels. Par exemple, les échangeurs de chaleur sont couramment utilisés dans les centrales électriques, la pétrochimie et d'autres industries lourdes. Les pressions et les températures élevées ou les variables de traitement sensibles dans ces environnements industriels doivent être surveillées. En outre, la surveillance des processus peut aider à évaluer et à améliorer la qualité des biens à chaque étape du processus de production, de distribution et de consommation. La surveillance d'état est le processus de surveillance d'un paramètre de l'état des machines (vibrations, température, etc.), afin d'identifier un changement significatif qui peut être indicatif d'un défaut en cours de développement. C'est une composante majeure de la maintenance prédictive. La surveillance continue des capteurs peut éliminer la nécessité de visites constantes pour enregistrer manuellement les relevés des jauges et permet d'identifier plus tôt les relevés inhabituels et de prendre plus rapidement des mesures pour rechercher et rectifier les défauts avant qu'ils ne se transforment en problèmes graves. En outre, de nombreuses machines-outils critiques ne peuvent fonctionner que dans certaines plages de température, de pression et de vibration. Lorsque l'état de fonctionnement s'écarte des paramètres prescrits, le système intégré peut générer automatiquement une alerte pour les équipes de maintenance.
- **Contrôle à distance :** La bonne gestion d'une usine ne nécessite pas seulement la collecte d'informations précises sur le fonctionnement des machines industrielles, mais aussi la capacité de contrôler ces machines et d'autres dispositifs connexes chaque fois que cela est nécessaire. Par conséquent, la commande à distance de machines ou d'appareils industriels est considérée comme un aspect essentiel d'un environnement industriel intelligent. Comme mentionné plus haut, les actionneurs et les IWSN sont deux technologies couramment utilisées dans les environnements industriels intelligents. Elles servent à remplir des fonctions de détection, de traitement de l'information et de communication, en connectant des dispositifs industriels pour former un réseau continu. Une usine intelligente ne doit pas seulement avoir une structure modulaire, mais doit aussi maintenir une infrastructure de communication fiable par le biais d'un réseau sans fil [55].

Les IWSNs suscitent un intérêt important, en particulier à la lumière des récents progrès réalisés dans les technologies concernées, notamment la microélectronique, les systèmes intégrés, le traitement du signal et les technologies de communication. Les IWSNs intègrent des capteurs, l'informatique embarquée, les réseaux modernes, les communications sans fil et les technologies de traitement de l'information distribuées pour acquérir des informations sur l'état des objets, constituant essentiellement un réseau intelligent autoconfigurable et auto organisée. Il a été utilisé dans diverses applications industrielles et grand public, telles que la surveillance et le contrôle des processus industriels et la surveillance de la santé des machines [38].

1.5.3. Internet industriel et l'IOT

General Electric présente l'Internet industriel comme un terme qui signifie l'intégration de machines physiques complexes avec des capteurs et des logiciels en réseau. L'internet industriel réunit des domaines tels que l'IOT, le Big Data, l'apprentissage machine et la communication M2M (Machine

to Machine), pour collecter et analyser les données des machines et les utiliser pour ajuster les opérations [23].

Selon l'Industrial Internet Consortium IIC, l'Internet industriel relie les appareils et machines intelligents et les personnes au travail, ce qui permet de prendre de meilleures décisions grâce à des analyses avancées qui aboutissent à des résultats commerciaux transformationnels. L'internet industriel couvre le côté non-consommateur de l'IOT et applique la « pensée internet » aux environnements industriels [56].

L'internet industriel se compose de trois éléments clés qui, ensemble, représentent l'essence même de l'idée, figure 1.18. Le premier élément clé de l'internet industriel est constitué par les machines intelligentes. Cela signifie qu'il faut connecter les machines, les flottes, les installations et les réseaux du monde entier avec des commandes, des capteurs et des applications logicielles avancés. Le deuxième élément repose sur l'analyse avancée, signifie combiner la puissance de l'analyse basée sur la physique, l'expertise du domaine, l'automatisation et les algorithmes prédictifs pour comprendre le fonctionnement des machines et des systèmes. Le troisième élément concerne les personnes au travail, signifie essentiellement la mise en relation des personnes à tout moment pour soutenir des opérations, une conception et une maintenance plus intelligentes ainsi qu'une qualité de service et une sécurité élevée [57].

La connexion et la combinaison de ces trois éléments clés permettent aux entreprises et aux économies de bénéficier de nombreuses nouvelles opportunités et de gains d'efficacité dans plusieurs domaines. L'internet industriel accélérera la croissance de la productivité de la même manière que la révolution industrielle et la révolution internet l'ont fait dans le passé [36].

1.5.4. Rôles des IWSN dans l'internet industriel

L'objectif de l'Industrie 4.0 est de connecter et d'intégrer les industries traditionnelles, en particulier les industries manufacturières, afin de réaliser la flexibilité, l'adaptabilité et l'efficacité et d'accroître la communication efficace entre les producteurs et les consommateurs [58] [59]. L'industrie 4.0 fait référence à la coopération entre différentes usines qui sont généralement basées dans différents endroits éloignés. Par conséquent, les communications et les réseaux jouent un rôle important dans l'industrie 4.0.

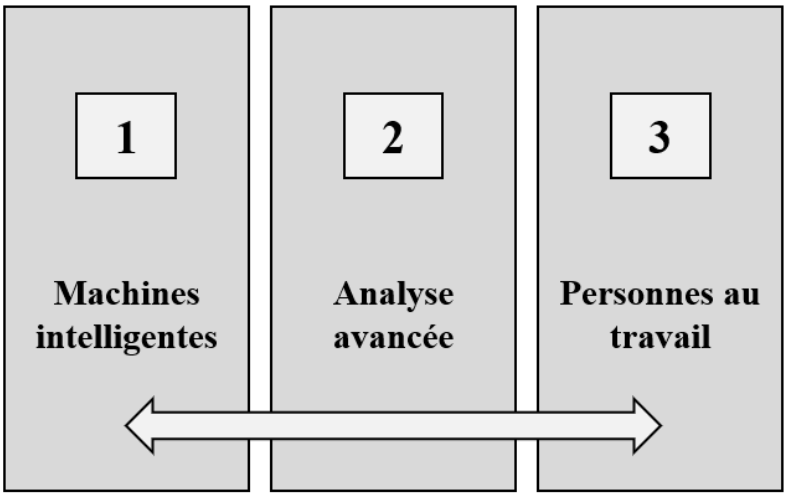


Figure 1.18 Les éléments clés de l'internet industriel [57]

Les réseaux de communication établis dans les environnements industriels peuvent être divisés en deux grandes catégories, câblées et sans fil. Les réseaux de communication câblés ont été conçus pour cibler quatre objectifs spécifiques, notamment l'assurance en temps réel, la garantie de la sûreté fonctionnelle, la sécurité et le contrôle de supervision centralisé pour les processus décentralisés. Cependant, bien que les réseaux câblés offrent des débits de données et une fiabilité modeste, ils ne sont pas parvenus à offrir l'évolutivité, la rentabilité et le déploiement efficace des réseaux, qui sont des attributs que les fabricants actuels souhaitent mettre en œuvre. C'est pourquoi les chercheurs se sont penchés sur les solutions de communication sans fil pour l'automatisation industrielle [60].

Les réseaux sans fil jouent un rôle clé en permettant la flexibilité et l'évolutivité des systèmes d'internet industriel des objets (IIoT), grâce à leur capacité à prendre en charge les communications à faible puissance et à longue portée pour les appareils. En outre, les technologies sans fil sont considérées comme des outils clés pour le déploiement du cadre Industrie 4.0 et peuvent être utilisées pour les usines intelligentes et les systèmes de fabrication intelligents grâce au déploiement de réseaux de capteurs sans fil (WSN) et dans des réseaux de capteurs industriels sans fil (IWN) spécifiques.

1.5.5. Plateformes réseaux dédiés à l'IIOT

1.5.5.1.SIGFOX

Sigfox est une technologie LPWAN propriétaire, basée sur la technique de modulation à bande étroite. Cette technologie permet l'utilisation de la modulation BPSK (binary phase-shift keying) qui est robuste pour les communications à longue distance, et offre une transmission à très faible débit de données sur des communications à très longue distance dans des environnements difficiles. Chaque message a une largeur de 100 Hz et un taux de transfert de 100 ou 600 bits par seconde, selon la région. Il est donc possible de réaliser de longues distances tout en étant très robuste contre le bruit.

1.5.5.2.LoRaWAN

LoRaWAN (LoRa Wide Area Network) est une norme pour les réseaux de faible puissance parrainée par la LoRa Alliance. L'architecture LoRaWAN est une structure en "étoile d'étoiles" de dispositifs terminaux se connectant via des passerelles pour se connecter aux serveurs du réseau. LoRaWAN est un WAN à faible consommation d'énergie optimisé pour une faible consommation d'énergie est conçu pour supporter de grands réseaux avec des millions et des milliers de dispositifs. Il se caractérise par un faible coût, une communication bidirectionnelle, la mobilité et la sécurité des objets connectés, la communication de machine à machine (M2M).

1.5.5.3.NB-IoT

Le NB-IOT est basé sur la technologie radio à bande étroite et normalisé par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project), et il est basé sur le protocole LTE. Il est basé sur le protocole LTE. Le protocole de communication NB-IoT est basé sur le protocole LTE. En fait, le NB-IoT réduit au minimum les fonctionnalités du protocole LTE et les améliore selon les besoins des applications IoT. NB-IoT servira les marchés IoT de plus grande valeur qui sont prêts à payer pour une latence très faible et une qualité de service élevée. NB-IoT est un nouveau moyen de communiquer avec des objets qui nécessitent de petites quantités de données, sur de longues périodes, dans des endroits difficiles d'accès. Il permet de connecter simplement et efficacement des appareils à des réseaux mobiles déjà établis et de traiter de manière sûre et fiable de petites quantités de données bidirectionnelles relativement peu fréquentes. Il s'agit également de la technologie de communication cellulaire sans fil la plus prometteuse pour la 5G.

1.5.6. Protocoles de communication IOT :

1.5.6.1.MQTT

Il s'agit d'un protocole ouvert de télémétrie et de surveillance, dont la fonction principale est de publier des informations ou de s'abonner à leur réception, entre plusieurs clients via un seul serveur (appelé courtier). Il a été inventé en 1999 par des chercheurs d'IBM, et normalisé en 2013 par OASIS. Parmi les caractéristiques de ce protocole figurent sa légèreté, sa facilité de mise en œuvre, sa flexibilité et sa sécurité, ainsi que son évolutivité, qui lui permet de gérer des milliers de connexions simultanées via son courtier de messagerie.

1.5.6.2.XMPP

Il s'agit d'un protocole ouvert, basé sur le modèle client-serveur dénaturé sans courtier. Il est conçu pour des applications en temps quasi réel et prend donc en charge efficacement les petits messages à faible latence. Les premières technologies Jabber/XMPP ont été développées par Jeremie Miller en 1998, et normalisées par l'IETF. Dans le contexte de l'IIoT vert, XMPP peut présenter certaines caractéristiques utiles telles que l'extensibilité, la flexibilité et l'adressage convivial des appareils.

1.5.6.3.AMQP

Il s'agit d'un protocole ouvert, basé sur l'architecture "publish-subscribe". Développé par la banque JPMorgan ChaseIl, il a été conçu avec les principales caractéristiques suivantes comme objectifs : Sécurité, Fiabilité, Interopérabilité.

1.5.6.4.CoAP

Il a été créé par le groupe IETF (Constrained REST Ful Environment Core) pour les applications de l'IOT. CoAP est similaire à HTTP à plusieurs égards, CoAP supporte les proxies HTTP, ce qui signifie que les clients peuvent demander des ressources à un serveur CoAP en utilisant des requêtes HTTP normales. Mais il ne s'agit pas seulement d'une version réduite ou compressée du protocole HTTP. CoAP comporte de nouvelles fonctionnalités spécialement conçues pour des environnements limités qui ne font pas partie de HTTP.

1.5.6.5.DDS

Une norme API pour la connectivité centrée sur les données a été introduite en 2004 par l'Object Management Group (OMG). Son objectif est de relever les défis de la distribution des données typiques des applications de défense et aérospatiales. Basée sur un paradigme de communication simple de type "publier-s'abonner", elle présente notamment l'avantage de prendre en charge l'intégration des composants du système, en fournissant la connectivité des données à faible latence, l'extrême fiabilité et l'architecture évolutive qu'exigent les applications IoT critiques et commerciales.

1.6.Conclusion

La communication sans fil dans les environnements intérieurs industriels a suscité un intérêt considérable pour la recherche au cours de la dernière décennie. Elle a rapidement gagné en popularité grâce à la disponibilité d'une énorme bande passante non régulée et de nombreux autres avantages par rapport aux liaisons RF. De plus, la disponibilité de récepteurs et d'émetteurs à bas prix le rend adapté aux communications en intérieur. Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les systèmes communicants filaires industriels avec les avantages qu'en a tirés l'industrie en les utilisant dans ses différents processus. Ces réseaux de systèmes communicants filaires industriels ont évolué

progressivement vers des réseaux de systèmes de communication sans fil basés sur le canal RF, suivront après l'intégration de l'Internet des objets et l'internet industriel pour permettre le déploiement des réseaux de capteurs sans fil plus efficacement et passer à la nouvelle révolution industrielle avec l'industrie 4.0. Notre travail porte principalement sur l'étude d'un système de transmissions sans fil pour les milieux industriels, où le canal de propagation est fortement bruité. Les performances d'un système de communication sans fil sont impactées par les conditions de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Il est nécessaire donc d'avoir une modélisation appropriée du canal bruité. Il s'ajoute à cela la nécessité de proposer un modèle de chaîne de transmission, adéquate et optimale pour ce type de milieu. Dans le chapitre qui va suivre, nous présenterons une nouvelle technique prometteuse de modulation par impulsion, et nous finirons ce chapitre par une présentation des codes correcteurs d'erreurs et leurs rôles dans l'amélioration des performances des réseaux de capteurs.

Chapitre 2
Transformé en ondelette et codes correcteurs d'erreurs

2.1. INTRODUCTION **38**
2.2. Techniques de modulations pour les réseaux de capteurs **38**
2.2.1. QAM 39
2.2.2. PSK 41
2.2.3. FSK 44
2.3. ONDELETTE DISCRÈTE COMME TECHNIQUE DE MODULATION **46**
2.3.1. Transformée en ondelettes continues CWT 46
2.3.2. Transformée en ondelettes discrètes DWT : 47
2.3.3. Analyse multi-résolutions et bancs de filtres 48
2.3.3.1. Analyse multi-résolutions 48
2.3.3.2. Bancs de filtres : 49
2.4. Familles des ondelettes : **52**
2.4.1. Ondelette de HAAR : 53
2.4.2. Ondelette de Daubechies : 54
2.4.3. Ondelette de Symlet : 56
2.5. Transformée par paquets d'ondelettes discrète **57**
2.5.1. IDWPT : 57
2.5.2. DWPT : 59
2.6. Codes correcteurs d'erreurs et améliorations de la communication **61**
2.6.1. CAPACITE DU CANAL DE SHANNON : 61
2.6.2. SYSTEMES A PUISSANCE LIMITEE ET A BANDE PASSANTE LIMITEE 64
2.6.3. EFFICACITE DE LA BANDE PASSANTE DES SYSTEMES MODULES 64

2.6.4. CODES DE CORRECTION D'ERREURS CCE 64
2.6.5. Codes en bloc 64
2.6.6. Codage convolutif 66
2.6.7. Codes Reed Solomon 67
2.6.8. Contrôle de parité de faible densité (Low-density Parity Chec LDPC) 68
2.6.9. Rôle des codes correcteurs d'erreurs dans les IWSN 68
2.7. Conclusion 69

2.1. INTRODUCTION

La croissance rapide des communications mobiles et de l'accès à l'internet sans fil a engendré une forte demande d'émetteurs-récepteurs sans fil peu coûteux, portables et à haut débit de données, fonctionnant dans des environnements variés. Les services tels que les émetteurs-récepteurs de données et de vidéo à faible consommation d'énergie devraient permettre d'obtenir des transmissions à haut débit fiables, même dans des scénarios de mobilité élevée. La plupart de ces systèmes de transmission subissent des dégradations, telles que l'atténuation, le bruit, l'évanouissement par trajets multiples, l'interférence, la variation temporelle et la non-linéarité. Ils doivent également satisfaire à des contraintes telles qu'une puissance d'émission limitée et, surtout, une largeur de bande limitée. Ce chapitre commence par une présentation sur les éléments fondamentaux de la théorie des ondelettes orthogonales. Ensuite, on présentera l'analyse multi-résolution à base de bancs de filtres pour pouvoir expliquer après son rôle dans le fonctionnement de l'émetteur et récepteur de notre architecture. L'objectif de la modulation par paquets d'ondelettes discrètes dans ce contexte consiste d'une part à générer plusieurs formes d'impulsions par leur synthèse et ensuite d'être capable de les affecter tout simplement à chacun des utilisateurs, et d'autre part la possibilité de reconstituer ces impulsions par les récepteurs, en offrant une méthode d'analyse efficace et simple à mettre en œuvre. Ce chapitre finira par une introduction à l'état de l'art des codes correcteurs d'erreur et de leurs rôles dans l'amélioration des performances des systèmes de communications sans fil.

2.2. Techniques de modulations pour les réseaux de capteurs

Dans la modulation numérique, le signal porteur analogique est modulé par un signal discret. Les méthodes de modulation numérique peuvent être considérées comme une conversion numérique/analogique, et la démodulation ou la détection correspondante comme une conversion analogique/numérique. Les modifications du signal de la porteuse sont choisies parmi un nombre fini de symboles M alternatifs. Il existe de nombreux types de techniques de modulation numérique et aussi leurs combinaisons, selon les besoins. Parmi toutes ces techniques, nous allons parler des plus utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil : la Quadrature Amplitude Modulation ou **QAM** pour modulation d'amplitude en quadrature, la Phase-Shift keying ou **PSK** pour modulation par changement de phase, la Frequency-Shift Keying ou **FSK** pour modulation par déplacement de fréquence et la Minimum-Shift Keying ou MSK pour modulation à déplacement minimum. Les techniques de codage **M-ary** sont les méthodes où plus de deux bits sont faits pour transmettre simultanément sur un seul signal. Cela permet de réduire la largeur de bande, et cette technique existe pour le M-PSK, M-QAM et M-FSK.

2.2.1. QAM

La modulation QAM est la technique de modulation qui est largement utilisée pour la transmission OFDM pour moduler les signaux de données en une porteuse. La QAM est une méthode d'envoi de deux canaux d'information séparés par un canal qui est ensuite décalé pour former l'onde sinusoïdale et cosinusoïdale. Ces sorties sont additionnées algébriquement ainsi que les phases I et Q pour former une constellation de mappage pour la QAM. Cette dernière est largement utilisée pour la radiodiffusion numérique lorsque les débits de données sont plus élevés.

La QAM d'ordre supérieur à la capacité de transmettre plus de bits par symbole, ce qui permet de transmettre des données dans une largeur de bande beaucoup plus petite, ce qui en fait un système de transmission plus efficace sur le plan spectral [61]. Une QAM de niveau supérieur (MQAM) combinée à un codage FEC peut assurer l'efficacité de la largeur de bande avec des capacités de correction d'erreurs.

La QAM peut être considérée comme une modulation combinée d'amplitude et de phase. La forme d'onde du signal QAM peut être exprimée comme suit [62]

$$s_m(t) = A_{mi} g(t)\, cos(\, 2\pi f_c t) - A_{mq} g(t)\, sin(\, 2\pi f_c t) \tag{2-1}$$

où $S_m(t)$ représente le signal passe-bande choisi parmi les formes d'onde possibles M, A_{mi} et A_{mq} sont les amplitudes du signal porteur d'information (A_m) de la porteuse en phase et en quadrature et $g(t)$ est l'impulsion de signal dont la forme influence le spectre du signal transmis et f_c est la fréquence porteuse. La forme d'onde du signal QAM peut également être représentée par

$$S_m(t) = r(cos(\, 2\pi f_c t + \theta_m) \tag{2-2}$$

où, $r = \sqrt{A_{mi}^2 + A_{mq}^2}$ et $\theta_m = \tan^{-1}(A_{mq}/A_{mi})$. On peut donc observer les formes d'onde du signal QAM sous la forme de la modulation combinée d'amplitude (r) et de phase (θ_m).

Les constellations M-QAM peuvent être construites de plusieurs façons et elles ont des caractéristiques de capacité et d'erreur différentes. Les constellations de signaux QAM rectangulaires, dans lesquelles le nombre de bits par symbole est pair, présentent l'avantage indéniable de pouvoir être facilement générées et transmises sous la forme de deux signaux à modulation d'amplitude d'impulsion (PAM) imprimés sur des porteuses à quadrature de phase. De plus, ils sont facilement démodulés [62].

La constellation de signaux rectangulaires avec codage binaire et gris pour la 4-QAM et la 16-QAM est représentée à la figure 2.1. Pour un codage de canal basé sur un mappage orthogonal, les symboles de sortie du codeur de canal sont directement mappés à la modulation QAM en tant que constellation rectangulaire

a. Largeur de bande de transmission et efficacité de la bande passante :

La largeur de bande de transmission (transmission bandwidth BW) du système MQAM nécessaire pour passer le lobe principal du spectre du signal est calculée comme suit

$$B \approx \frac{2R_b}{log_2 M}(Hz) \tag{2-3}$$

Avec, R_b représentant le débit binaire d'entrée (bits/sec). Cette largeur de bande est appelée largeur de bande nulle à nulle. L'efficacité de la largeur de bande de la modulation MQAM est augmentée en utilisant des valeurs plus importantes de M. Le nombre de signaux possibles est donné par $M=2^m$, où m est un entier. La durée dans le temps du symbole est $T_s = m\, T_b$, où T_b est la durée de bit [63].

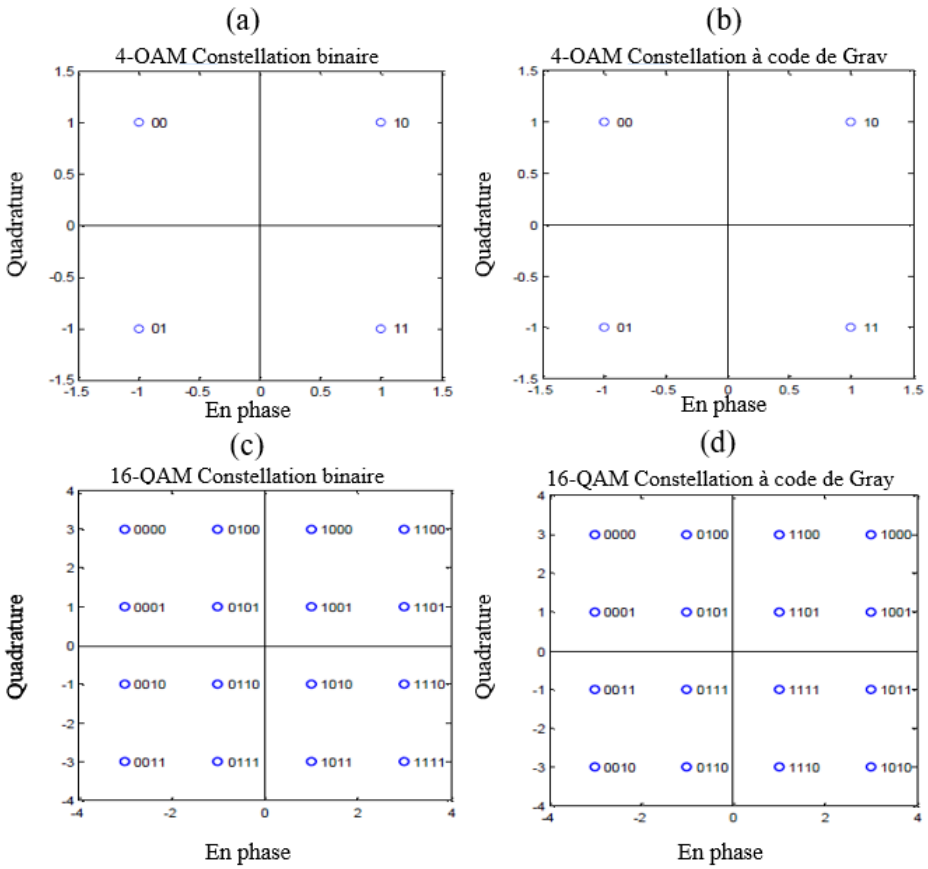


Figure 2.1 Diagramme de constellation rectangulaire pour différentes valeurs de M pour la modulation MQAM.

L'efficacité de la bande passante du système MQAM peut se définir comme suit :

$$\rho = \frac{R_b}{B} = \frac{log_2 M}{2} \tag{2-4}$$

Le Tableau 2.1 indique l'efficacité de la largeur de bande pour différents MQAM

Tableau 2.1. Efficacité de la largeur de bande du MAQ pour différentes valeurs de M.

M	4	16	64	256	1024
ρ (bits/sec/Hz)	1	2	3	4	5

a. Probabilité d'erreur *de MQAM :*

La probabilité approximative d'erreur de symbole P_u avec une constellation rectangulaire pour MQAM est donnée comme [62] :

$$P_u = 4(1-\frac{1}{\sqrt{M}})Q(\sqrt{\frac{3log_2 M}{M-1}\frac{E_{bavg}}{N_0}})(1-(1-\frac{1}{\sqrt{M}})Q(\sqrt{\frac{3\,log_2 M}{M-1}\frac{E_{bavg}}{N_0}})) \tag{2-5}$$

$$P_u \leq 4Q(\sqrt{\frac{3log_2 M}{M-1}\frac{E_{bavg}}{N_0}}) \tag{2-6}$$

où $\sqrt{M}$ représente le nombre de niveaux d'amplitude, $\log_2 M$ est le nombre de bits par symbole, $Q(x)$ est la fonction Q définie comme

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2\text{-}7)$$

Probabilité d'erreur binaire équivalente pour MQAM est approximée comme suit

$$P_b \approx \frac{1}{log_2 M} P_u \quad (2\text{-}8)$$

La figure 2.2 montre le tracé du BER de MQAM pour diverses valeurs de *M* avec canal AWGN en utilisant l'outil MATLAB

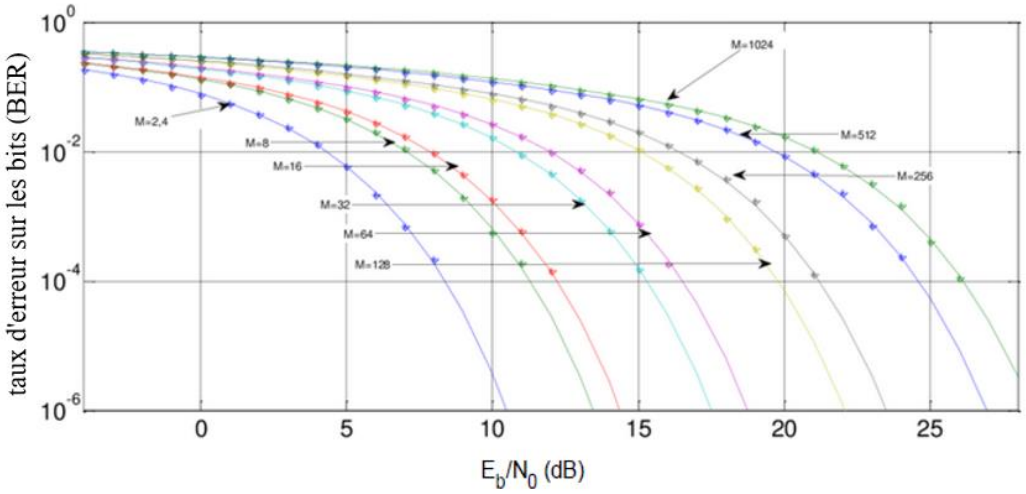


Figure 2.2. Taux d'erreur sur les bits de MQAM pour différentes valeurs de points de la constellation M.

2.2.2. PSK

La modulation par déplacement de phase (PSK) est un système de modulation numérique qui transmet des données en modulant la phase d'un signal de référence (la porteuse). Le schéma de modulation numérique utilise un nombre « fini » de signaux différents pour représenter les données numériques. La modulation PSK utilise un nombre fini de phases, auxquelles est attribué un motif unique de chiffres binaires.

Le démodulateur conçu spécifiquement pour le jeu de symboles est utilisé par le modulateur pour déterminer la phase du signal reçu et le mapper sur les symboles, récupérant ainsi les données d'origine. Pour cela, le récepteur doit pouvoir comparer la phase du signal reçu à un signal de référence.

Le démodulateur détermine les changements de la phase du signal reçu plutôt que la phase elle-même. Si le schéma dépend de la différence entre des phases successives, on parle de modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK). Il peut être beaucoup plus simple à mettre en œuvre que le PSK ordinaire car il n'est pas nécessaire que le démodulateur ait une copie du signal de référence pour déterminer la phase exacte du signal reçu.

a. Procédure de fonctionnement :

C'est la technique de modulation numérique dans laquelle la phase du signal porteur est modifiée, l'onde porteuse (généralement une sinusoïde). Dans le cas de la PSK, la phase est la partie modifiable

pour représenter le signal de données. Les deux façons fondamentales d'utiliser la phase d'un signal sont :

- Considérez la phase elle-même comme transmetteur de l'information.
- Considérer le changement de phase comme transmetteur de l'information.

Une façon pratique de représenter les schémas PSK se trouve sur le diagramme de la constellation. Celui-ci montre les points du plan complexe où les axes réels et imaginaires sont appelés respectivement axes en phase et en quadrature en raison de leur séparation de 90°. L'amplitude de chaque point le long de l'axe en phase est utilisée pour moduler une onde cosinusoïdale (ou sinusoïdale) et l'amplitude le long de l'axe en quadrature pour moduler une onde sinusoïdale (ou cosinusoïdale) [64].

b. Binary Phase Shift Keying BPSK :

C'est ce qu'on appelle aussi la modulation PSK à deux phases 2-PSK ou la modulation par inversion de phase. Dans cette technique, la porteuse sinusoïdale prend deux inversions de phase telles que 0° et 180°.

c. Quadrature Phase Shift Keying QPSK :

La QPSK ou 4-PSK peut être utilisée pour multiplier par 2 le débit de données par rapport à un système B-PSK tout en maintenant la même largeur de bande du signal ou le débit de données avec une largeur de bande réduite de moitié. Le BER de la 4-PSK est exactement le même que celui de la 2-PSK.

La QPSK transmet deux fois le débit de données dans une largeur de bande donnée par rapport à la BPSK au même BER. La pénalité technique est que les émetteurs et les récepteurs QPSK sont plus complexes, comme l'explique [65].

d. MPSK

Dans la modulation M-PSK, la phase du signal de la porteuse prend l'une des M valeurs de phases possibles $\frac{2(i-1)\pi}{M}$ où i = 1,2, ... M dans chacun des intervalles de signalisation de durée Ts. L'amplitude et la fréquence (fc) de la porteuse sont inchangées. Le signal modulé est de la forme

$$S_i(\mathrm{t}) = \sqrt{\frac{2\mathrm{Es}}{\mathrm{Ts}}}\cos\left[2\pi f_c\,\mathrm{t} + \frac{2\pi(\mathrm{i}-1)}{M}\right], \mathrm{i} = 1,2,\ldots,.\mathrm{M}, 0 \le \mathrm{t} \le T_s \qquad (2\text{-}9)$$

Cela peut être étendu comme,

$$S_i(\mathrm{t}) = \sqrt{\frac{2\mathrm{Es}}{\mathrm{Ts}}}\left[\cos\left(\frac{2\pi(\mathrm{i}-1)}{M}\right)\cos(2\pi f_c) - \sin\left(\frac{2\pi(\mathrm{i}-1)}{M}\right)\sin(2\pi f_c)\right. \qquad (2\text{-}10)$$

$$S_i(\mathrm{t}) = \sqrt{\mathrm{Es}}\cos\left(\frac{2\pi(\mathrm{i}-1)}{M}\right)\phi_1(\mathrm{t}) - \sqrt{\mathrm{Es}}\sin\left(\frac{2\pi(\mathrm{i}-1)}{M}\right)\phi_2(\mathrm{t}) \qquad (2\text{-}11)$$

Ou $\phi_1(\mathrm{t}) = \sqrt{\frac{2}{\mathrm{Ts}}}\cos(2\pi f_c)$

Et $\phi_2(\mathrm{t}) = \sqrt{\frac{2}{\mathrm{Ts}}}\sin(2\pi f_c)$

Ainsi, chaque $S_i(\mathrm{t})$ se compose de deux fonctions de base orthogonales $\phi_1(\mathrm{t})$ et $\phi_2(\mathrm{t})$, de sorte que la constellation de signaux pour M>2 est bidimensionnelle, où les points du message M sont également espacés dans le cercle de rayon $\sqrt{\mathrm{Es}}$ et centré à l'origine. La figure 2.1 montre le diagramme de constellation des signaux binaires codés en gris et en binaire par déplacement de phase binaire (BPSK), par déplacement de phase en quadrature (QPSK) et par 16-PSK avec $\sqrt{\mathrm{Es}}$ =1.

e. Spectres de puissance des signaux MPSK :

La durée de symbole de MPSK est donnée par $T_s = T_b\ log_2 M$, où T_b est la durée de bit. La densité spectrale de puissance en bande de base d'un signal MPSK est donnée par [10] :

$$S_B(f) = 2E_s\ sin\,c^2\ (T_s f_c) = 2E_b\ log_2 M\ sin\,c^2\ (T_b f_c\ log_2 M) \quad (2\text{-}12)$$

f. Largeur de bande de transmission et efficacité de la bande passante :

La largeur de bande de canal nécessaire pour transmettre le signal MPSK, également appelée largeur de bande nulle à nulle, est donnée par [61].

$$B = \frac{2}{T_s} \quad (2\text{-}13)$$

Où T_s est la durée du symbole. Puisque, le débit binaire $R_b = 1/T_b$,où T_b est la durée du bit, la largeur de bande du canal peut être donnée en termes de débit binaire R_b comme

$$B = \frac{2R_b}{\log_2 M} = \frac{2R_b}{m} Hz \quad (2\text{-}14)$$

Où $m = \log_2 M$ est le nombre de bits par symbole. En utilisant (2-14), l'efficacité de la largeur de bande de la MPSK est donnée comme

$$\rho = \frac{R_b}{B} = \frac{\log_2 M}{2} \quad (2\text{-}15)$$

La largeur de bande calculée et l'efficacité de la PSK pour diverses valeurs de M sont présentées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2. Bande passante de transmission et efficacité de la bande passante PSK pour différentes valeurs de M

M	**2**	**4**	**8**	**16**	**32**	**64**
Bande passante	$2R_b$	R_b	$2\ R_b/3$	$R_b/2$	$2\ R_b/5$	R_b3
ρ (bits/s/Hz)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

Ainsi, pour MPSK, à mesure que le nombre de points de la constellation M augmente, l'efficacité de la bande passante est améliorée.

a. *Probabilité d'erreur de MPSK :*

La probabilité approximative d'erreur de symbole P_u pour MPSK est donnée comme [61]

$$P_u \approx erfc\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}} sin\frac{\pi}{M}\right) \quad M \geq 4 \quad (2\text{-}16)$$

Où E_s est l'énergie par symbole, E_s/N_0 est l'énergie par symbole à la densité spectrale de bruit et $erfc$ est le ($complementary\ error\ function$) défini comme

$$erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2}\ dt \quad (2\text{-}17)$$

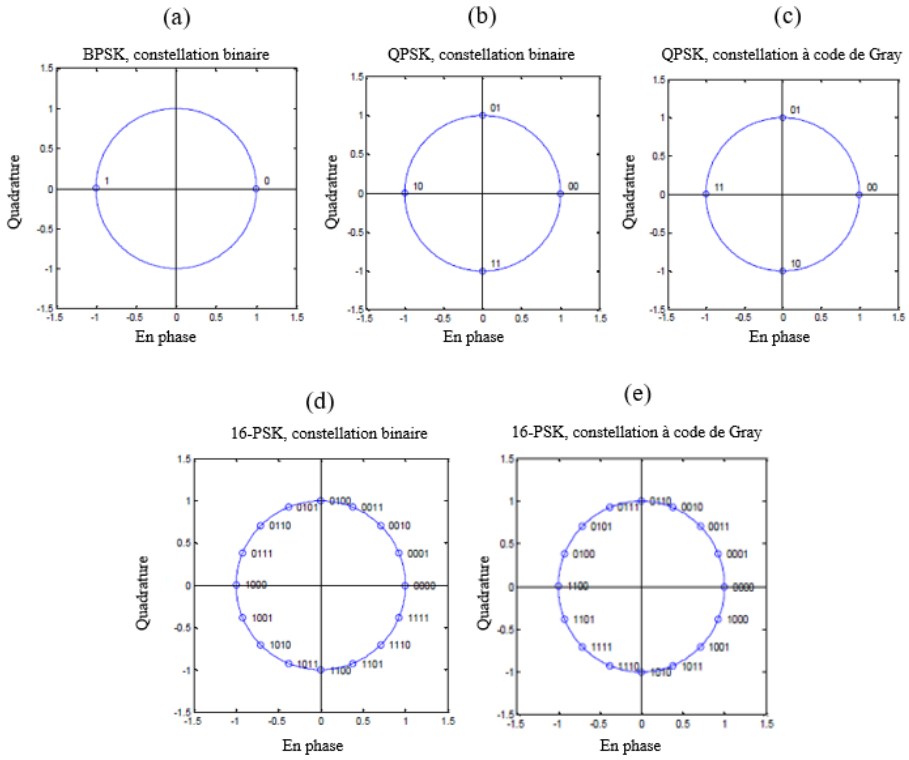


Figure 2.3 Diagramme de constellation pour différentes valeurs de M pour MPSK.

Probabilité d'erreur binaire équivalente pour MPSK est approximée comme :

$$P_b \approx \frac{1}{log_2 M} P_u \tag{2-18}$$

La figure 2.4 montre le tracé du BER pour la MPSK pour diverses valeurs de M pour le canal AWGN en utilisant l'outil BER dans MATLAB. La figure montre que les performances en matière d'erreurs sur les bits se détériorent à mesure que M augmente.

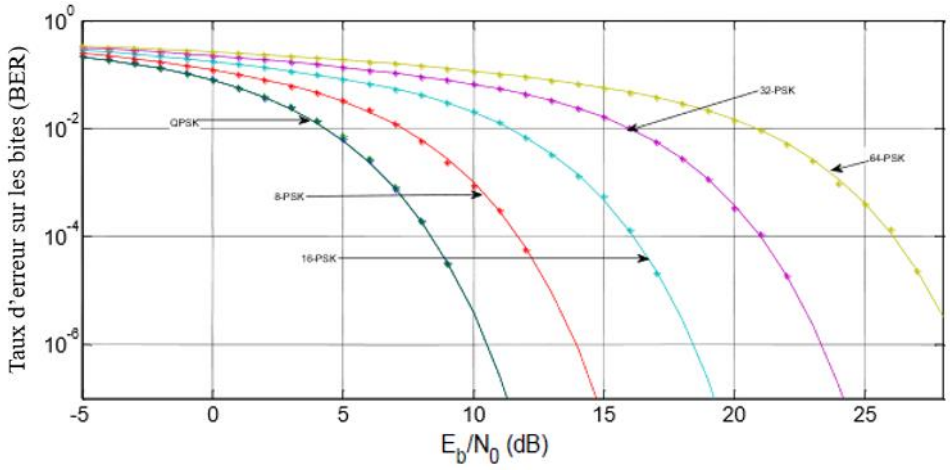


Figure 2.4 Taux d'erreur sur les bits de MPSK pour différentes valeurs de points de constellation M.

2.2.3. FSK

La modulation par déplacement de fréquence (FSK) est décrite par une expression analytique générale en (2-19) où ωi aura M valeurs discrètes. L'amplitude et le terme de phase restent constants tout au long du processus. En MDF, les formes d'onde générées pour chaque symbole diffèrent avec M fréquences différentes. Les fréquences de l'onde porteuse transmise changent d'une fréquence à l'autre au début des transitions des symboles [66].

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T} cos(\omega_i t + \varphi)} \qquad 0 \leq t \leq T; i = 1, \ldots, M \tag{2-19}$$

La modulation par déplacement de fréquence binaire (BFSK) est la forme la plus simple de FSK. La figure 3 montre l'onde porteuse modulée par déplacement de fréquence binaire avec deux fréquences discrètes qui changent lors de la transmission de symboles [67]. Le symbole binaire 0 est transmis à une fréquence discrète et le symbole binaire 1 est transmis à une autre fréquence discrète. À l'extrémité de réception du démodulateur BFSK, le récepteur reçoit l'onde porteuse déformée et démodule l'onde en fonction des valeurs de fréquence reçues et décide s'il s'agit d'un symbole binaire 0 ou 1. La MDFS (MFSK) est constituée d'un nombre M de symboles représentés par M fréquences. M symboles orthogonaux sont utilisés dans la construction du schéma de modulation MFSK orthogonale dans cette thèse

La MDF donne une efficacité maximale lorsque les signaux transmis sont orthogonaux. Les signaux orthogonaux sont des signaux dont le produit des points est nul ou qui ont une différence de phase de 90°. Les signaux orthogonaux n'interfèrent pas entre eux, c'est-à-dire que les signaux orthogonaux peuvent être identifiés séparément par l'émetteur [68]. Nous faisons en sorte que nos signaux soient orthogonaux en fixant la séparation de fréquence entre les signaux à une certaine valeur.

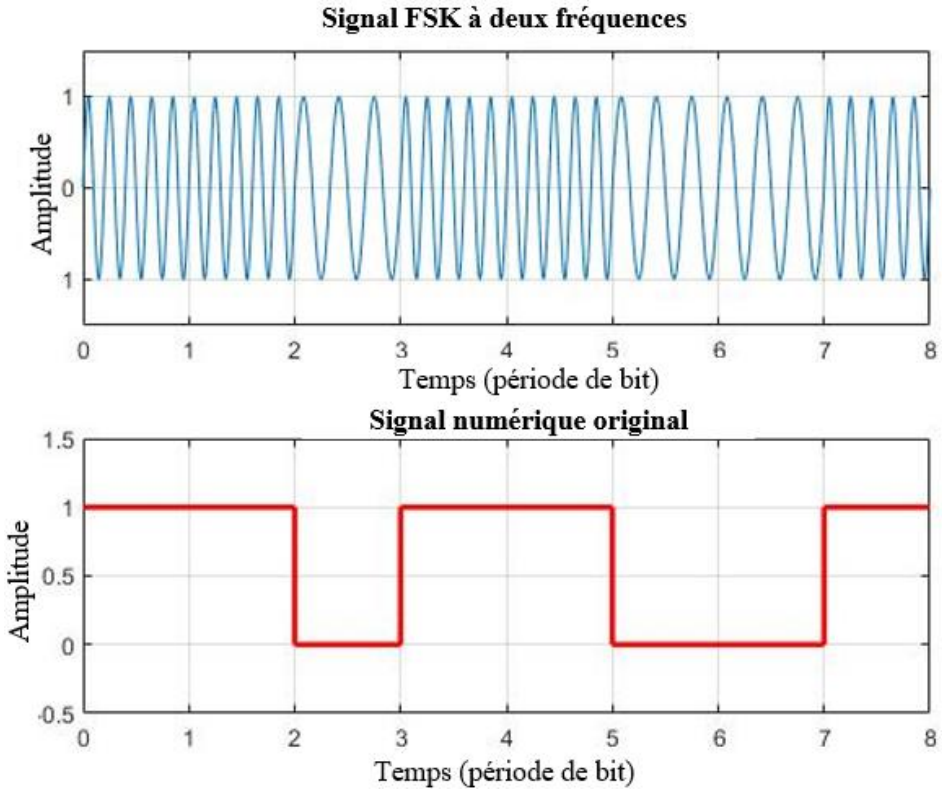


Figure 2.5 La modulation par déplacement de fréquence binaire

2.3. ONDELETTE DISCRÈTE COMME TECHNIQUE DE MODULATION

La théorie des ondelettes peut être considérée comme une extension de l'analyse de Fourier. L'idée de base des deux transformations est la même : représenter une fonction par un ensemble d'autres fonctions. Tout a commencé dans les années 1800 quand Joseph Fourier a découvert qu'il pouvait superposer les cosinus et sinus pour représenter d'autres fonctions. Depuis lors, l'analyse de Fourier a été largement utilisée par des scientifiques et des ingénieurs pour toutes sortes de problèmes et d'applications. Cependant, l'analyse de Fourier ne fonctionne pas aussi bien pour chaque problème. Les problèmes linéaires sont bien adaptés à l'analyse de Fourier, mais la représentation de signaux brefs, imprévisibles et les signaux non stationnaires sont beaucoup plus difficiles. Les ingénieurs ont cherché une solution et l'ont trouvée dans la transformation en ondelettes.

Les ondelettes sont un concept relativement nouveau qui a été introduit dans les années 1980, bien que des travaux de pionnier avaient été faits auparavant. Depuis les années 1980, les ondelettes ont suscité un intérêt considérable de la part des théoriciens et des ingénieurs où les ondelettes ont des applications prometteuses. En raison du grand intérêt, la théorie des ondelettes a été bien développé au cours des dernières années et plusieurs livres sur ce sujet ont été publiés comme un grand nombre d'articles de recherche. Barbara Burke Hubbard décrit la naissance, l'histoire, et les concepts fondamentaux de [69]. Le domaine des ondelettes croît très rapidement. De nombreux articles sur les ondelettes et les essais pratiques sont publiés chaque mois.

2.3.1. Transformée en ondelettes continues (CWT)

La CWT est définie comme la somme d'un signal multiplié par la version mise à l'échelle et décalée de la fonction de base des ondelettes. En utilisant différents facteurs d'échelle, l'ondelette est étirée ou compressé en conséquence, tandis qu'un paramètre de traduction provoque un retard ou une accélération de la l'apparition de l'ondelette. La valeur du paramètre de translation n'affecte que l'emplacement de l'ondelette et n'a aucune influence sur la durée des ondelettes ou la largeur de bande. Pour augmenter l'échelle, l'ondelette devient plus dilatée et tient compte du comportement à long terme et à basse fréquence de l'ondelette le signal d'entrée tandis que pour l'échelle décroissante l'ondelette devient plus comprimée et prend en compte le comportement du signal d'entrée en temps court et en haute fréquence. Par conséquent, l'échelle est inversement proportionnelle à la fréquence, c'est-à-dire que les échelles basses correspondent aux échelles hautes les fréquences et les échelles hautes correspondent aux basses fréquences.

La CWT code un signal temporel donné en utilisant des coefficients d'ondelettes qui sont en fonction de deux variables. Par la suite avec l'utilisation de la transformation en ondelettes, nous obtenons une collection de représentations bidimensionnelles à l'échelle temporelle, la CWT est définie comme

$$cwt(a,\tau) = \int_{+\infty}^{\infty} x(t)\psi *_{a,\tau} (t)dt \qquad (2\text{-}20)$$

Où une fonction d'entrée x(t) est décomposée en un ensemble de coefficients d'ondelettes $\mathrm{cwt}(a,\tau)$. Le conjugué complexe de l'ondelette est donné par ψ^*. Les paramètres a et τdésignent respectivement l'échelle et la translation, et ils représentent de nouvelles dimensions de la transformée en ondelettes. Les fonctions d'ondelettes utilisées dans (2-20) sont générées à l'aide d'une ondelette mère unique en modifiant le paramètre d'échelle et en translatant l'ondelette le long des axes temporels par la quantité τ :

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{t-\tau}{a}) \quad (2\text{-}21)$$

Comme la majorité des transformateurs, CWT est également réversible. Sous des hypothèses appropriées concernant x(t) et a, le signal original peut être reconstruit à partir des coefficients d'ondelettes en appliquant les formules de la transformée inverse en ondelettes :

$$x(t) = \frac{1}{c_\psi}\int_a \int_\tau \gamma(a,\tau)\frac{1}{a^2}\psi(\frac{t-\tau}{a})d\tau da \quad (2\text{-}22)$$

Avec

$$c_\psi == \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|}d\omega \quad (2\text{-}23)$$

Et $\hat{\psi}(\omega)$ indique la transformée de Fourier de ψ (ω).

2.3.2. Transformée en ondelettes discrètes DWT :

Pour des problèmes pratiques, la transformation en ondelettes, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, n'est pas toujours utile, car les coefficients d'ondelettes obtenus sont très redondants et doivent être calculés de manière analytique. Sous cette forme, le calcul de la transformée en ondelettes prendrait beaucoup de temps et de puissance de calcul, selon les signaux d'entrée. C'est pourquoi les ondelettes discrètes sont plus adaptées aux problèmes pratiques.

Comme le nom l'indique déjà, les ondelettes discrètes n'utilisent pas d'ondelettes continuellement extensibles et traduisibles, mais des ondelettes qui sont mises à l'échelle et traduites par étapes discrètes. L'équation de l'ondelette mère (2-21) peut être réécrite comme suit pour l'échelle et la translation discrètes.

$$\psi_{\alpha,\beta}(t) = \sqrt{a_0^\alpha}\psi(a_0^\alpha t - \beta\tau_0) \quad (2\text{-}24)$$

Où a_0 représente l'étape de dilatation fixe et $\tau_0$est le facteur de conversion. Les entiers α et β désignent respectivement les indices d'échelle et de translation. Le choix le plus naturel pour le pas de dilatation est 2, car il en résulte des bandes d'octave, aussi appelées échelles dyadiques. Dans ce cas, pour chaque valeur suivante de l'indice d'échelle, l'ondelette est comprimée dans le domaine fréquentiel par un facteur 2 et par conséquent étirée dans le domaine temporel par le même facteur. Le facteur de translation est généralement fixé à 1 afin d'obtenir un échantillonnage dyadique des axes temporels, également.

La sortie de la transformée en ondelettes lorsque des ondelettes discrètes sont utilisées serait une série de coefficients d'ondelettes :

$$\gamma(\alpha,\beta) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi *_{\alpha,\beta}(t)dt \quad (2\text{-}25)$$

Pour pouvoir reconstruire le signal original à partir des coefficients d'ondelettes, l'énergie des coefficients d'ondelettes doit être limitée par deux bornes positives (A > 0) et (B < ∞) [70].

Par conséquent,

$$A\|x\|^2 \leq \sum_\alpha \sum_\beta |\langle x, \psi_{\alpha,\beta}\rangle|^2 \leq B\|x\|^2 \quad (2\text{-}26)$$

Où $\|x\|^2$ représente l'énergie du signal d'entrée $x(t)$.

Les fonctions des ondelettes $\psi_{\alpha,\beta}$ avec $\alpha,\beta \in \mathbb{Z}$ doit former un cadre délimité par A et B. Si la borne A n'est pas égale à la borne B, l'ondelette de décomposition diffère de l'ondelette de reconstruction

et on parle d'un cadre double. On obtient une situation plus favorable pour le cadre dit serré où deux bornes sont égales l'une à l'autre. De plus, si A = B = 1, le cadre serré devient une base orthogonale.

La fonction de base d'une ondelette est dite orthogonale si les ondelettes générées par les dilatations et les translations sont orthogonales entre elles, c'est-à-dire

$$\int \psi_{\alpha,\beta}(t)\psi^*_{p,r}(t)dt = \begin{cases} 1 \text{ si } \alpha\text{=p et } \beta\text{=r} \\ 0 \qquad\quad \text{sinon} \end{cases} \tag{2-27}$$

2.3.3. Analyse multi-résolutions et bancs de filtres

2.3.3.1. Analyse multi-résolutions

La représentation complète d'un signal x(t) nécessite un nombre infini de fonctions d'ondelettes $\Psi_{\alpha,B}(t)$, car chaque ondelette suivante à une échelle accrue ne couvre qu'une partie du spectre restant. On peut y remédier en introduisant une fonction complémentaire passe-bas φ(t), appelée fonction de mise à l'échelle.

$$\phi_{\alpha,\beta}(t) = 2^{\alpha/2}\phi(2^{\alpha}t - \beta) \quad \beta \in \mathbb{Z} \quad \phi \in L^2 \tag{2-28}$$

Où L^2 implique que l'intégrale du carré du module est définie. L'AMR décrit la construction d'ondelettes orthonormales en utilisant une famille de sous-espaces qui doit satisfaire certaines propriétés. Les sous-espaces fermés couverts par les fonctions d'échelle sur les entiers $-\infty < \beta < \infty$ sont définis par :

$$V_{\partial} = \overline{\underset{\beta}{Span}\{\phi_{\beta}(2^{\alpha}t)\}} = \overline{\underset{\beta}{Span}\{\phi_{\alpha,\beta}(t)\}} \tag{2-29}$$

Les petites valeurs de α représentent les détails grossiers d'un signal, tandis que les valeurs plus grandes représentent les détails plus fins. L'AMR exige que les espaces couverts par les fonctions de mise à l'échelle Vα aient une énergie finie et qu'ils soient ordonnés par inclusion comme suit : 0…⊂ V-2 ⊂ V-1 ⊂ V0 ⊂ V1 ⊂ V2…L^2 [71], c'est-à-dire :

$$V_{\alpha} \subset V_{\alpha+1} \quad \text{pour tout} \quad \alpha \in \mathbb{Z}$$

$$\bigcap_{\alpha\in\mathbb{Z}} V_{\alpha} = \{0\}$$

$$\cup_{\alpha\in\mathbb{Z}} V_{\alpha} = L^2(\mathbb{R}) \tag{2-30}$$

Selon l'équation (2-30), l'espace qui contient le signal de haute résolution contiendra également des informations sur la résolution inférieure du signal ; par exemple, V_2 contient V_1 qui contient V_0.

La fonction de mise à l'échelle φ(t) qui couvre V_0 peut être définie comme une somme pondérée des φ(2t) décalés qui couvrent V_1 en utilisant l'équation de raffinement,

$$\phi(t) = \sum_n h(n)\sqrt{2}\phi(2t - n) \qquad n \in \mathbb{Z} \tag{2-31}$$

où h(n) désigne les coefficients de la fonction d'échelle. Cette équation montre que la fonction de mise à l'échelle peut être construite par la somme de ses translations à mi-longueur.

Les ondelettes dans l'ARM sont définies comme des bases orthogonales qui couvrent les différences entre les espaces couverts par les fonctions d'échelle à diverses échelles. Si le sous-espace couvert par l'ondelette est Wj-1, alors les espaces V1 et V2 peuvent être écrits comme :

$$V_1 = V_0 \oplus W_0$$
$$V_2 = V_1 \oplus W_1 = (V_0 \oplus W_0) \oplus W_1$$
$$\vdots$$
$$V_{\alpha+1} = V_\alpha \oplus W_\alpha = \overset{l=0}{\underset{\alpha}{\oplus}} W_l \quad \forall \alpha \in \mathbb{Z} \tag{2-32}$$

L'espace W0 couvert par une ondelette est en fait un sous-espace de V1 (W0 ⊂ V1), et donc, comme pour l'équation (2-31), les fonctions d'ondelettes peuvent être représentées par une somme pondérée de la fonction d'échelle décalée φ(2t).

$$\psi(t) = \sum_n g(n)\sqrt{2}\phi(2t-n) \quad \text{n} \in \mathbb{Z} \tag{2-33}$$

où g(n) désigne les coefficients de la fonction ondelettes. En raison de la condition d'orthogonalité $V0 \perp W0 \perp W1 \perp \cdots \perp W\alpha$ les coefficients d'échelle et d'ondelettes sont liés entre eux par $g(n) = (-1)^n h(L-1-n)$ pour h(n) de longueur L.

Les formules de reconstruction pour les DWT utilisant la résolution finie des ondelettes et la fonction de mise à l'échelle peuvent maintenant être exprimées comme

$$x(t) = \underbrace{\sum_{\beta=-\infty}^{\infty} \lambda(\alpha_0,\beta) 2^{\alpha_0/2} \phi(2^{\alpha_0}t-\beta)}_{V_{\alpha 0}} + \underbrace{\sum_{\alpha=\alpha_0}^{\infty}\sum_{\beta=-\infty}^{\infty} \gamma(\alpha,\beta) 2^{\alpha/2} \psi(2^{\alpha}t-\beta)}_{\subset W_\alpha} \tag{2-34}$$

Le paramètre α0 dans (2-34) définit l'échelle la plus grossière qui est couverte par la fonction de mise à l'échelle. Le reste est couvert par les ondelettes qui fournissent les détails du signal à plus haute résolution. Pour autant qu'un système d'ondelettes soit orthogonal, les coefficients DWT peuvent être définis comme (2-35), respectivement :

$$\lambda(\alpha,\beta) = \langle x(t), \phi_{\alpha,\beta}(t) \rangle = \int x(t) 2^{\alpha/2} \phi(2^{\alpha}t-\beta) dt$$
$$\gamma(\alpha,\beta) = \langle x(t), \psi_{\alpha,\beta}(t) \rangle = \int x(t) 2^{\alpha/2} \psi(2^{\alpha}t-\beta) dt \tag{2-35}$$

2.3.3.2. Bancs de filtres :

La transformée en ondelettes discrètes peut être efficacement représentée par des opérations de filtrage. Les poids h(n) donnés par les coefficients de la fonction de mise à l'échelle dans (2-31) peuvent être représentés par le filtre passe-bas H. De même, les poids de la fonction ondelette g(n) correspondent à filtre passe-haut G. Par conséquent, les équations (2-31) et (2-33) peuvent être considérées comme discrètes le filtrage temporel avec les filtres H et G, respectivement [71][72]. Dans la suite de cette thèse, nous fera référence au filtre H comme filtre d'échelle et au filtre G comme filtre d'ondelettes.

Le filtrage d'un signal peut être considéré comme la convolution du signal avec des coefficients de filtrage. Pour un filtre à réponse impulsionnelle finie (FIR) H de longueur L et un signal d'entrée $f(n)$, l'opération de filtrage est donnée par :

$$f(n) * h(n) = \sum_{k=0}^{L-1} f(k) h(n-k) \tag{2-36}$$

En raison de la condition d'orthogonalité, l'ondelette et le filtre d'échelle sont liés l'un à l'autre selon l'équation (2-29). Dans le domaine des fréquences, le spectre du filtre en ondelettes peut être vu comme l'image miroir à la fréquence de π/2 du spectre du filtre d'échelle. Le filtre d'échelle est en fait un filtre passe-bas (LPF) à demi-bande et le filtre d'ondelettes complémentaire est un filtre passe-haut (HPF) à demi-bande.

Le filtrage d'un signal avec un filtre passe-bande parfait supprime exactement la moitié de la fréquence du signal d'entrée, ce qui signifie que le nombre d'échantillons dans le signal filtré est

maintenant devenu redondant. Afin de supprimer la redondance, nous pouvons effectuer sous-échantillonnage. Pour le filtre passe-bande demi-bande, le signal filtré doit être sous-échantillonné par 2 afin de supprimer les informations redondantes. Si le signal est sous-échantillonné par un nous perdrons des informations et les composantes de fréquence seront mélangées. Le sous-échantillonnage par le facteur 2 peut être considéré comme le fait de prendre un échantillon sur deux du signal d'entrée et d'éliminer les autres échantillons, c'est-à-dire

$$y(n) = f(2n) \tag{2-37}$$

L'opération inverse du sous-échantillonnage est le suréchantillonnage. Le sur-échantillonnage augmente la longueur d'un signal en insérant des zéros entre chaque paire d'échantillons. Contrairement au sous-échantillonnage, le suréchantillonnage ne rejette pas l'information et peut donc toujours être inversé.

Le suréchantillonnage par un facteur 2, double le nombre d'échantillons dans un signal en insérant un zéro entre chaque paire d'échantillons. Ceci peut être mathématiquement illustré par :

$$y(m) = \begin{cases} x(\frac{m}{2}) & \text{pour } m = 2n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{2-38}$$

a. Banc de filtres d'analyse :

Les équations de raffinement données dans (2-31) et (2-33) peuvent être réécrites afin que les représentations à échelle inférieure des fonctions d'ondelettes et d'échelle puissent être exprimées dans celles à échelle supérieure comme [73],

$$\begin{aligned} \phi(2^{\alpha}t - \beta) &= \sum_{n} h(n)\sqrt{2}\phi(2(\,2^{\alpha}t - \beta) - n) \\ &= \sum_{n} h(n)\sqrt{2}\phi(\,2^{\alpha+1}t - 2\beta - n) \\ &= \textstyle\sum_{m=2\beta+n} h(m-2\beta)\sqrt{2}\phi(\,2^{\alpha+1}t - m) \end{aligned} \tag{2-39}$$

$$\begin{aligned} \psi(2^{\alpha}t - \beta) &= \sum_{n} g(n)\sqrt{2}\psi(2(\,2^{\alpha}t - \beta) - n) \\ &= \sum_{n} g(n)\sqrt{2}\psi(\,2^{\alpha+1}t - 2\beta - n) \\ &= \textstyle\sum_{m=2\beta+n} g(m-2\beta)\sqrt{2}\psi(\,2^{\alpha+1}t - m) \end{aligned} \tag{2-40}$$

En utilisant la dérivation ci-dessus pour la fonction d'ondelette et d'échelle, nous pouvons exprimer de façon similaire les coefficients de DWT à l'échelle α par les coefficients à l'échelle supérieure $\alpha + 1$ comme suit :

$$\begin{aligned} \lambda(\alpha,\beta) &= \langle x(t), \phi_{\alpha,\beta}(t)\rangle \\ &= \int x(t)2^{\alpha/2}\phi(2^{\alpha}t - \beta)dt \\ &= \sum_{m} h(m-2\beta)\, x(t)2^{\alpha+1/2}\phi(2^{\alpha+1}t - m)dt \\ &= \textstyle\sum_{m} h(m-2\beta)\,\lambda(\alpha+1,m) \end{aligned} \tag{2-41}$$

$$\begin{aligned} \gamma(\alpha,\beta) &= \langle x(t), \psi_{\alpha,\beta}(t)\rangle \\ &= \int x(t)2^{\alpha/2}\psi(2^{\alpha}t - \beta)dt \end{aligned}$$

$$= \sum_{m} g(m-2\beta)\, x(t) 2^{\alpha+1/2} \psi(2^{\alpha+1}t - m)dt$$
$$= \sum_{m} g(m-2\beta)\, \gamma(\alpha+1, m) \quad (2\text{-}42)$$

Les équations (2-41) et (2-42) impliquent que les coefficients des ondelettes et de la mise à l'échelle des DWT à une certaine échelle peuvent être calculés en prenant une somme pondérée des coefficients des DWT à des échelles plus élevées. Cela peut être considéré comme une convolution entre les coefficients de DWT à l'échelle α + 1 avec des coefficients de filtre d'ondelettes et de mise à l'échelle et ensuite un sous-échantillonnage de chaque sortie avec le facteur 2 pour obtenir de nouveaux coefficients de DWT d'ondelettes et de mise à l'échelle à l'échelle α. Par conséquent, nous pouvons décrire (2-41) et (2-42) par une banque de filtres à 2 canaux illustrée à la figure.

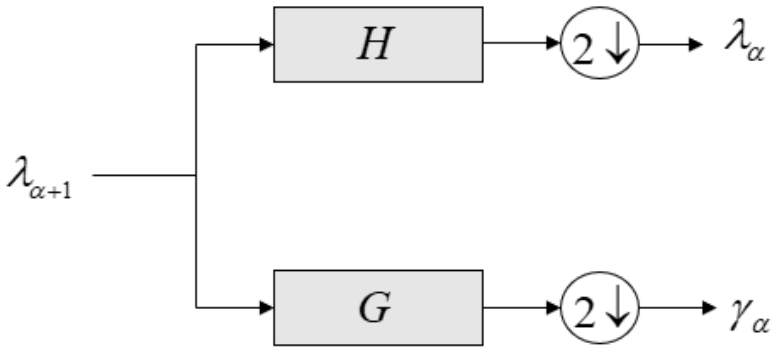


Figure 2.6 Banc de filtres d'analyse à 2 canaux.

Le banc de filtres à 2 canaux divise d'abord le signal d'entrée en deux parties et filtre une partie avec le filtre H et l'autre avec le filtre G. Les deux signaux filtrés sont ensuite sous-échantillonnés par 2 et les signaux résultants sont transmis à la sortie de la banque de filtres à 2 canaux. Chaque signal de sortie contiendra donc la moitié du nombre d'échantillons et couvrira la moitié de la bande de fréquences par rapport au signal d'entrée. Il est à noter que le nombre d'échantillons à l'entrée de la banque de filtres est égal au nombre d'échantillons à la sortie. La représentation complète du DWT peut être obtenue par itération de la banque de filtres à 2 canaux et en prenant comme entrée des coefficients de DWT à échelle répétée λ. Le processus d'itération commence avec λ à la plus grande échelle qui est égale au signal original. Le nombre d'étapes du processus d'itération déterminera la résolution du filtre et donc le nombre de canaux.

b. Banc de filtres de synthèse :

La formule de reconstruction pour la DWT est donnée dans l'équation (2-34). Si nous substituons maintenant les équations de raffinement pour les fonctions d'ondelettes et d'échelle, (2-33) et (2-31), respectivement, dans l'équation de reconstruction (2-34), nous obtenons :

$$x(t) = \sum_{\beta} \lambda(\alpha, \beta) \sum_{n} h(n) 2^{(\alpha+1)/2} \phi(2^{\alpha+1}t - 2\beta - n)$$
$$+ \sum_{\beta} \gamma(\alpha, \beta) \sum_{n} g(n) 2^{(\alpha+1)/2} \phi(2^{\alpha+1}t - 2\beta - n) \quad (2\text{-}43)$$

En multipliant les deux côtés de l'équation (2-43) par $\phi(2^{\alpha+1}t - \beta')$ et en prenant l'intégrale, nous pouvons décrire les coefficients de la DWT aux échelles supérieures par ceux de l'échelle inférieure comme suit [72]

$$\lambda(\alpha+1, \beta) = \sum_{m} \lambda(\alpha, m) h(\beta - 2m) + \sum_{m} \gamma(\alpha, m) g(\beta - 2m) \quad (2\text{-}44)$$

Ce qui implique que les coefficients de la DWT à un certain niveau d'échelle $\alpha + 1$ peuvent être reconstruits en prenant une combinaison d'ondelettes pondérées et en mettant à l'échelle les coefficients de la DWT à l'échelle précédente α. Ce processus peut être décrit par la banque de filtres de synthèse à 2 canaux, illustrée à la figure.

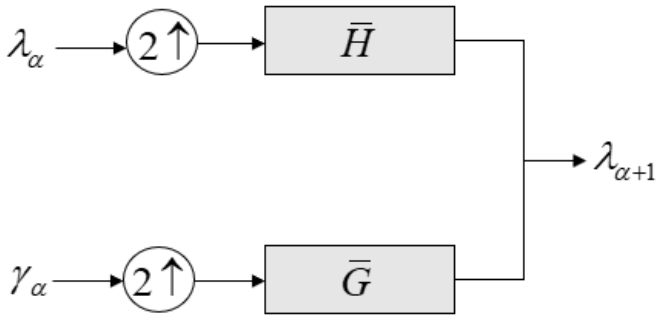


Figure 2.7. Banc de filtres de synthèse à 2 canaux

Le banc de filtres de synthèse à 2 canaux effectue un fonctionnement exactement opposé à celui de la banque de filtres d'analyse dont nous avons parlé précédemment. Les coefficients des ondelettes et de la fonction de mise à l'échelle sont d'abord suréchantillonnés par le facteur 2 et ensuite les coefficients de la fonction d'ondelettes sont filtrés avec le HPF $\bar{G}$ tandis que les coefficients de la fonction de mise à l'échelle sont filtrés avec le LPF $\bar{H}$. Les deux signaux filtrés sont ensuite ajoutés l'un à l'autre pour construire des coefficients de la DWT à une échelle plus élevée. Les filtres $\bar{H}$ et $\bar{G}$ sont conformes à l'équation (2-44) et aux équations (2-41) et (2-42) version inversée dans le temps des filtres H et G, respectivement.

La décomposition d'un signal en termes de coefficients est appelée transformée en ondelettes discrètes. Afin de reconstruire le signal original à partir des coefficients, nous pouvons appliquer une transformée en ondelettes inverse, abrégée en Transformée en ondelettes discrètes inverse (IDWT). L'IDWT peut être mise en œuvre efficacement en itérant la banque de filtres de synthèse à 2 canaux de la même manière que nous l'avons fait dans le paragraphe précédent pour la banque de filtres d'analyse à 2 canaux.

2.4. Familles des ondelettes :

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, à partir de l'équation (2-21) de l'ondelette mère, un certain nombre de sous-ensembles de membres de cette ondelette mère peuvent être calculés à l'aide de l'équation (2-24). Il existe un certain nombre de fonctions d'ondelettes mères représentant chacune une famille d'ondelettes et chacune de ces familles a des membres imbriqués qui sont souvent appelés "ondelettes enfants". Lorsque ϕ est supporté de manière compacte, la séquence w_n est finie et pourrait agir comme un filtre, alors W peut être considéré comme un filtre d'échelle, et c'est un filtre FIR avec une longueur de 2N et ce filtre a une somme de coefficients de 1 d'un filtre passe-bas avec la norme de $1/\sqrt{2}$. Comme il existe de nombreuses ondelettes et que des familles d'ondelettes complexes sont déjà mises en œuvre en mathématiques, celles qui sont pertinentes pour cette recherche seront examinées.

Les familles de vaguelettes pertinentes dans cette recherche sont : Haar (Daubechies 1), Daubechies, Symlets, Coiflets, Biorthogonal, Biorthogonal inversé et Meyer discret. Toutefois, dans cette section, les fonctions mathématiques de l'ondelette mère de ces familles et la localisation de leurs membres associés seront abordées. Un résumé de toutes les propriétés de ces familles qui sont compatibles pour

l'utilisation comme schéma de modulation est présenté dans le tableau 2.3, nous ferons également référence à ce tableau dans les chapitres suivants.

Tableau 2.3 Propriétés des familles d'ondelettes soutenues de manière compacte [74] [75]

Propriété	HAAR	dbn	symn	coifn	biorNr.Nd	rbiorNr.Nd	dmey
Régularité arbitraire		x	x	x	x	x	
Support orthogonal compact	x	x	x	x			x
Biothogonal soutenu de manière compacte					x	x	x
Symétrie	x				x	x	x
Asymétrie		x					
Proche de la symétrie			x	x			
Nombre arbitraire de moments de disparition		x	x	x	x	x	
Moments de disparition pour φ				x			
Existence de φ	x	x	x	x	x	x	
Analyse orthogonale	x	x	x	x	x	x	
Analyse biorthogonale	x	x	x	x	x	x	
Reconstruction exacte	x	x	x	x	x	x	x
Filtres FIR	x	x	x	x	x	x	x
Transformation continue	x	x	x	x	x	x	
Transformation discrète	x	x	x	x	x	x	x
Algorithme rapide	x	x	x	x	x	x	x
Expression explicite	x						
Approximation basée sur le FIR							x

2.4.1. Ondelette de HAAR :

Cette famille d'ondelettes a été nommée d'après Alfred Haar [76], qui a inventé le DWT. L'ondelette de Haar est un cas spécial d'ondelette de Daubechies qui est (db1) et fonctionne essentiellement en prenant toutes les données d'entrée représentées par 2^n nombres et en appariant ces valeurs, puis en

stockant la différence et en passant la somme. Le processus est ensuite répété de manière récursive en appariant les sommations pour fournir l'échelle suivante, ce qui conduit à avoir des différences 2^{n-1}et finalement une sommation. L'ondelette de Haar est connue comme la famille d'ondelettes la plus simple possible [77] pour son avantage technique d'être discrète et donc non différentiable. La fonction de l'ondelette mère de Haar $\psi(t)$ peut s'écrire [76] :

La fonction de mise à l'échelle $\phi(t)$ de ce membre de l'ondelette peut être écrite comme [76] :

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1 & \text{si } \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2\text{-}45)$$

La fonction de mise à l'échelle $\phi(t)$ de ce membre de l'ondelette peut s'écrire [79] :

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2\text{-}46)$$

Pour chaque paire n, kd'entiers dans le $\mathbb{Z}$, la fonction mère de Haar $\psi_{n,k}(t)$ peut être définie dans le R réel par [76] :

$$\phi_{n,k}(t) = 2^{\frac{n}{2}}\psi(2^n t - k) \quad t \in \mathbb{R} \quad (2\text{-}47)$$

Cette opération est prise en charge de manière compacte dans l'intervalle ouvert droit de$I_{n,k} = [k2^{-n}, (k+1)2^{-n}]$, cependant, elle disparaît en dehors de cet intervalle. L'ondelette de Haar est une ondelette orthogonale et symétrique à support compact. Pour plus de détails sur les ondelettes de Haar et les dérivations mathématiques des ondelettes de Haar, veuillez-vous référer à [76] [77] et [78]. La complexité de calcul de la Haar est que les trois catégories de complexité devraient être inférieures à la FFT dans tous les cas, y compris la complexité de calcul.

2.4.2. Ondelette de Daubechies :

Les ondelettes de Daucechies ont été nommées d'après Ingrid Daubechies [79] qui a formulé une série (famille) de fonctions mathématiques pour l'analyse des TNT dans le domaine temps-fréquence. Cette famille d'ondelettes et les familles suivantes qui ont été construites sur cette base sont orthogonales, discrètes et supportées de manière compacte. Le schéma de dénomination de cette famille est le suivant : (dbn) où n est le nombre de moments de disparition, parfois il est noté Dx où x est le nombre de prises. La famille des ondelettes de Daubechies est la plus utilisée des DWT qui utilise des relations de récurrence afin de produire des échantillons discrets plus fins d'une fonction d'ondelette mère implicite et donc une échelle de résolutions en cascade dont chaque résolution est le double de celle de l'échelle précédente [79]. Comme indiqué dans la section précédente, l'ondelette de Haar est un cas particulier de Daubechies qui est identique à (db1). La Daubechies est l'ondelette de base de la famille Symlet et fait partie du Biorthogonal et du Biorthogonal inversé. En ce qui concerne cette famille, il s'agit de dérivations purement mathématiques, néanmoins, ce qui chevauche le contexte de cette recherche sera choisi [79] [80].

La construction de cette famille peut être réalisée par LPF (scaling filter) pour la séquence de mise à l'échelle et HPF pour la séquence d'ondelettes sera normalisée pour acquérir une somme égale à 2 et une somme de carrés égale à 2. Elle peut également être normalisée à $\sqrt{2}$, selon l'application, auquel cas les séquences et tous leurs décalages sont orthonormaux, étant donné que les décalages sont en nombre pair. La formule générale de la séquence de mise à l'échelle pour les DWT orthogonaux avec une séquence d'approximation de A est exprimée par [69] :

$$a(Z) = 2^{1-A}(1+Z)^A p(Z) \tag{2-48}$$

Lorsque $N = 2A, p(1) = 1$et le degré$(p) = A - 1$, alors l'orthogonalité peut être exprimée comme [79] :

$$a(Z)a(Z^{-1}) + a(-Z)a(-Z^{-1}) = 4 \tag{2-49}$$

Ou peut également être exprimée comme

$$(2-X)^A P(X) + X^A P(2-X) = 2^A \tag{2-50}$$

avec le polynôme de Laurent $X := \frac{1}{2}(2 - Z - Z^{-1})$ génère toutes les séquences symétriques et :

$$X(-Z) = 2 - X(Z) \tag{2-51}$$

où $P(X)$ est pour le polynôme symétrique de Laurent :

$$P(X(Z)) = P(Z)P(Z^{-1}) \tag{2-52}$$

où $X(e^{i\omega}) = 1 - cos(\omega)$ et $P(e^{j\omega})P(e^{-j\omega}) = \left|P(e^{jw})\right|^2$, P prend toujours la valeur ≥ 0 dans le segment [0, 2]. L'équation d'orthogonalité n'a qu'une solution minimale pour chaque A :

$$P_A(X) = \sum_{k=0}^{A-1} \binom{A+k-1}{A-1} 2^{-2} X^k \tag{2-53}$$

Il s'agit essentiellement de diviser l'équation d'orthogonalité x pour chaque A dans l'anneau des séries de puissance tronquées en X.

Cependant, l'équation d'orthogonalité (2-45) est antisymétrique $\approx X = 1$ et a donc cette solution générale $X^A(X-1)R((X-1)^2)$ avec R étant un polynôme à coefficients réels, la somme est : $P(X) = P_A(X) + X^A(X-1)R((X-1)^2)$ sera ≥ 0 dans l'intervalle [0, 2], le P dans l'intervalle [0, 2] est borné par4^{A-r}. Dans la famille Daubechies, la paire de filtres utilisée doit être des miroirs en quadrature, et le calcul de $c_i$du nombre de coefficients pour ces filtres de miroirs en quadrature, pour un filtre de miroir en quadrature d'ordre 4 :

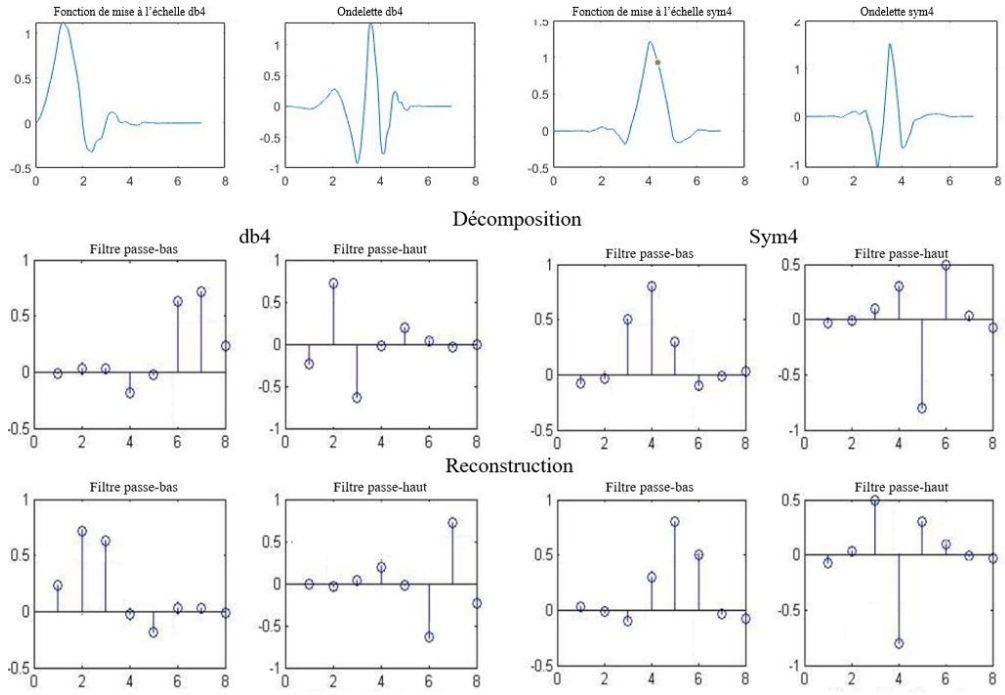


Figure 2.8 Réponse impulsionnelle des filtres db4 et sym4.

$$c_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} = c_1 = c_2 = c_3$$

$$h(z) = h_{-2}z^2 + h_{-1}z + h_0 + h_1 z^{-1} \quad \tilde{h}(z) = h_1 z + h_0 + h_{-1}z^{-1} + h_{-2}z^{-2}$$

$$g(z) = -h_1 z^2 + h_0 z - h_0 + h_{-2}z^{-1} \quad \tilde{g}(z) = h_{-2}z - h_{-1} + h_0 z^{-1} - h_1 z^{-2} \qquad (2\text{-}54)$$

Dans ce cas, c_0 sera remplacé par h_{-2}, c_1 par h_{-1}, c_2 par h_0 et c_3 par h_1. La figure 2.8 illustre les emplacements de ces filtres d'échelle et d'ondelettes, ce qui montre la relation entre les calculs de décomposition et de reconstruction.

2.4.3. Ondelette de Symlet :

La famille des Symlets est une version plus récente de la famille des Daubechies mais avec une symétrie améliorée et c'est pourquoi elle est souvent appelée "daubechies symétriques". C'est pourquoi elle suit le même schéma de dénomination que les Daubechies, (Symn) où n est le nombre de moments de disparition, ou parfois S_x où x est le nombre de coups. Pour illustrer cette différence de symétrie, les réponses impulsionnelles des filtres db4 et sym4 sont présentées dans la figure 2.8. Il ressort de la figure 2.9 que la symétrie s'est effectivement améliorée. Comme la famille Symlets est une version améliorée des Daubechies et qu'ils ont donc la même ondelette mère, les différences détaillées ne sont visibles que dans les fonctions mathématiques détaillées, ce qui ne sera donc pas abordé ici en détail sur le plan mathématique, mais peut être trouvé dans [79][80]. Les coefficients de l'ondelette de Symlets sont indiqués dans le tableau x. Pour illustrer le calcul et la reconstruction à l'aide des coefficients de ces filtres, nous décomposons un niveau de filtres et le reconstruisons à nouveau en utilisant l'illustration d'un niveau dans la figure 2.9, h est le LPF et g est le HPF dans le filtre d'analyse, et $\tilde{h}$ est le LPF et $\tilde{g}$ est le HPF dans la banque de filtres de reconstruction. Étant donné que tous ces filtres d'ondelettes satisfont à la condition de reconstruction parfaite : $h(z)\tilde{h}(z) + g(z)\tilde{g}(z) = 2$, $h(z)\tilde{h}(-z) + g(z)\tilde{g}(-z) = 0$. Les filtres d'échelle s'échelonnent selon certains facteurs α et β et se déplacent selon un nombre entier pair de $2j$ et $2k$ $h'(z) = \alpha z^{2j} h(z), g'(z) = \beta z^{2k} g(z) and\ \tilde{h}'(z) = a^{-1}z^{-2j}\,\tilde{h}(z), \tilde{g}'(z) = \beta^{-1}{}_{z^{-2k}}\,\tilde{g}(z)$ cela préserve l'état de parfaite reconstruction. Il est également possible de produire une ondelette valide en échangeant les filtres h et g avec $\tilde{h}$ et $\tilde{g}$.

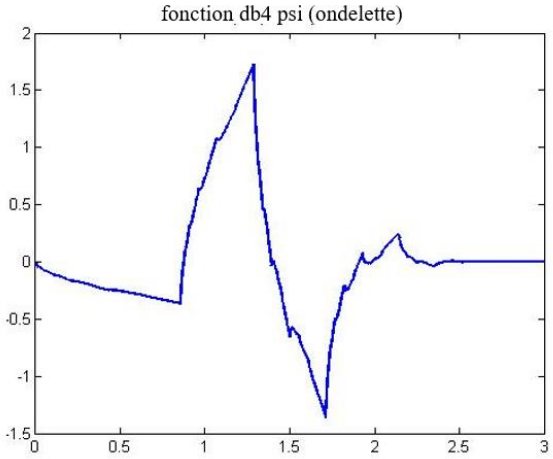


Figure 2.9 Fonction d'ondelettes de Daubechies

Pour toute transformée en ondelettes FIR supportée de manière compacte, elle peut être exprimée avec un schéma de levage [80]. Le schéma d'élévation est décrit par une série de filtres de prédiction et de mise à jour, comme le montre la figure 2.11, où a_1, a_2, …a_m désigne les filtres de prédiction et b_1, b_2, …b_m désigne les filtres de mise à jour. En suivant les étapes de filtrage, x_e est multiplié par P_s et x_0 est multiplié par P_d. Pour la transformation inverse, les facteurs d'échelle P_s et P_d sont inversés et les additions sont remplacées par des soustractions avec inversion des étapes de filtrage.

La famille des Daubechies est considérée comme la meilleure pour le calcul des ondelettes et a donc servi de base non seulement aux Coiflets et aux Symlets, mais aussi à une partie des familles d'ondelettes du Biorthogonal et du Biorthogonal inversé. Les différences entre ces familles et les Daubechies originales sont principalement la symétrie des robinets de filtre, l'emplacement des moments de disparition pour les fonctions d'échelle et d'ondelettes, le nombre de coefficients et leurs valeurs. [80] [78].

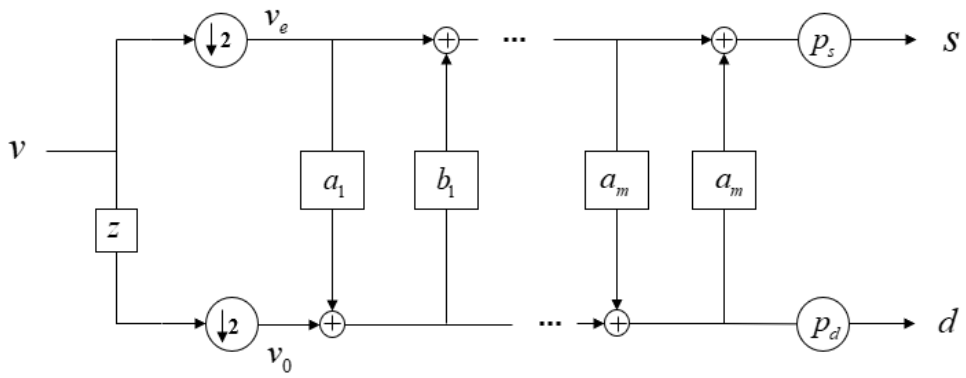


Figure 2.10 schéma de levage des filtres de prédiction et de mise à jour

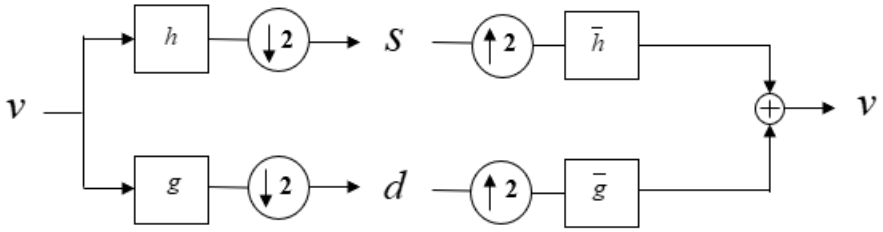


Figure 2.11 Décomposition et reconstruction à un niveau

2.5. Transformée par paquets d'ondelettes discrète

Comme mentionné précédemment, le WPM repose sur l'utilisation de la paire IDWPT et DWPT pour obtenir l'orthogonalité des sous-porteuses [81]. Les transformations individuelles sont décrites en premier lieu dans cette section afin de jeter les bases d'une discussion ultérieure sur le WPM. Tout comme l'OFDM, qui effectue la transformée de Fourier discrète inverse (IDFT) à l'émetteur et la transformée de Fourier discrète (DFT) au récepteur [3], le WPM effectue l'IDWPT à l'émetteur et le DWPT au récepteur [81][82]. Ainsi, ici, l'IDWPT est examinée en premier lieu pour comprendre comment l'émetteur radio multiplexera le flux de données d'entrée. Ensuite, le DWPT est examiné pour comprendre comment le récepteur radio va démultiplexer le flux de données.

2.5.1. IDWPT :

L'IDWPT peut être considéré sous deux angles différents [83],[84]. Premièrement, la transformée peut être considérée comme une structure arborescente binaire complète composée d'échantillonneurs avec un facteur de suréchantillonnage de deux, de filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR) et d'additionneurs, comme le montre la figure 1 [84]. Les opérations de suréchantillonnage illustrées dans la figure 2.12 consistent simplement à insérer un échantillon zéro après chaque échantillon d'entrée ; le nombre d'échantillons de sortie est donc deux fois supérieur au nombre d'échantillons d'entrée [85]. L'autre perspective consiste à considérer la transformation comme un ensemble unique de suréchantillonneurs avec un facteur de suréchantillonnage égal au nombre de sous-porteuses

orthogonales et de filtres FIR souhaités, suivi d'un seul additionneur, comme le montre la figure 2.13 [83], [84].

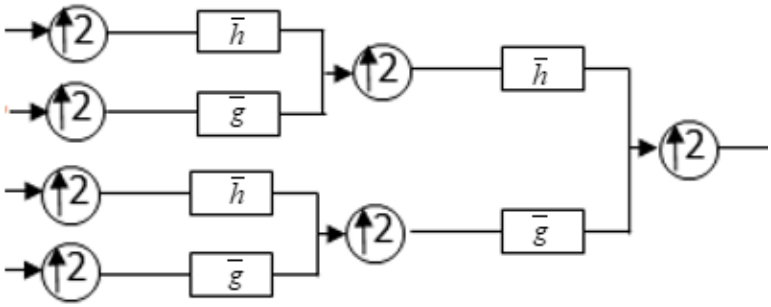


Figure 2.12 Perspective de l'arborescence binaire complète de l'IDWPT pour le multiplexage orthogonal de quatre sous-porteuses [83][84].

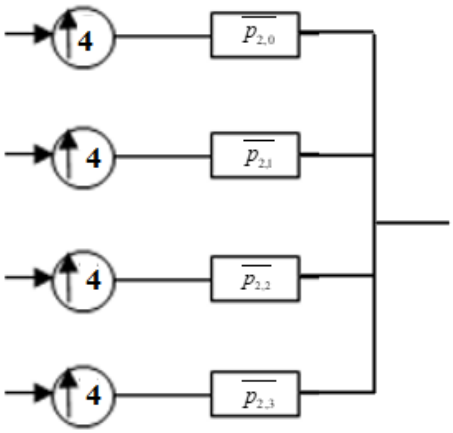


Figure 2.13 Perspective alternative de l'IDWPT pour le multiplexage orthogonal de quatre sous-porteuses [83][84].

Les deux perspectives illustrées aux figures 2.12 et 2.13 sont des approches totalement équivalentes pour l'exécution de l'algorithme IDWPT ; la principale différence réside dans les prises du filtre FIR. La première approche est désignée ici comme la mise en œuvre en cascade du filtre, et la seconde approche est désignée comme la mise en œuvre équivalente du filtre. Pour la mise en œuvre du filtre en cascade, toutes les prises du filtre sont soit les coefficients filtre passe-bas de synthèse (LPF)$\overline{h}$, soit des filtre passe-haut (HPF) $\overline{g}$ de l'ondelette choisie [84]. Ces coefficients sont calculés à partir de l'analyse des coefficients LPFh, souvent appelés fonction de mise à l'échelle, de l'ondelette choisie en utilisant :

$$\overline{h}[n] = h * [2N - 1 - n] \text{ et } \overline{g}[n] = (-1)^{n+1} h * [n] \tag{2-55}$$

où 2N représente la longueur du vecteur de coefficient, n représente l'indice du vecteur allant de zéro à 2N-1, et l'astérisque au-dessus de toute variable représente l'opérateur conjugué complexe [86]. Par exemple, une ondelette de Haar avec $h = [1,1]$ a $\overline{h} = [1,1]$ et $\overline{g} = [-1,1]$.

Pour la mise en œuvre du filtre équivalent, chacun des filtres FIR a des prises différentes qui représentent le paquet d'ondelettes inverse pour la sous-porteuse associée. Les paquets d'ondelettes inverses $p'_{m,i}$sont calculés en utilisant :

$$\overline{p}_{1,0} = \overline{h} \quad \text{et } \overline{p}_{1,1} = \overline{g} \tag{2-56}$$

Et

$$\overline{p}_{m,i}[n] = \sum_{k=0}^{2N-1} \overline{f[k]} \overline{p}_{m-1,i\%(2^{m-1})} \left[\frac{n-k}{2}\right] \text{ pour } m \geq 2 \tag{2-57}$$

Où

$$\overline{f[k]} = \begin{cases} \overline{h}[k] & \text{pour } i < 2^{m-1} \\ \overline{g}[k] & \text{pour } i \geq 2^{m-1} \end{cases} \quad (2\text{-}58)$$

Et

$$\overline{p}_{m-1,i\%(2^{m-1})}[x] = 0 \quad \text{quand } x \notin \mathbb{Z} \text{ ou } x \notin [0, L_{m-1} - 1] \quad (2\text{-}59)$$

Pour (2-57), (2-58) et (2-59), m représente l'étape actuelle ainsi que le nombre équivalent d'étapes que ce filtre inverse de paquets d'ondelettes remplace à partir de l'implémentation des filtres en cascade, i représente l'indice du filtre inverse de paquets d'ondelettes dans la banque de filtres qui va de zéro à2^{m-1}, n représente l'indice de prise de , $\overline{p}_{m,i}$qui va de zéro à$2(L_{m-1} + N - 1) - 1$, k représente l'indice de sommation qui va de zéro à$2N - 1$, $2N$ est la longueur de la fonction de mise à l'échelle$h$, $\mathbb{Z}$est l'ensemble de tous les entiers, L_{m-1}représente la longueur du filtre de paquets d'ondelettes inverse $\overline{p}_{m-1,i}$ de l'étape précédente, et % est l'opérateur modulo.

L'équation (2-57), (2-58) et (2-59) sont basées sur les équations trouvées dans [81], [84]-[87] ; cependant. À partir de la plage de n donnée précédemment, on peut prévoir que la longueur de $\overline{p}_{m,i}$ est $L_m = 2(L_{m-1} + N - 1)$, mais en se basant sur le fait que$L_1 = 2N$, on peut également montrer que $L_m = (2^m - 1)(2N - 1) + 1$ [87]. On note bien que puisque le calcul des paquets d'ondelettes inverses de chaque étape repose sur les paquets d'ondelettes inverses des étapes précédentes, lors du calcul des paquets d'ondelettes inverses des étapes supérieures, (2-57), (2-58) et (2-59) doit être utilisé de manière récursive pour calculer tous les paquets d'ondelettes inverses des étapes précédentes avant d'arriver au résultat final souhaité.

2.5.2. DWPT :

Le DWPT peut également être considéré sous les deux mêmes angles que l'IDWPT qui sont présentés dans les figures 2.14 et 2.15 [83][84]. Les opérations de sous-échantillonnage illustrées dans la figure 2.14 consistent simplement à retirer un échantillon d'entrée sur deux en commençant par le tout premier échantillon ; par conséquent, les premier, troisième, cinquième, etc. échantillons d'entrée sont retirés du flux de données [85]. Le facteur de sous-échantillonnage des sous-échantillonneurs indiqué à la figure 2.15 est égal au nombre souhaité de sous-porteuses orthogonales [83], [84].

Pour la mise en œuvre du filtre en cascade du DWPT, toutes les prises de filtre sont soit les coefficients LPF $h$ou HPF $g$de l'analyse pour l'ondelette choisie. Les coefficients HPF sont calculés à partir des coefficients LPF h de l'ondelette choisie en utilisant :

$$g[n] = (-1)^n h * [2N - 1 - n] \quad (2\text{-}60)$$

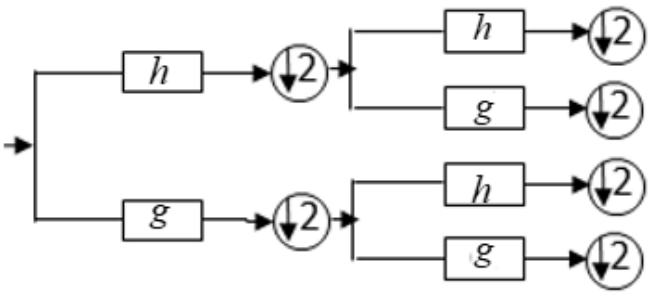


Figure 2.14 Perspective de l'arborescence binaire complète du DWPT pour démultiplexer orthogonalement quatre sous-porteuses [83][84].

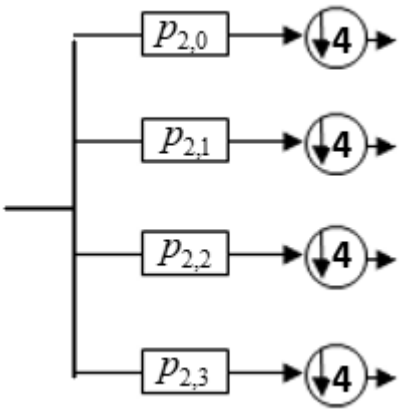


Figure 2.15 Perspective alternative du DWPT pour démultiplexer orthogonalement quatre sous-porteuses [83][84].

où 2N représente la longueur du vecteur de coefficient, et n représente l'indice du vecteur allant de zéro à 2N-1 [86]. Par exemple, une ondelette de Haar avec $h = [1,1]$ et $g = [1,-1]$.

Pour la mise en œuvre du filtre équivalent du DWPT, chacun des filtres FIR a des prises différentes qui représentent le paquet d'ondelettes pour la sous-porteuse associée. Les paquets d'ondelettes, $p_{m,i}$sont calculés en utilisant :

$$p_{1,0} = h \quad \text{et} \quad p_{1,1} = g \tag{2-61}$$

Et

$$p_{m,i}[n] = \sum_{k=0}^{2N-1} f[k] p_{m-1,i\%(2^{m-1})}\left[\frac{n-k}{2}\right] \quad \text{pour } m \geq 2 \tag{2-62}$$

Et

$$f[k] = \begin{cases} h[k] & \text{pour } i < 2^{m-1} \\ g[k] & \text{pour } i \geq 2^{m-1} \end{cases} \tag{2-63}$$

Et

$$p_{m-1,i\%(2^{m-1})}[x] = 0 \quad \text{quand } x \notin \mathbb{Z} \text{ ou } x \notin [0, L_{m-1} - 1] \tag{2-64}$$

Encore comme pour la IDWPT, pour (2-62), (2-63) et (2-64), m représente l'étape actuelle ainsi que le nombre équivalent d'étapes que ce filtre inverse de paquets d'ondelettes remplace à partir de l'implémentation des filtres en cascade, i représente l'indice du filtre inverse de paquets d'ondelettes dans la banque de filtres qui va de zéro à2^{m-1}, n représente l'indice de prise de , $p_{m,i}$qui va de zéro à$2(L_{m-1} + N - 1) - 1$, k représente l'indice de sommation qui va de zéro à$2N - 1$, $2N$ est la longueur de la fonction de mise à l'échelle$h$, $\mathbb{Z}$est l'ensemble de tous les entiers, L_{m-1}représente la longueur du filtre de paquets d'ondelettes inverse $P_{m-1,i}$ de l'étape précédente, et % est l'opérateur modulo.

L'équation (2-62), (2-63) et (2-64) est basée sur les équations trouvées dans [81], [84]-[87]; cependant à partir de la plage de n donnée précédemment, on peut prévoir que la longueur de $p_{m,i}$ est $L_m = 2(L_{m-1} + N - 1)$, mais en se basant sur le fait que$L_1 = 2N$, on peut également montrer que $L_m = (2^m - 1)(2N - 1) + 1$ [87].

2.6. Codes correcteurs d'erreurs et améliorations de la communication

Le schéma fonctionnel général du système de communication numérique, illustré à la *figure 2.16*, comprend trois éléments principaux : l'émetteur, le canal et le récepteur.

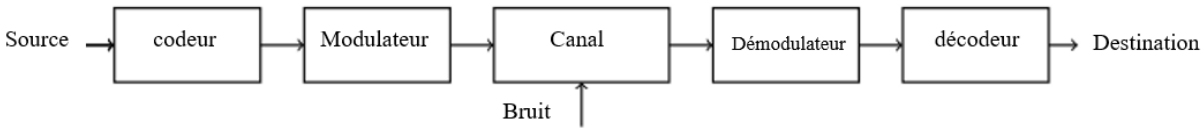


Figure 2.16 Schéma de principe d'un système de communication numérique.

Le signal d'entrée de la source peut être de la voix, de la musique ou des données. Le codeur de la source effectue les processus d'échantillonnage, de quantification et de conversion analogique/numérique (A/N). Au cours de ce processus, le signal analogique est échantillonné : il convertit le signal en un signal discret dans le temps et continu en amplitude. Le signal échantillonné est ensuite quantifié à des niveaux de quantification fixes. Ensuite, ces niveaux sont convertis en mots de code numériques. Le codage de la source limite la largeur de bande occupée. Des techniques telles que le filtrage, les signaux de non-retour à zéro (NRZ) sont utilisées pour limiter l'occupation de la largeur de bande. Dans cette thèse, le bit d'entrée est directement pris comme une donnée numérique ; le codage de la source n'est donc pas abordé.

Le codeur de canal améliore la fiabilité et l'efficacité de la transmission du signal numérique, et est responsable de la détection et de la correction des erreurs. Il ajoute une redondance contrôlée au code source pour produire un nouveau flux de bits de données plus long que le mot de code source. Le bit redondant ajouté par le codeur de canal ne transporte aucune information, mais aide le récepteur à détecter et, dans la plupart des cas, à corriger les erreurs dans le message reçu. Les données codées sont modulées par le modulateur, qui représente chaque ensemble de mots de code par une forme d'onde analogique sélectionnée de manière appropriée, adaptée à la transmission sur le canal de communication. Le signal modulé est ensuite transmis par le canal de communication câblé ou sans fil. Pendant la transmission du signal dans le canal, le signal d'information est souvent affecté par du bruit, de l'atténuation, des interférences, des évanouissements et des distorsions.

Le démodulateur du récepteur convertit la forme d'onde analogique modulée reçue en une séquence de bits avec un minimum d'erreurs. Le décodeur de canal récupère la séquence de bits porteurs d'information à partir de la séquence de bits récupérée par le démodulateur, en supprimant les bits redondants qui ont été ajoutés dans le codage de canal. Il détecte et corrige les erreurs qui sont introduites dans le signal pendant la transmission. Le décodeur de source récupère le signal d'information à partir de la séquence de bits du décodage de canal. Si la destination est analogique, des conversions numériques/analogiques (D/A) sont effectuées dans ce bloc. Enfin, le signal transmis de la source est utilisé à la destination.

2.6.1. CAPACITE DU CANAL DE SHANNON :

Le théorème de Shannon-Hartley stipule que pour un canal à bruit blanc gaussien additif (AWGN), la capacité maximale est donnée par

$$C = B\ log_2(1 + \frac{S}{N}) \quad (2\text{-}65)$$

Où

$$C = 3.32\ B\ log_2(1 + \frac{S}{N}) \tag{2-66}$$

Où C est la capacité du canal en bits par seconde appelée « limite de capacité de Shannon », B est la largeur de bande du canal en Hertz, et $\frac{S}{N}$ le rapport signal/bruit. Cette équation de la capacité du canal donne le nombre de bits qui peuvent être transmis par seconde sans erreur sur un canal de largeur de bande B Hz, lorsque la puissance du signal est limitée à S Watts, et est exposée à l'AWGN. Elle explique également que, théoriquement, il est possible de transmettre des informations sur ces canaux avec une probabilité d'erreur arbitrairement faible, en tout cas R, où $R \leq C$, en utilisant un schéma de codage approprié. En revanche, si $R > C$, Une transmission sans erreur n'est pas possible quel que soit le traitement du signal ou le codage effectué à l'émetteur et au récepteur. L'équation (2-65) donne la capacité de transmission maximale fondamentale qui peut être obtenue sur un canal donné par toute combinaison de schéma de codage, de transmission ou de décodage, et constitue la meilleure limite de performance qui puisse être atteinte. Ce théorème énonce clairement ce qui est réalisable, sans expliquer comment il peut être atteint [62].

Le rapport signal/bruit (SNR ou S/N), est souvent représenté par le rapport de densité spectrale de l'énergie des bits d'information à la puissance du bruit, $Eb/N0$, qui permet de comparer équitablement des systèmes ayant des modulations ou des schémas de codage différents. Les deux grandeurs sont représentées comme suite :

$$\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{N}} = \frac{\mathrm{E_b}}{\mathrm{N_0}} \times \frac{\mathrm{R_b}}{\mathrm{B}} \tag{2-67}$$

Où R_b est le débit binaire et N_0 est la densité spectrale de puissance de bruit. Considérons que nous envoyons des chiffres binaires sur le canal AWGN à un débit binaire de transmission égal à la capacité du canal, c'est-à-dire $R_\mathrm{b} = C$, c'est-à-dire le système idéal, alors l'équation de Shannon-Hartley peut s'écrire

$$\frac{C}{B} = log_2(1 + \frac{\mathrm{E_b}}{\mathrm{N_0}}\ \frac{C}{B}) \tag{2-68}$$

Où C/B représente la capacité normalisée du canal, également appelée efficacité du spectre ou débit.

Avec réarrangement de la (2-68) on obtient

$$\frac{\mathrm{E_b}}{\mathrm{N_0}} = \frac{C}{B}\left(\frac{2^{\frac{C}{B}}-1}{\eta}\right) \tag{2-69}$$

Où $\eta = C/B$ est l'efficacité spectrale en bits/secondes/Hz.

$$\frac{\mathrm{E_b}}{\mathrm{N_0}} = \frac{C}{B}\left(\frac{2^{\eta}-1}{\eta}\right) \tag{2-70}$$

La relation est représentée dans le diagramme de l'efficacité de la bande passante de la *figure 2.17* la théorie de Shannon indique également la valeur limite de E_b/N_0 en dessous de laquelle il ne peut y avoir de transmission sans erreur à aucun débit de données. L'utilisation de l'identité

$$\lim_{n\to\infty}(1 + x)^{\frac{1}{x}} = e \tag{2-71}$$

Nous pouvons calculer la valeur limite de E_b/N_0 en considérant

$$x = \frac{E_b}{N_0}\left(\frac{C}{B}\right) \tag{2-72}$$

Ensuite, nous pouvons réécrire le (4) comme :

$$\frac{C}{B} = log_2(1+x)^{\frac{1}{x}} \tag{2-73}$$

$$1 = \frac{E_b}{N_0}\ log_2(1+x)^{\frac{1}{x}} \tag{2-74}$$

Dans la limite, comme $C/B \rightarrow 0$, nous obtenons

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{log_2 e} = 0.693 \tag{2-75}$$

Dans dB, $\frac{E_b}{N_0}$ = - 1.59 dB, représente la limite de Shannon ou plus précisément la "limite d'efficacité énergétique de Shannon", qui donne le minimum E_b/N_0 possible requis pour atteindre la capacité de transport maximale ($R_b = C$). Il s'agit de la limite du système à bande limitée, indépendamment de la modulation ou du codage. A mesure que l'on se rapproche de cette capacité, la complexité du système augmentera sensiblement. L'objectif de toute conception de système est donc d'atteindre cette limite.

Dans la limite de capacité de la Figure 2.17, $R_b = C$ est la limite absolue de Shannon pour le canal AWGN. La région $R_b > C$ est la région inaccessible, c'est-à-dire que si nous essayons d'envoyer les données sur le canal à une vitesse supérieure à la limite de capacité de Shannon, les erreurs de données au niveau du récepteur seront irrécupérables et les données seront complètement perdues. La région $R_b < C$ est la région réalisable en pratique, où le taux de signalisation R_b est inférieur à la limite absolue de capacité d'un canal.

Les travaux de Shannon ont fourni une preuve théorique de l'existence de codes qui pourraient être utilisés pour améliorer la performance des schémas de modulation binaire non codés pour se rapprocher de la courbe théorique. Aujourd'hui, tous les systèmes de codage tentent de se rapprocher de la limite de Shannon. Mais tout en utilisant ces schémas de modulation codés, le système de communication doit tenir compte de deux ressources majeures : la puissance de l'émetteur et la largeur de bande du canal.

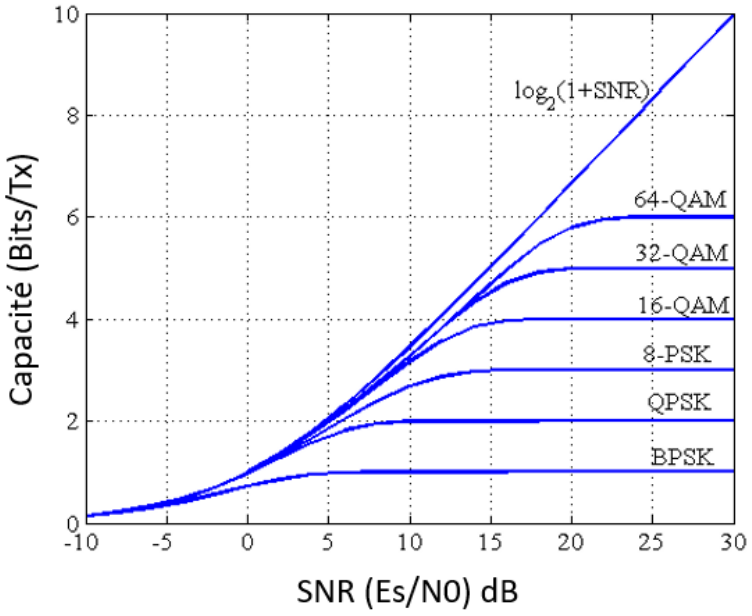


Figure 2.17 Courbe de capacité du canal pour le canal AWGN.

2.6.2. SYSTEMES A PUISSANCE LIMITEE ET A BANDE PASSANTE LIMITEE

Les deux principales ressources/contraintes de la communication sont la puissance d'émission requise et la largeur de bande disponible du canal. Dans chaque système de communication, une des ressources est plus précieuse que l'autre. En fonction de ces ressources, tous les systèmes de communication sont classés comme système à puissance limitée ou système à largeur de bande limitée.

Les systèmes à puissance limitée permettent d'économiser de l'énergie au détriment de la bande passante. Par exemple, la MFSK et le CDMA (Code Division Multiple Access), permettent une plus grande largeur de bande pour la transmission des données et fonctionnent avec une puissance minimale. Les systèmes de communication dans l'espace lointain font partie de la catégorie des systèmes à puissance limitée [63].

Les systèmes à bande passante limitée économisent la bande passante au détriment de la puissance. La largeur de bande disponible pour certaines applications de communication est limitée. La capacité du canal de communication est proportionnelle à la largeur de bande, et la demande de systèmes de communication de grande capacité augmente de jour en jour. Les schémas de modulation à bande passante efficace tels que as$M$-PSK et M-QAM permettent d'économiser la bande passante de transmission au détriment de la puissance de transmission. Les systèmes de communication mobile cellulaire sont classés dans la catégorie des systèmes à largeur de bande limitée [63].

2.6.3. EFFICACITE DE LA BANDE PASSANTE DES SYSTEMES MODULES

Le rapport entre le débit binaire et la largeur de bande requise est appelé efficacité de la largeur de bande de transmission d'un système de modulation. L'efficacité de la largeur de bande des systèmes de modulation à largeur de bande efficace, MPSK et MQAM, pour un filtrage idéal, c'est-à-dire un filtrage de Nyquist, est donnée par [88]

$$\eta = \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{B}} = log_2(\mathrm{M})(\mathrm{b/s})/\mathrm{Hz} \tag{2-76}$$

Quand M augmente, η augmente aussi.

2.6.4. CODES DE CORRECTION D'ERREURS CCE

Le codage de contrôle des erreurs est mis en œuvre pour détecter et corriger un nombre limité d'erreurs qui se produisent lors de la transmission de données dans des canaux bruités. L'erreur est contrôlée en introduisant une paire de codeurs/décodeurs de canal dans le bloc des systèmes de communication. L'objectif général du codage de contrôle des erreurs est de coder l'information numérique de telle sorte que même le canal ou le support de stockage introduise une erreur ; le récepteur peut les détecter et les corriger et récupérer l'information transmise à l'origine.

Le schéma de codage FEC peut détecter et corriger les erreurs introduites dans les mots de code transmis au niveau du récepteur sans être renvoyé à l'émetteur. Ainsi, cette technique ne nécessite qu'une liaison unidirectionnelle entre l'émetteur et le récepteur. Les codes FEC ont été classés principalement en deux catégories distinctes : les codes de bloc et les codes de convolution.

2.6.5. Codes en bloc

Dans le codage par bloc, les données sont codées et décodées par bloc. L'opération de codage par blocs ne nécessite pas de mémoire et peut être mise en œuvre en utilisant la logique combinatoire.

Dans le code de bloc binaire, chaque donnée d'une séquence d'entrée est convertie en une taille de bloc de k bits. Chaque bloc de données est mis en correspondance avec le mot de code au symbole n, avec $n > k$. Les bits redondants supplémentaires n-k (normalement des bits de parité) sont ajoutés pour détecter et corriger les erreurs. Chaque bloc de données est associé à un et un seul mot de code de 2^k mots de code distincts. Le code résultant est représenté comme (n,k), code de bloc. Puisque chaque mot de code contient les symboles n pour transmettre les bits d'information k, le débit de base de la sortie du codeur est k/n.

L'encodeur va mapper la séquence d'informations en mots de code en choisissant correctement les bits de parité. Le décodage au niveau du décodeur est effectué en déterminant les mots de code les plus probables transmis à partir des symboles reçus.

Un code de bloc est linéaire si la composante du mot de code peut être écrite comme une combinaison linéaire des bits d'information k.

Dans le code de bloc linéaire systématique, k les bits des mots de code sont des symboles de message qui sont transmis sans altération. Les bits d'information sont suivis par des bits redondants (bits de parité) ou vice versa, ce qui donne des parties de message et des parties de bits redondantes comme le montre la figure 2.18.

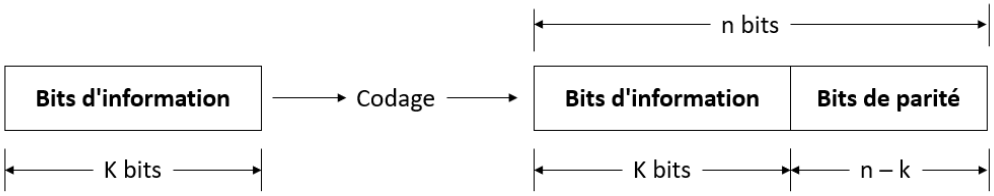


Figure 2.18 Code de bloc systématique

Voici quelques définitions fondamentales :

- Poids de Hamming : Le poids de Hamming (ou simplement le poids) d'un code c est défini comme le nombre de composantes non nulles du code.
- Distance de Hamming : La distance de Hamming (ou simplement la distance) entre deux codes c_1 et c_2 désignés par d (c_1 et c_2) est le nombre de positions dans lesquelles ils diffèrent (somme modulo-2 de c_1 et c_2). De plus, la distance de hamming entre deux codes est égale au poids de hamming de la somme des deux codes.
- Si c_1 et c_2 sont tous deux des mots-codes d'un code de bloc linéaire, alors la somme de deux mots-codes doit être un mot-code. De plus, au minimum distance $d_{\min}$ d'un code bloc linéaire est égal au poids minimum de son mot de code non nul. La distance minimale est également définie comme la plus petite distance de hamming entre une paire de vecteurs de code dans le code.

Un code de bloc avec une distance minimale $d_{\min}$ peut corriger les erreurs de to$t$, où t est donné comme [62][89].

$t \leq \lfloor (d_{\min} - 1)/2 \rfloor$ où $\lfloor x \rfloor$ désigne le plus grand nombre entier non supérieur ou égal à x.

Le code de bloc linéaire correcteur d'erreurs t (n,k) sur un canal binaire symétrique (BSC) sans mémoire avec une probabilité de transition P_c, la probabilité que le décodeur effectue un décodage erroné est la limite supérieure et est donnée par [53][54].

$$P_w(c) = \sum_{i=t+1}^{n} \binom{n}{i} P_c^i (1 - P_c)^{n-i} \quad (2\text{-}78)$$

Où $\binom{n}{i}$ représente le nombre de tous les modèles possibles d'erreurs i dans un mot de code du symbole n. Certains des codages en bloc les plus populaires sont les codes cycliques, les codes BCH (Bose-Chaudhuri-Hocuenghem), les codes de Hamming, les codes de Reed-Muller, les codes de Reed-Solomon (RS) et les codes de Goley. Le code cyclique est celui dans lequel l'opération de décalage cyclique du mot de code génère un autre mot de code. A partir d'un seul mot de code n-bit, des mots de code n-1 peuvent être générés par des décalages cycliques, qui peuvent être mis en œuvre en utilisant un registre à décalage et une petite quantité de logique supplémentaire. Le code BCH est également un code cyclique et son codage et son décodage sont effectués à l'aide de circuits de registres à décalage. Ce code est le meilleur code constructif pour les canaux dont les erreurs affectent les symboles successifs de façon indépendante. Le code de Hamming est le cas particulier du code BCH avec une distance minimale de 3. Les codes de Hamming sont utilisés dans les dispositifs de mémoire d'ordinateur [90][91]. Les codes Reed Solomon (RS) sont des codes BCH non binaires, le plus souvent utilisés dans les stockages de données, tels que les CD-ROM (Compact Disc-Read Only Memory), les DVD (Digital Versatile Disc) et les systèmes de communication, y compris les communications spatiales et les applications de transmission de TVHD numérique terrestre (télévision haute définition) [89].

2.6.6. Codage convolutif

Le codage par convolution fonctionne sur des flux de données séquentiels et ses opérations de codage et de décodage dépendent également des données actuelles et précédentes. Puisque le codage par convolution contient de la mémoire, il doit être implémenté en utilisant une logique séquentielle [92].

Le codeur de convolution est composé de trois parties : le registre à décalage, les additionneurs modulo-2 et le commutateur. Les registres à décalage de M sont connectés aux additionneurs modulo-2 de n, et à un commutateur qui sérialise les sorties des additionneurs.

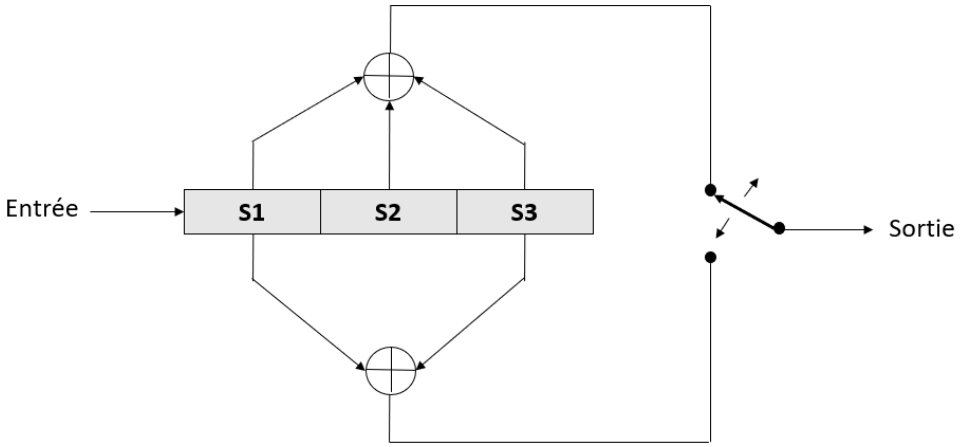


Figure 2.19 Codage par convolution

Le code de convolution est décrit par trois entiers, k, n et K. Le k est le bit d'entrée et n est le bit de sortie codé qui n'est pas une longueur de bloc ou de mot de code comme dans le code de bloc. La longueur de contrainte K est définie comme le nombre de décalages sur lesquels un seul bit de message peut influencer la sortie du codeur. Comme il met en œuvre des registres à décalage, le codeur dispose d'une mémoire, de sorte que la sortie du codeur n'est pas seulement la fonction de l'entrée actuelle mais aussi des entrées K-1 précédentes. La figure 2.19 illustre un codeur de convolution à taux ½.

Le codeur du codage par convolution peut être représenté sous plusieurs autres formes telles que la forme polynomiale, le diagramme d'état, le diagramme en arbre et la représentation en diagramme en treillis. Le décodage de convolution peut être effectué en utilisant le décodage de maximum de

vraisemblance (MLD), le décodage séquentiel, le décodage de Viterbi, etc. L'algorithme de décodage de Viterbi a trouvé des applications pratiques très répandues.

2.6.7. Codes Reed Solomon

Les codes RS(n,k) sont des FEC efficaces avec leurs performances pertinentes pour une complexité de décodage raisonnable. Il est composé de n symboles appelés mot de code avec k symboles de message, des symboles redondants (N-k) et une capacité de correction d'erreur de t=(n-k)/2 avec m le nombre de bits dans un symbole, remplissant leur fonction selon GF(2^m), lorsque l'on modifie les valeurs des paramètres k et n, les capacités de correction d'erreur diffèrent et produisent une complexité différente du système de correction d'erreur [93]. Ainsi, nous pouvons écrire RS(n,k) comme :

$$(n,k) = (2^{(m-1)}, 2^{(m-1)} - 1 - 2t) \quad (2\text{-}79)$$

Le nombre de bits de parité ajoutés aux bits du message est calculé par (n-k) = 2t où t est le nombre d'erreurs corrigées par le code RS [94]. La distance du code RS est donnée par :

$$d_{min} = n - k + 1 \quad (2\text{-}80)$$

- Encodage : Si l'on choisit un champ fini de q éléments, dont GF(2^m), le message u à transmettre est donc constitué de k éléments de GF(2^m) qui sont donnés par :

$$u = (u_0, u_2, \dots u_{k-1}) \quad (2\text{-}81)$$

Où u_i € GF (2^m)

Ainsi, le polynôme du message est calculé en multipliant les coefficients du message par la puissance appropriée de x qui est donnée comme suit :

$$U(x) = u_0 + u_1 x + \cdots u_{k-1} x^{k-1} \quad (2\text{-}82)$$

Le polynôme restant est connu sous le nom de polynôme de contrôle de parité :

$$B(x) = b_0 + b_1 x + \cdots b_{2t-1} x^{2t-1} \quad (2\text{-}83)$$

Ensuite, le mot de code est formé en ajoutant les deux polynômes comme suit :

$$V(x) = U(x) + B(x) \quad (2\text{-}84)$$

- Décodage : Lorsque le message est transmis, de nombreux problèmes peuvent survenir, comme la corruption du message envoyé en raison d'un canal bruyant, etc. Ainsi, le message reçu à l'extrémité des récepteurs est r(x) qui est donné par l'expression suivante :

$$R(x) = C(x) + E(x) \quad (2\text{-}85)$$

C(x) correspond au mot de code original transmis et E(x) est l'erreur, qui est en outre donnée par l'expression suivante :

$$E(x) = e_{n-1} x^{n-1} + \cdots e_1 x + e_0 \quad (2\text{-}86)$$

Quelques études ont développé des codes RS raccourcis [94], ces codes peuvent être formés en mettant à zéro certains symboles d'information dans le code RS mère. Comme ces symboles entièrement nuls inhérents peuvent être considérés comme des symboles connus dans le récepteur, il n'est pas nécessaire de les transmettre.

2.6.8. Contrôle de parité de faible densité (Low-density Parity Chec LDPC)

Les codes LDPC (Low-density parity-check) ou codes de Gallagar sont des codes de correction d'erreur découverts par Robert Gallagar vers 1960 [95]. Ils ont été oubliés pendant environ 30 ans en raison de leur grande complexité. Dans les années 1990, ces codes ont été redécouverts et utilisés dans de nombreuses applications, notamment dans le codage des canaux.

Tout code LDPC est décrit par sa matrice de contrôle de parité, qui est généralement une matrice clairsemée, où peu de codes sont répartis sur un immense ensemble de zéros. En d'autres termes, le nombre de uns est bien inférieur au nombre de zéros.

Les codes LDPC appartiennent à la catégorie du décodage itératif. Ils surpassent le code ½ et se rapprochent de la limite de Shannon avec 0,0045 dB en bruit blanc gaussien [96].

Gallagar a fourni un algorithme pour résoudre la log-vraisemblance de manière itérative ; en faisant passer la log-vraisemblance ou les probabilités entre les nœuds variables, par les nœuds de contrôle. Cet algorithme itératif est connu sous le nom d'algorithme somme-produit [96].

La matrice de contrôle de parité dans les codes LDPC peut avoir une structure régulière ou irrégulière. Il est intéressant de noter que les codes irréguliers sont plus performants que les codes réguliers. Les codes LDPC dont les performances se rapprochent de la limite de Shannon sont des "codes Gallager" basés sur une structure irrégulière de matrice de contrôle de parité.

2.6.9. Rôle des codes correcteurs d'erreurs dans les IWSN

Comme nous l'avons vu, le principal défi qui s'applique à tous les IWSNs est la nature limitée en énergie des nœuds de capteurs et leurs capacités à résister au bruit industriel. Par conséquent, la consommation d'énergie et la robustesse du système de communication d'un IWSN doivent être prises en compte tout au long du processus de conception. Cependant, les spécifications, telles que les portées des communications, les débits de données, les topologies de réseau et les fréquences porteuses, dépendent fortement du scénario visé. L'optimisation de l'efficacité énergétique du système de communication doit tenir compte de ces facteurs. Des recherches antérieures ont examiné ce sujet dans différentes couches du système de communication, notamment la couche de contrôle d'accès aux médias (MAC), la couche physique et les architectures matérielles.

Un principe clé pour réduire la consommation d'énergie et renforcer la robustesse d'un système de communication IWSN est d'utiliser l'énergie efficacement en fonction des besoins de communication en utilisant les codes correcteurs d'erreur le plus efficacement possible. Par exemple, le fait de dépasser les exigences de communication des applications cibles, comme le débit de données ou la portée des communications, peut entraîner un gaspillage d'énergie inutile. De plus, avec une spécification optimisée basée sur les exigences de communication, une conception efficace, employant des techniques de codage, des algorithmes et des implémentations matérielles appropriés, est également importante pour réduire davantage la consommation d'énergie du système.

Les CCE qui sont adoptés par les normes IWSN existantes sont appropriés pour les communications à courte distance. Par exemple, la portée des transmissions typique de la norme IEEE 802.15.4 est de 10 à 75 mètres [97]. À ces portées de communication, la consommation d'énergie de transmission E_{TX} est suffisamment faible pour que la consommation d'énergie de traitement E_{PR} introduite par les systèmes de codage ne soit pas négligeable. Compte tenu de la consommation d'énergie globale E_{TX}+ E_{PR}, des systèmes ECC simples sont motivés pour ces normes. En général, du point de vue de l'efficacité énergétique, les codes ECC sophistiqués sont plus adaptés à la communication à longue distance, puisque l'E_{TX} augmente de manière exponentielle avec la portée de la communication. Dans ce cas, l'E_{PR} devient négligeable par rapport à l'E_{TX}. Dans ces circonstances, un ECC sophistiqué peut réduire

l'E_{TX} de manière significative, ce qui est supérieur à sa consommation d'énergie $E_{PR,b}$. En fonction du système de RCE et de sa mise en œuvre, il existe une distance critique au-delà de laquelle le système de CCE réduit la consommation énergétique globale EE_{TX}+ E_{PR} et peut être considéré comme efficace sur le plan énergétique. La distance critique dépend aussi fortement de l'environnement de transmission particulier, car l'exposant n de l'affaiblissement du trajet peut être très variable, les performances proches de la limite de Shannon des CEE sophistiqués permettent des gains de codage plus importants que les CCE simples qui sont utilisés dans les protocoles de communication conventionnels pour les IWSN. Cela permet d'utiliser une énergie de transmission plus faible, sans augmenter le taux d'erreur de transmission.

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté tous les éléments que nous allons utiliser tout au long de la 2ème partie de la thèse pour la conception de l'architecture de communication sans fil utilisant la modulation par paquets d'ondelettes discrètes et les codes correcteurs d'erreurs pour une utilisation dans un milieu fortement bruité. Nous avons présenté les différentes caractéristiques des canaux de propagation sans fil, plus spécifiquement les milieux de propagation sans fil industriel. La transmission dans un tel milieu est plus compliquée en comparaison avec celle dans les autres environnements extérieurs ou des bureaux. Nous avons présenté par la suite l'état de l'art des techniques de modulation les plus utilisé dans les IWSNs, pour faire une comparaison directe avec la modulation par paquets d'ondelettes discrètes que nous avons adoptés dans notre architecture. Comme preuve supplémentaire que la modulation par paquets d'ondelettes discrètes peut être utilisée comme alternative à l'OFDM, les scientifiques et les chercheurs se penchent activement sur ce sujet pendant la réalisation de cette thèse et aussi au-delà, comme nous l'avons découvert précédemment dans notre équipe [98]. La DWPT, en tant que technique de modulation pour la transmission de signaux, a été examinée, discutée de manière critique. Dans les cas de modulation DWPT, il a été constaté qu'elle offre un meilleur BER par rapport au SNR et un meilleur débit du système que la FFT en OFDM. Ces performances seront améliorées par l'utilisation des codes correcteurs d'erreurs sous plusieurs configurations pour adopter la meilleure utilisation respectant l'efficacité en matière de performances. Cependant, les différentes familles d'ondelettes et les membres de ces familles ont des performances variables, nous verrons dans la partie suivante notre proposition d'architecture de communication sans fil, basée sur l'IDWPT pour la transmission, et la DWPT pour la réception, un modèle de canal industriel sera aussi proposé pour tester notre architecture sous deux modes d'exploitation multi-utilisateurs flexible.

Deuxième partie
Aspects fonctionnels et architecturaux

Chapitre 3
Architecture fonctionnelle et canal industriel de propagation

3.1. Introduction 72

3.2. Environnement industriel de propagation 72

3.2.1. Conditions des milieux industriels 72

3.2.2. Caractéristiques d'un canal sans fil industriel 73

3.2.3. Bruit industriel 73

3.2.3.1. Bruit gaussien (AWGN) 73

3.2.3.2. Bruit impulsif 74

3.2.3.3. Canal multi-chemin : 75

3.2.4. Contraintes du milieu industriel bruité 76

3.2.4.1. Contraintes fréquentielles 77

3.2.4.2. Contraintes de capacité 78

3.2.4.3. Contraintes de disponibilité 78

3.2.5. Modèle de canal industriel utilisé 79

3.3. Architecture basée sur la modulation par ondelettes 80

3.3.1. Technique de modulation à la transmission 81

3.3.2. Technique de démodulation à la réception 81

3.4. Modes d'exploitations et scénarios 82

3.4.1. Mode Many to One (MtO) 82

3.4.2. La forme des signaux en émission et réception 83

3.4.3. Simulation des performances du mode MtO 84

3.4.4. Mode One to Many (OtM) 88

3.4.5. Simulation des performances du mode OtM 89

3.5. Conclusion 93

3.1. Introduction

Nous nous sommes penchés sur nos travaux sur le développement d'une architecture novatrice utilisant la modulation par ondelettes pour pouvoir être utilisé efficacement dans les milieux industriels bruités. De plus, en prenant en considération sa capacité à être utilisé comme système de communication multiutilisateur, cette architecture de communication est contrainte à adapter en transmission les techniques d'accès multiple au canal. Cela revient au fait que plusieurs utilisateurs sont obligés à partager le même canal de propagation. Nous présentons dans cette partie une architecture fonctionnelle basée sur une approche novatrice des méthodes d'accès MAC et de modulation dans la couche PHY. Le concept principal repose sur une exploitation différente de la couche PHY, qui repose sur une approche impulsionnelle, pour arriver à avoir un fonctionnement simplifié au niveau MAC et de permettre la conception d'une chaine de transmission impulsionnelle fiable et robuste contre le bruit industriel, flexible et à haut débit.

L'architecture que nous avons conçue repose sur l'utilisation de la modulation par paquets d'ondelettes discrètes, donc d'utiliser les ondelettes à la place de sinusoïdes pour avoir une transmission de données par la génération de signaux physiques. Les performances fonctionnelles des systèmes de communication sans fil traditionnels tels que le nombre d'utilisateurs supportés, les modes de transmissions, la fiabilité, et la résistance aux bruits industriels s'avèrent insuffisantes d'un côté, et d'un autre, les travaux ayant mis en œuvre des architectures fonctionnelles robustes possédant les caractéristiques nécessaires pour pouvoir être exploitées dans des réseaux IWSNs sont rares.

Notre travail de thèse consiste à évaluer les performances et la robustesse de notre architecture de communication sans fil, en exploitant deux modes de transmissions OtM et MtO, dans un canal industriel. Nous présenterons le modèle de canal industriel que nous allons utiliser dans nos simulations pour évaluer les performances et le fonctionnement de notre architecture qui utilise la IDWPT à la transmission et la DWPT à la réception. Nous avons exécuté les tests et simulations de l'architecture fonctionnelle avec le logiciel Matlab version R2018b. L'étude des performances est effectuée en évaluant le taux d'erreur sur les bits, sous deux types de canaux, un avec un bruit additif blanc AWGN, et un deuxième sous bruit industriel, ces simulations seront faites sous deux techniques de transmission, un utilisateur vers plusieurs récepteurs OtM, et plusieurs utilisateurs vers un seul récepteur MtO.

3.2. Environnement industriel de propagation

Le plus grand défi auquel sont confrontées les technologies sans fil pour les applications industrielles est l'environnement bruité, qui entraîne une dégradation des performances, due à la diversité des machines électriques, à la propagation chemin accrue par les nombreux éléments métalliques ainsi qu'au déplacement des travailleurs, des équipements de transport et des travaux de réparation qui peuvent également avoir des effets variables dans le temps, etc. C'est pourquoi une bonne estimation du canal est nécessaire pour concevoir et évaluer des réseaux de capteurs fiables pour des applications industrielles.

3.2.1. Conditions des milieux industriels

Les applications de réseautage sans fil continuent de se développer à un rythme incroyable à mesure que les caractéristiques, les fonctions, la sécurité et le débit sans fil s'améliorent. La norme 802.11 est la norme sur laquelle repose aujourd'hui le réseautage sans fil, et les produits qui utilisent cette technologie prennent en charge une vaste gamme d'utilisations pour les entreprises et les particuliers. Les avantages d'Ethernet en tant que moyen de transport commun ouvert, à haut débit et à faible coût ont conduit à des taux d'adoption croissants pour les applications industrielles. L'utilisation des technologies sans fil, et en particulier du support physique Ethernet, augmente la connectivité et la

flexibilité de l'Ethernet industriel, souvent avec des économies substantielles sur les coûts initiaux et sur la durée de vie. Les technologies Ethernet sans fil ont progressé de la même manière que leurs homologues câblées et à fibre optique, et le sans-fil est maintenant une option pratique en usine.

3.2.2. Caractéristiques d'un canal sans fil industriel

Les environnements industriels se distinguent uniquement des environnements de bureau et de la maison. Les températures élevées, l'excès de particules en suspension dans l'air, les multiples obstacles et les longues distances séparant les équipements et les systèmes, sont des défis particuliers qui rendent difficile la mise en place et l'accessibilité des capteurs, transmetteurs et autres dispositifs de communication de données. La taille physique d'une zone industrielle nécessitant une couverture est souvent assez grande, comme des centaines ou même des milliers de pieds carrés, et à l'intérieur de ces bâtiments, les défis physiques sont encore plus grands. Le grand volume de métal que l'on trouve généralement dans la construction du bâtiment ainsi que dans l'environnement, comme les grands navires, la tuyauterie et la machinerie, peut causer des problèmes aux signaux RF, tout comme les équipements qui émettent des bruits électromagnétiques, tels que les gros moteurs. La présence de plusieurs appareils et équipements peut créer des « angles morts » RF. Les règlements de l'industrie peuvent également augmenter considérablement le coût d'installation, puisque, par exemple, certains câblages peuvent devoir être passés dans des conduits métalliques et, enfin, les matières dangereuses ou explosives que l'on trouve dans de nombreux environnements industriels ajoutent encore un autre niveau de complexité.

La liste peut s'allonger encore et encore afin de pouvoir illustrer en profondeur toutes les caractéristiques disponibles des zones industrielles et comment elles affectent éventuellement les performances des liaisons sans fil. Comme cela demanderait trop de temps, ce travail fait référence à ces problèmes en présentant une liste de toutes les caractéristiques possibles qui pourraient être présentes dans un environnement difficile. Il convient de noter que la dureté d'un environnement dépend de nombreux facteurs et est considérée comme un état variable. Il est difficile, mais pas impossible de trouver tous les facteurs présents en même temps dans la même zone. De nos jours, il existe une grande diversité dans les zones industrielles où les réseaux sans fil sont déployés et exploités, à savoir les usines, les usines de contrôle des procédés, les entrepôts, les oléoducs et gazoducs, les contrôles de bâtiments, les hôpitaux, les camions et automobiles, les services publics et les installations urbaines comme l'éclairage et le contrôle de la circulation.

3.2.3. Bruit industriel

Le bruit est un facteur important qui a un impact énorme sur le signal. Le bruit est une interférence aléatoire, imprévisible et non voulue qui déforme le signal et ne peut être compensée. Dans les communications numériques, la puissance du signal diminue avec l'augmentation de la distance sur un canal. Le SNR est une mesure qui est définie comme la puissance du signal par rapport à la puissance du bruit. Ainsi, un bruit plus faible maintient un SNR plus élevé, ce qui permet une transmission de données réussie sur le canal sans fil. Alors qu'un bruit plus élevé démolit le rapport signal/bruit et déforme le signal à nouveau, il ne peut pas être récupéré avec précision au niveau du récepteur.

3.2.3.1. Bruit gaussien (AWGN)

Le bruit gaussien est défini comme un bruit ayant certaines propriétés statistiques particulières. Ce bruit a une fonction de densité de probabilité comme une distribution normale, aussi connue sous le nom de distribution gaussienne. Cela signifie que la puissance du bruit est distribuée selon une loi gaussienne. Un cas spécifique de ce bruit, et le bruit avec lequel nous allons travailler, est le bruit blanc gaussien additif, qui en plus de cela, les valeurs du bruit dans deux temps différents sont statistiquement indépendantes et non corrélées, ce qui le fait apparaître comme étant à large bande [99].

Ce type de bruit gaussien ne représente pas un problème, quand la puissance du signal utile est supérieure à ce bruit.

3.2.3.2. Bruit impulsif

Le bruit impulsif, est non stationnaire et est composé d'impulsions irrégulières de courte durée et de pics d'énergie significatifs avec une amplitude et un contenu spectral aléatoires, c'est pourquoi le bruit impulsif est considéré comme la principale cause de l'apparition d'erreurs en rafale dans la transmission de données causant une perte temporaire de signal.

Il est donc essentiel de connaître la nature statistique du bruit impulsionnel afin de pouvoir évaluer son impact sur un système de communication. Ces impulsions sont dues à 2 causes principales, les interférences électromagnétiques ambiantes (orages), les interférences électromagnétiques naturelles, ou les erreurs sur les systèmes de télécommunications, d'origine humaine.

Le modèle de bruit impulsif est une séquence d'impulsions caractérisée par trois de ces paramètres : l'amplitude de l'impulsion, la durée de l'impulsion et le temps entre deux impulsions consécutives.

Un filtre de bruit impulsionnel peut être utilisé pour améliorer la qualité des signaux bruités, afin d'obtenir une robustesse dans la reconnaissance des formes et les systèmes de contrôle adaptatifs. Un filtre classique utilisé pour éliminer le bruit impulsionnel est le filtre médian, au détriment de la dégradation du signal. Il est donc assez courant, pour obtenir des filtres de bruit impulsionnel plus performants, d'utiliser des systèmes basés sur des modèles qui connaissent les propriétés du bruit et du signal source (en temps ou en fréquence), afin de ne supprimer que les échantillons oblitérés par impulsion. C'est pourquoi il est nécessaire de caractériser le bruit impulsionnel, et en fonction de certains paramètres, il sera classé dans trois modèles différents [100].

Différents auteurs ont proposé diverses distributions statistiques, comme Spaulding et Middleton qui ont étudié la réception optimale des signaux pour les différents modèles [100]. Gilbert a caractérisé le " bruit de tir " comme une distribution d'amplitude d'impulsions de même forme se produisant à des moments aléatoires distribués par Poisson. Middleton et Spaulding ont proposé un modèle plus complexe qui caractérise également la durée des impulsions et le temps entre les impulsions. Les trois modèles de Middleton (classes A, B et C) sont des modèles physiques statistiques qui comprennent les composantes non gaussiennes du bruit naturel et du bruit artificiel. Ces modèles sont de nature canonique, c'est-à-dire que leur forme mathématique est indépendante de l'environnement physique. La distinction entre les trois modèles est basée sur la largeur de bande relative du bruit et du récepteur.

- **Model de middleton classe A :** Désigne un bruit impulsif dont le spectre est étroit par rapport à la largeur de bande du récepteur et comprend toutes les impulsions qui ne produisent pas de transitoires dans le front du récepteur. Sa fonction de densité de probabilité est [101][102] :

$$f_x(x) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m!\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_m^2}} \quad (3\text{-}1)$$

Où m représente les différentes sources impulsives, et σ_m^2 est écrit comme :

$$\sigma_m^2 = \frac{\frac{m}{A} + \Gamma}{1 + \Gamma'} \quad (3\text{-}2)$$

La variance du bruit, où $A = v_t T_s$ est l'indice d'impulsion, v_t est le taux d'impulsion moyen et T_s est la durée d'impulsion moyenne. L'équation est une somme pondérée de distributions gaussiennes. En augmentant l'indice d'impulsion, A, le bruit peut être rendu arbitrairement proche de la distribution gaussienne et en diminuant A, il peut être rendu arbitrairement proche d'un processus de Poisson conventionnel. Le modèle suppose que les impulsions individuelles sont distribuées de Poisson dans le temps [102].

Les petites valeurs de A signifient que la probabilité de chevauchement des impulsions dans le temps est faible. De grandes valeurs de A signifient que cette probabilité est grande. Dans ce dernier cas, le théorème de la limite centrale peut être invoqué, ce qui donne une distribution qui tend vers le gaussien. Le facteur d'échelle Γ est le rapport des puissances entre les composantes gaussienne et impulsive (non gaussienne).

$$\Gamma = \frac{X_G^2}{X_P^2} \tag{3-3}$$

- **Model de middleton classe B :** Désigne un bruit impulsif dont le spectre est supérieur à la largeur de bande du système de réception. Les impulsions de bruit de classe B produisent des transitoires dans le récepteur. Bien qu'il puisse modéliser avec précision un environnement de bruit impulsif à large bande, ses applications pratiques sont limitées en raison de la forme complexe de son APD qui comporte cinq paramètres et un point d'inflexion déterminé empiriquement [102].
- **Model de middleton classe C :** Le bruit de classe C est une somme linéaire de bruit de classe A et de classe B. En pratique, le bruit de classe C peut souvent être approximé par la classe B [103][104].

3.2.3.3. Canal multi-chemin :

Un signal radio se propage d'un émetteur à un récepteur par des chemins distincts avec des retards différents dus à la réflexion, l'absorption, la diffusion et la diffraction des objets de l'environnement. Cela crée un canal complexe connu sous le nom de canal à trajets multiples ou canal multi-chemin, c'est-à-dire que chaque trajet subit un évanouissement. Les signaux à trajets multiples subissent des fluctuations aléatoires au cours de leur propagation. On trouve dans les travaux de recherches qui se penchent sur la réponse impulsionnelle d'un canal de propagation large bande dans un milieu industriel suit une loi exponentielle décroissante [105], Cette loi dépend de la puissance de chaque trajet et de ces retards et comme dans le modèle établi par [106].

L'atténuation de la puissance $P_L(d)$ est donnée par la formule suivante :

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10n\,log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \nu \tag{3-4}$$

D'après [106], les paramètres n et ν sont donnés pour calculer l'atténuation de puissance en fonction de la distance, et qui ont été calculé en ligne et hors ligne de vue, avec $P_L(d_0) = 20\,log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)$ou λreprésente la longueur d'onde en fréquence.

De la même manière, la dispersion temporelle du canal est donnée en tenant compte de la fréquence de transmission ainsi que la configuration LOS/NLOS comme présenté dans les travaux [107][108]. Les valeurs de la dispersion des retards tirées des modèles déterministes pour les fréquences 2.4 GHz et 5 GHz sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Dispersion des retards τ_{rms}réelles

	$\tau_{rms}(ns)$	
	LOS	*NLOS*

$2.4GHz$	25 ~ 100	25 ~ 100
$5GHz$	$28 \sim 38$	$34 \sim 51$

L'objectif de ce travail de thèse étant de valider notre système de communication dans un environnement de propagation industriel bruité, nous avons donc intégré les valeurs de la dispersion des retards et de l'atténuation de puissance issues des mesures réelles dans un modèle ayant un profil en puissance PDP suivant la loi exponentielle décroissante. Ceci rentre dans l'objectif de simuler la réponse impulsionnelle du canal. En considérant que la distance maximale d entre les émetteurs et récepteurs ne dépasse pas 100m, et pour les configurations LOS et NLOS aux fréquences 2.4 GHz et 5 GHz, la démarche qui a été suivie pour générer la réponse impulsionnelle du canal est la suivante :

- Fixer à 10 trajets maximum le nombre des trajets de la réponse impulsionnelle.
- Calculer l'atténuation moyenne en fonction de la distance.
- Calculer aléatoirement suivant une distribution exponentielle les retards $\tau_m$de la réponse impulsionnelle pour chaque trajet m, tout en respectant la contrainte de la dispersion des retards τ_{rms}ayant une valeur comprise dans les intervalles définis au tableau 3.1.
- Calculer la puissance des trajets $P_m$tout en supposant que le profil en puissance PDP décroit de manière exponentielle suivant l'équation :

$$P_m = exp\left(\frac{-\tau_m}{\pi_{rms}}\right) \tag{3-5}$$

Un exemple des puissances et retards simulés sont présentés dans le tableau 3.2 pour construire les canaux LOS et NLOS à 2.4 GHz et 5 GHz.

Tableau 3.2 Puissances simulés et retards des canaux LOS et NLOS [114]

	Canal LOS à 2.4GHz									
Retards des trajets (ns)	0	5	15	25	40	50	70	100	150	250
Puissance des trajets (dB)	0	-6	-2	-8	-17	-9	-12	-10	-13	-15
	Canal NLOS à 2.4GHz									
Retards des trajets (ns)	0	10	25	45	60	80	120	250	400	500
Puissance des trajets (dB)	-2	0	-1.5	-4	-13	-6	-9	-12	-10	-15
	Canal LOS à 5GHz									
Retards des trajets (ns)	0	5	10	25	40	50	60	80	110	140
Puissance des trajets (dB)	0	-3	-5	-6	-17	-8	-10	-13	-11	-15
	Canal NLOS à 5GHz									
Retards des trajets (ns)	0	5	8	10	30	40	90	100	150	180
Puissance des trajets (dB)	-3	0	-1	-5	-10	-6	-7	-10	-12	-15

3.2.4. Contraintes du milieu industriel bruité

Pour réussir dans cet environnement industriel difficile, il faut comprendre les exigences uniques et comment ces exigences se traduisent en critères pour la sélection de l'aspect le plus crucial de toute solution de mobilité - l'infrastructure sans fil. La sélection de la bonne infrastructure assurera la performance et la fonctionnalité nécessaires aux applications industrielles d'aujourd'hui, assurera également que le réseau peut se développer en s'adaptant aux besoins changeants et croissants de l'industrie. En même temps, cela réduit le risque de défaillances qui peuvent entraîner des résultats terribles et la perte de données importantes qui sont collectées soit par des équipements expérimentaux,

soit par des capteurs qui assurent la sécurité et la fiabilité des opérations de l'industrie. Le coût général de la conception et du déploiement d'un réseau sans fil dans un tel environnement est élevé.

3.2.4.1. Contraintes fréquentielles

Comme dans les réseaux sans fil, le support de transmission est l'air et que les données sont envoyées d'un nœud à l'autre sous forme d'ondes électromagnétiques, la fréquence et les canaux sont principalement affectés. Les problèmes qui apparaissent sont nombreux et influencent la performance du réseau de plusieurs façons, tel qu'étudié par les chercheurs [109][110] ci-dessous sont présentés les revers les plus courants rencontrés dans un environnement sans fil.

- **Affaiblissement de trajet :** L'intensité d'un signal radio diminue avec la distance entre un émetteur et un récepteur. Cette diminution est connue sous le nom de perte de trajet. L'ampleur de l'affaiblissement sur le trajet dépend de plusieurs paramètres, dont la technologie de l'antenne, les fréquences utilisées et les conditions environnementales présentes, il est intimement lié à l'environnement dans lequel se trouvent l'émetteur et le récepteur. Les modèles d'affaiblissement sur le trajet sont élaborés en utilisant une combinaison de méthodes numériques et d'approximations empiriques des données mesurées recueillies dans les expériences de sondage des canaux. En général, l'affaiblissement sur le trajet de propagation augmente avec la fréquence ainsi qu'avec la distance :

$$P_l = 10 \log_{10}(\frac{16 \pi^2 d^n}{\lambda^2}) \quad (3\text{-}6)$$

  Où P_l est l'affaiblissement moyen sur le trajet de propagation, d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, n est l'exposant d'affaiblissement sur le trajet qui varie entre 2 pour l'espace libre et 6 pour la propagation avec obstruction dans un bâtiment [4], et λ est la longueur d'onde en espace libre définie comme le rapport de la vitesse de la lumière en mètres par seconde à la fréquence porteuse en Hz.
- **Collisions :** Les émetteurs-récepteurs sans fil ne peuvent pas émettre et recevoir simultanément sur le même canal car leurs propres signaux noieraient tous les signaux des autres stations. Pour cette raison, la plupart des émetteurs-récepteurs sans fil sont en semi-duplex. Ils empêchent les opérations d'émission et de réception simultanées tout en permettant de partager le même circuit, ce qui réduit la complexité de l'émetteur-récepteur. Le principal inconvénient de cette approche est la perte de temps occasionnée par les changements de fréquence explicites en réception-émission.
- **Multi trajet :** Les radiofréquences ouvertes typiques (900 MHz et 2,4 GHz) utilisées dans les applications de communication de données sans fil d'aujourd'hui ont un taux de pénétration raisonnable à travers les cubicules de bureau, les cloisons sèches, le bois et d'autres matériaux que l'on trouve dans une maison ou un bureau, mais elles ont tendance à rebondir sur les objets plus gros, les métaux et le béton. Ce rebondissement peut rediriger le signal de données et le renvoyer à l'émetteur d'origine, ce qui provoque un écho également appelé multitrajet. Les systèmes sans fil de première génération étaient facilement confondus avec ce type d'interférence et annulaient la transmission dans son ensemble. Le résultat était un état appelé " radio nul " et empêchait la communication de données.
- **Interférence :** Les réseaux sans fil d-hoc peuvent fonctionner selon deux configurations différentes en fonction de l'utilisation des canaux de fréquence. La première configuration est celle où tous les nœuds qui émettent et reçoivent des signaux radio Les signaux fonctionnent sur le même canal ou sur un canal identique. Dans ce cas, les nœuds voisins qui se trouvent dans la portée de transmission d'un nœud particulier créeront des problèmes à ses transmissions sous la forme d'interférences et plus particulièrement d'interférences sur le même canal (CCI) ou autrement de diaphonie. Le volume du brouillage dépend de la distance

entre la paire de nœuds qui échangent des données et les autres nœuds du même canal qui se trouvent dans leur portée de transmission. Le CCI est principalement rencontré dans les WLAN fonctionnant en mode infrastructure. Le niveau de brouillage est sensiblement lié au nombre de nœuds qui fonctionnent sur la même fréquence et plus précisément aux nœuds les plus élevés.

- **Bruit du milieu :** Les émissions électromagnétiques créées par les gros moteurs, l'équipement lourd, la production et l'utilisation d'énergie élevée, et d'autres émissions industrielles typiques pourrait créer des niveaux de " bruit " extrêmement élevés qui interfèrent avec les premiers équipements sans fil. Dans ces environnements " bruyants ", les émetteurs et les nœuds distants peuvent être incapables de s'" entendre " les uns les autres, ce qui entraîne des pertes de données fréquentes.

3.2.4.2. Contraintes de capacité

Le débit, la quantité de données transférées par unité de temps, et la latence, le temps entre l'émission et la réception, sont généralement des contreparties. Le débit est très dépendant de la qualité des liaisons sans fil pendant les transmissions. Il a été prouvé [111] que les interférences peuvent gravement influencer la fiabilité d'une liaison sans fil et, par conséquent, dégrader les performances du réseau. En outre, il est également important de pouvoir régler le débit et la latence pour permettre au système de s'adapter aux exigences spécifiques. D'autre part, dans les réseaux sans fil ad hoc où les capacités de sauts multiples sont activées à l'aide d'un seul canal, on a étudié [112] que pendant que les données sont relayées de nœud en nœud, il y a une réduction de la capacité et, en même temps, une augmentation notable du délai dans tout le réseau. La même chose a été prouvée [113] également pour les réseaux multicanaux, mais dans ce cas, la dégradation est plus faible que pour les réseaux à canal unique. Un débit plus élevé (dans des paquets plus longs) peut signifier une diminution des frais généraux, mais cela se fait au prix d'une latence plus élevée et de retards plus importants sur l'ensemble du réseau. Pour obtenir de meilleurs résultats industriels dans l'ensemble, le débit de données doit correspondre étroitement aux exigences des applications, car la surestimation ou la " sur-fourniture " du débit a des compromis, notamment une diminution de la portée effective.

3.2.4.3. Contraintes de disponibilité

Les configurations de réseau restent rarement statiques pendant longtemps - en fait, elles ne font que croître. Dans le cas des WLAN, la croissance se produit pour des raisons de couverture (fournir un service radio de base dans une zone donnée) et de capacité (fournir les performances dont les utilisateurs ont réellement besoin pour être productifs). Il convient également de mentionner ici que l'évolution continue de la norme 802.11 peut également dicter la croissance - la capacité peut être ajoutée par le biais de radios compatibles non seulement avec la norme 802.11b, mais également avec les normes 802.11a et 802.11g, plus rapides. Cela signifie qu'une architecture WLAN réussie doit permettre aux utilisateurs de planifier la croissance et le changement sans en sachant exactement quelle croissance et quel changement seront nécessaires. L'extensibilité signifie aussi la flexibilité. Il est essentiel pour une implémentation de classe entreprise d'imposer le moins de limites possible aux utilisateurs et aux gestionnaires de réseau. Les déploiements, primaires et successifs, doivent être réalisés avec un minimum de perturbation de l'infrastructure existante. Les périphériques WLAN peuvent être facilement interconnectés sur une infrastructure Ethernet existante, ce qui minimise le coût d'installation et de déploiement et permet d'utiliser au mieux l'installation physique actuelle. Enfin, l'évolutivité doit permettre de protéger l'investissement et de réduire le coût total de possession. La croissance doit se faire en douceur et sans perturbation, et la couverture et la capacité supplémentaires doivent être directement intégrées aux capacités du réseau actuel.

Le réseau doit également pouvoir garantir à tout moment la disponibilité des ressources en cas d'entrée de nouveaux nœuds/clients dans le réseau, mais aussi en cas de défaillance. Les réseaux sans fil sont sujets à des défaillances et celles-ci devraient être rencontrées immédiatement et sans la moindre perturbation de leur fonctionnement. Les architectures WLAN industrielles doivent être auto-découvertes, auto-configurées et auto-réparées conformément aux politiques définies par l'administrateur réseau. En cas de défaillance d'un nœud, les nœuds voisins doivent être automatiquement reconfigurés pour reprendre la charge, quel que soit leur emplacement. Il convient de noter que dans de tels cas, les architectures d'infrastructure sont difficiles à fournir la flexibilité et la disponibilité requises dès qu'un point d'accès est hors ligne. Chaque nœud qui est hors de portée des points d'accès restants ne pourra pas rejoindre le réseau à nouveau. Un tel comportement n'est pas autorisé dans un environnement industriel. Les données qui circulent dans les nœuds sont très importantes pour le fonctionnement de l'entreprise et toute perte éventuelle de données aurait des conséquences désastreuses pour le réseau et la sécurité générale.

3.2.5. Modèle de canal industriel utilisé

Généralement, le bruit affectant un système de communication sans fil donné est modélisé comme un bruit blanc gaussien additif AWGN. Cependant, dans les environnements industriels difficiles, les systèmes de communication sans fil sont également soumis à un bruit impulsif. Les principales sources de bruit impulsionnel dans les environnements industriels sont les moteurs, les machines lourdes, les systèmes d'allumage, les onduleurs, les régulateurs de tension, les contacts d'interrupteurs électriques, les équipements de soudage, etc. Le bruit dans l'environnement industriel peut alors être modélisé comme la superposition de deux termes (c'est-à-dire AWGN et bruit impulsionnel), exprimés comme :

$$n(t) = w(t) + i(t) \tag{3-7}$$

Avec $t \in \{1,2,\ldots,T\}$ et $w(t)$ sont les processus distribués gaussiens à moyenne zéro avec comme variance σ^2 :

$$\sigma^2 = P_m \frac{1}{K+1} \tag{3-8}$$

$P_m$est la puissance de chaque trajet (3-2), la fonction de densité de probabilité de $w(t)$ et $i(t)$ respectivement est :

$$P_w = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp\left[-\frac{w(t)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{3-9}$$

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp\left[-\frac{i(t)^2}{2A\sigma^2}\right] \tag{3-10}$$

$A \geq 1$ est un coefficient de pondération, si $A = 1$, $i(t)$ est modélisé comme bruit blanc gaussien, sinon si $A > 1$, $i(t)$ est modélisé comme du bruit impulsif.

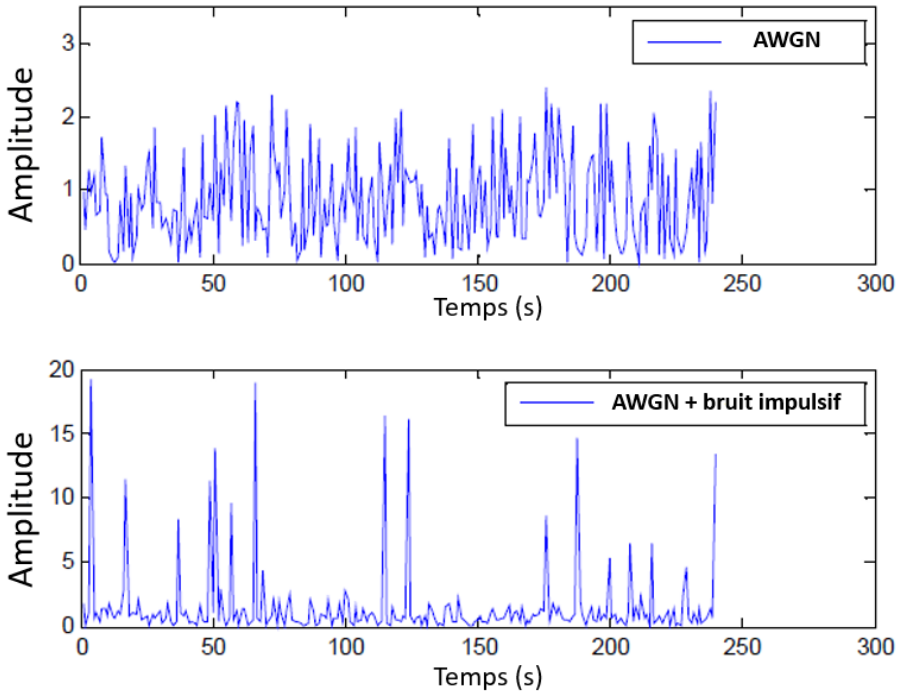


Figure 3.1 La simulation du canal sous bruit AWGN et sous AWGN plus le bruit impulsif

En raison de la propagation sans fil dans le milieu industriel, les signaux reçus sont soumis à un effet d'atténuation et d'évanouissement, l'expression du signal reçu est :

$$y(t) = h(t).s(t) + n(t) \tag{3-11}$$

Où $h(t)$ est la réponse impulsionnelle du canal, $s(t)$ est le signal transmis et $n(t)$ est le bruit industriel additif. À l'intérieur d'une usine, les capteurs sont généralement disposés selon une configuration en ligne de mire. Ces mesures ont montré que l'enveloppe temporelle du signal reçu à un endroit fixe dans un environnement industriel suit une distribution de Rice, et des caractéristiques de Rayleigh.

Les performances de notre émetteur-récepteur d'impulsions sans fil sont impliquées en utilisant la distribution de Rice de la réponse impulsionnelle du canal $h(t)$ pour la configuration LOS, et une distribution de Rayleigh dans le cas contraire.

$$P_h = \frac{he^{-k}}{\sigma^2} exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{h\sqrt{2k}}{\sigma^2}\right); \quad h \geq 0 \tag{3-12}$$

Avec $I_0(x)$ la fonction de Bessel modifiée à l'ordre zéro. K est le paramètre de forme appelé facteur de Rician. Pour$k = 0$, P_h converge vers la distribution de Rayleigh.

3.3. Architecture basée sur la modulation par ondelettes

L'utilisation de la modulation par paquets d'ondelettes dans notre architecture de communication, représente une solution prometteuse, des travaux précédents ont démontré l'efficacité de l'utilisation de cette solution pour une utilisation dans un milieu industriel bruité pour un système de communication multi-utilisateur [114][115]. Le principe de cette architecture est d'utiliser la transformée par paquets d'ondelettes discrètes inverse IDWPT à l'émission implémenté comme une banque de filtres de synthèse, et la transformée en paquet d'ondelettes DWPT à la réception mise en œuvre comme une banque de filtres d'analyse.

La figure 3.2. Montre le schéma de l'architecture de communication global utilisé, elle se constitue des blocs de transmission (IDWPT) et de réception (DWPT), les blocs codage et décodage avec les codes correcteurs d'erreurs (Codage canal ; Décodage canal) qui sera présenté dans le chapitre 4, et le canal industriel de transmission qui sera détaillé dans ce chapitre, les modes d'exploitations et scénarios seront détaillé juste après.

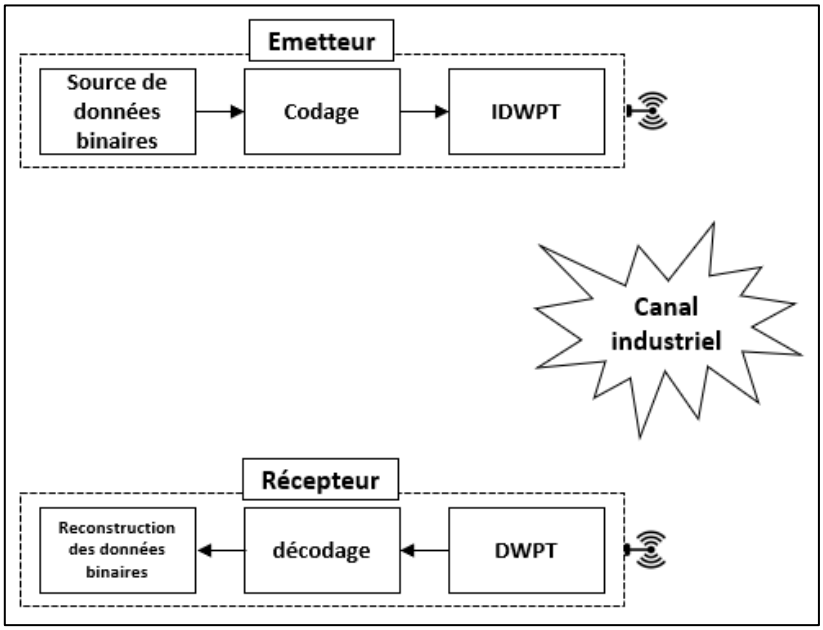


Figure 3.2 Architecture fonctionnel émetteur-récepteur

3.3.1. Technique de modulation à la transmission

Comme indiqué avant, pour un mode multi-utilisateur, il faut noter que tous les émetteurs sont basés sur l'IDPWT, implémenté comme une banque de filtres de synthèse comme illustré dans la figure 3.3.

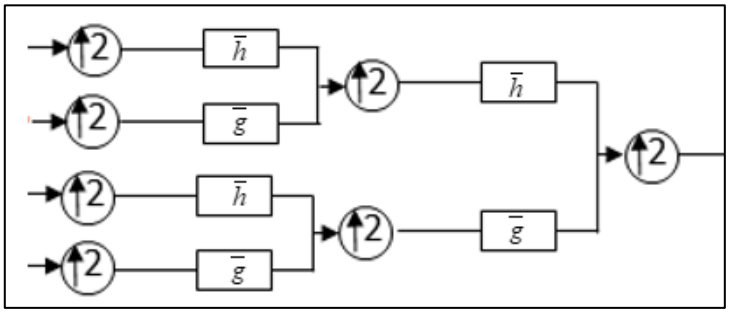


Figure 3.3 Banc de filtres de synthèse à 4 canaux

3.3.2. Technique de démodulation à la réception

Dans la partie réception, les récepteurs sont basés sur le DWPT, mis en œuvre comme une banque de filtres d'analyse, comme l'illustre la figure 3.4.

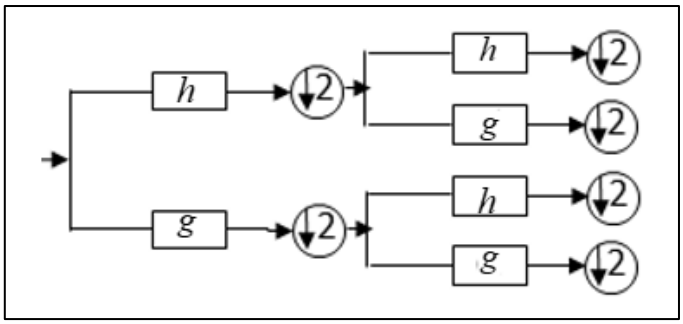


Figure 3.4 Banc de filtres d'analyse à 4 canaux.

3.4. Modes d'exploitations et scénarios

Pour ce travail, deux modes de fonctionnement multi-utilisateurs (ou multicapteurs) seront présentés et testés : le mode Many-To-One (MtO) et One-To-Many (OtM).

3.4.1. Mode Many to One (MtO)

Le mode d'exploitation MtO représente une communication multi-utilisateur à partir de plusieurs émetteurs, vers un seul récepteur, représenté dans la figure 3.5. Chaque utilisateur émetteur est connecté à un module IDWPT dont on active une entrée unique i pour cet utilisateur et, ainsi, identifie le capteur équivalent, et les autres entrées sont forcé à zéro, ainsi, chaque entrée du bloc IDWPT à l'émission, correspond à une seule sortie $j$du bloc DWPT à la réception. Ce mode de communication correspond à une communication esclave-maitre ou les capteurs envoient des informations vers une seule unité de réception.

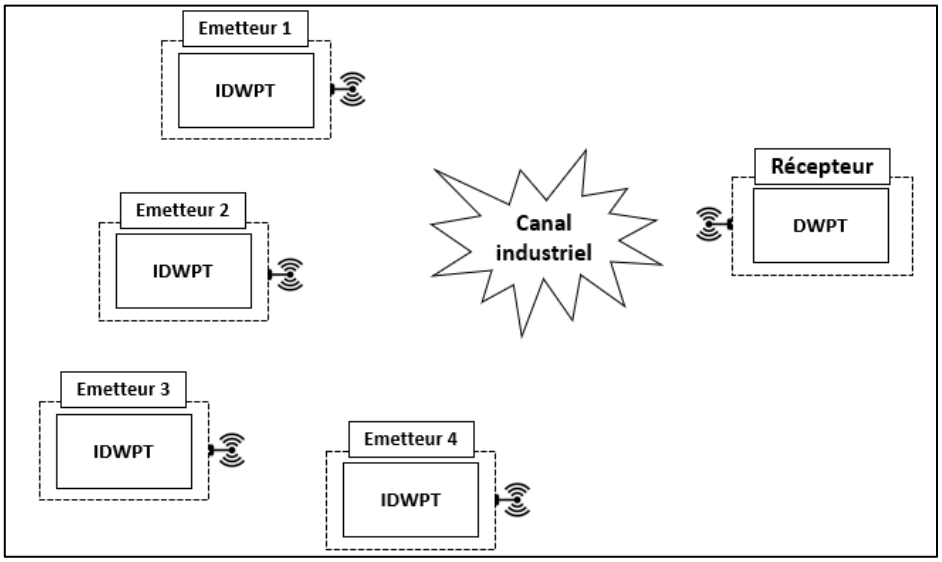


Figure 3.5 Mode de transmission MtO

Les informations provenant de plusieurs utilisateurs, à un faible taux de débit, sont transmises au même moment à un seul récepteur. Dans ce mode de transmission, un utilisateur active une seule est unique entrée i. La figure 3.6 illustre une architecture à 4 entrées, correspondant à 4 utilisateurs potentiels. Chacun utilise une seule entrée unique i différente des autres entrées. Dans cet exemple, deux

utilisateurs activent les entrées 2 et 4 et toutes les autres sont désactivées, avec différentes formes d'ondes. Les entrées non activées seront mises à zéro.

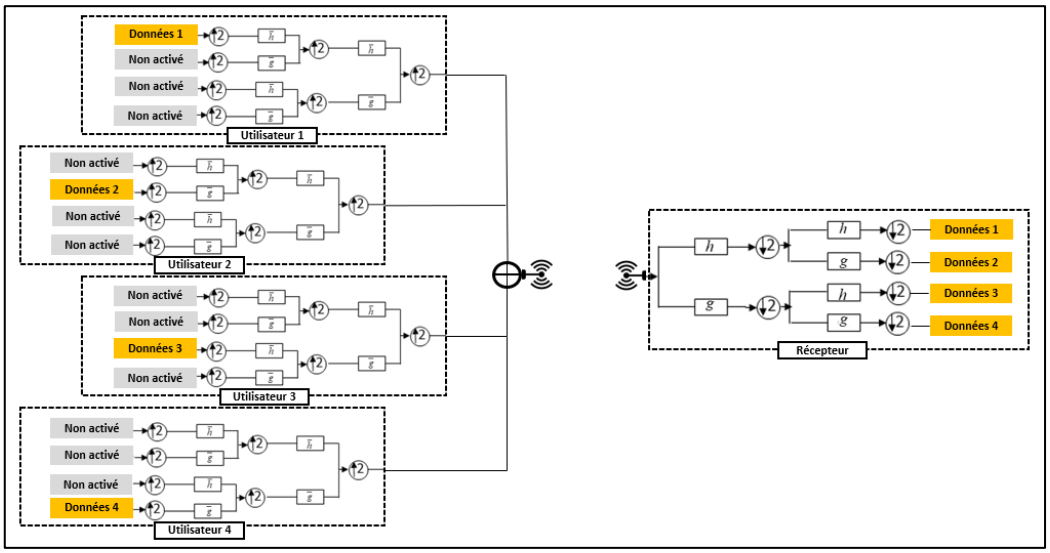


Figure 3.6 Architecture de transmission MtO

3.4.2. La forme des signaux en émission et réception

Le mode d'exploitation MtO, comme indiqué dans la partie précédente, repose sur une transmission multiutilisateur vers un seul récepteur. Après le passage de l'information initiale par l'IDWPT, elle sera transmise dans le canal industriel, et lors de la réception, elle sera décodée par la DWPT, et enfin l'information reçue sera comparée à celle transmise pour faire une prise de décision. Pour un système multiutilisateur, les données binaires à transmettre sont modulées avec la même méthode de modulation impulsionnelle, et chaque utilisateur est identifié par un signal unique. Une illustration des signaux provenant de 4 utilisateurs différents est présentée dans la figure 3.7, avec une architecture à 16 utilisateurs.

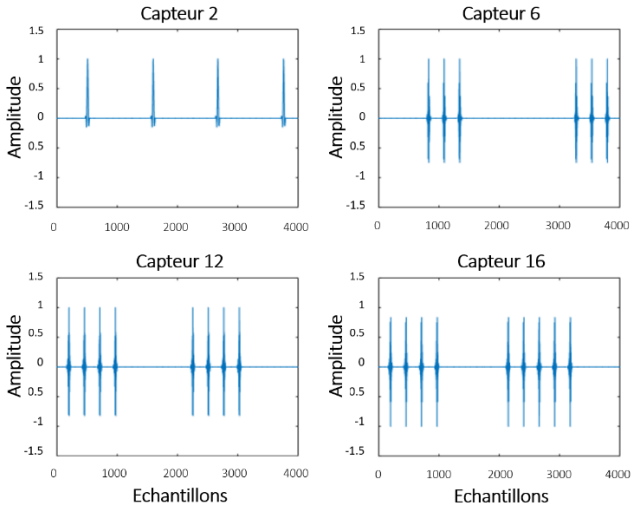


Figure 3.7 Signaux émis en MtO

Les formes des signaux à la transmission sont différentes du fait que les données binaires transmises par chaque utilisateur sont différentes. La propagation des signaux après transmission fait que chaque

signal emprunt des trajets différents et qui subiront une atténuation et un retard, en plus d'un bruit additif. Tous les signaux transmis sont additionnés après réception, pour ne former qu'un seul signal mélangé contenant toutes les informations des différents utilisateurs. Au niveau de la réception, le signal passera par la DWPT, ensuite un seuillage est utilisé sur l'ensemble des signaux reçus en se basant sur le niveau d'énergie de transmission. À la fin du processus, un signal binaire qui correspondra à celui transmis sera fourni à la suite d'une prise de décision. Une illustration en trois niveaux dans la figure 2.8 présente l'état du signal transmis par l'utilisateur au niveau 1, l'état à la réception après DWPT au niveau 2, et le signal après la prise de décision au dernier niveau.

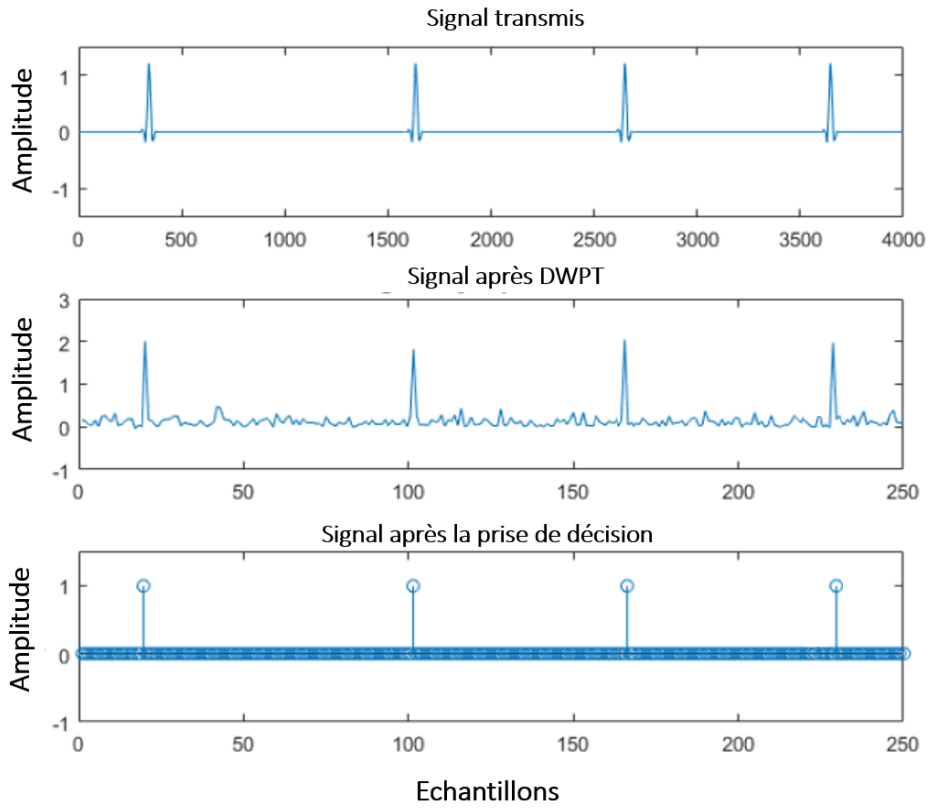


Figure 3.8 Signal reçu après DWPT de l'utilisateur 2

3.4.3. Simulation des performances du mode MtO

Dans cette première partie d'évaluation des performances, les résultats de simulation de notre architecture pour un canal AWGN et un canal industriel bruyant, sous le mode d'exploitation OtM sont présenté. Toutes les simulations ont été réalisées sous MATLAB. Les différents paramètres permettant de définir le contexte de l'étude sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Paramètres de simulation

Paramètre	**Description**
Mode	**MtO**
Mobilité	0-1 Km/h
Dimensions	20 à 100 m
Hauteur	Maximum 20m
Distance entre capteurs	Maximum 100m
R	50
Utilisateurs	8,16 et 32
Bande de fréquence	Multifréquence
Ondelette	Symlet

Le modèle de système est basé sur une architecture multi-utilisateur IDWPT/DWPT pour 8,16 et 32 capteurs, dans un environnement industriel et AWGN. Tous les émetteurs sont basés sur l'IDPWT, mis en œuvre comme une synthèse de banques de filtres, et les récepteurs sont basés sur le DWPT, mis en œuvre comme des banques de filtres d'analyse [114]. Selon notre précédente étude sur le choix optimal de l'ondelette [115], nous avons choisi l'ondelette "Symlet" qui a démontré le plus faible taux d'erreur binaire pour l'architecture IDWPT/DWPT, sur un canal AWGN.

a. 8 utilisateurs :

- Awgn

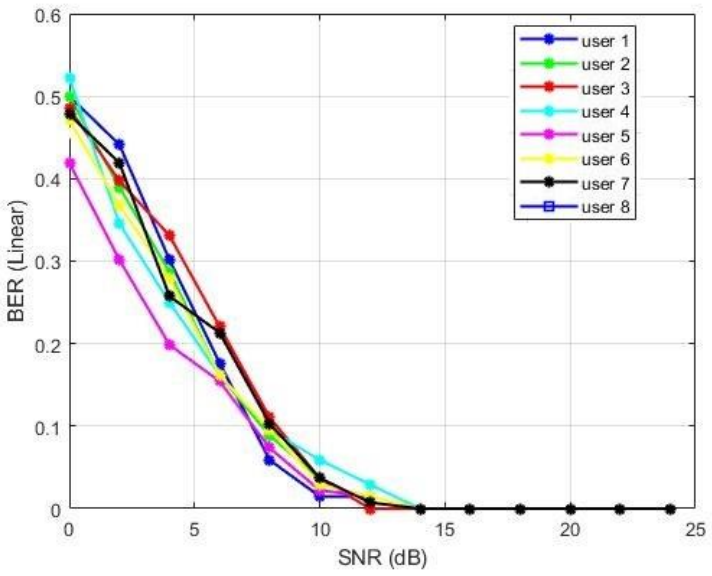


Figure 3.9 BER pour un canal AWGN en MtO 8 utilisateurs

- Canal industriel :

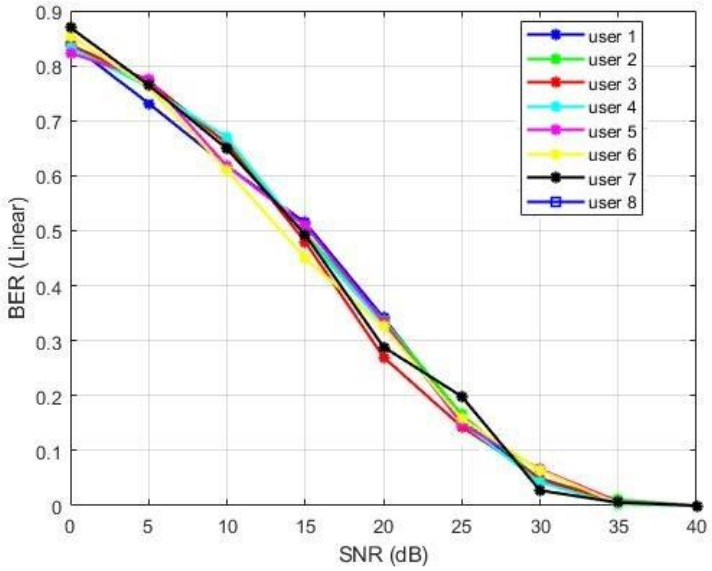


Figure 3.10 BER pour un canal industriel en MtO 8 utilisateurs

b. 16 utilisateurs :

- Awgn

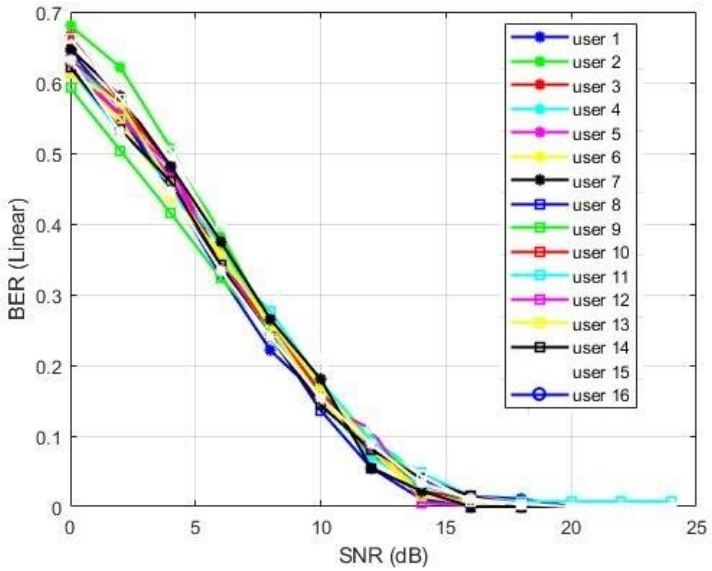


Figure 3.11 BER pour un canal AWGN en MtO 16 utilisateurs

- Canal industriel

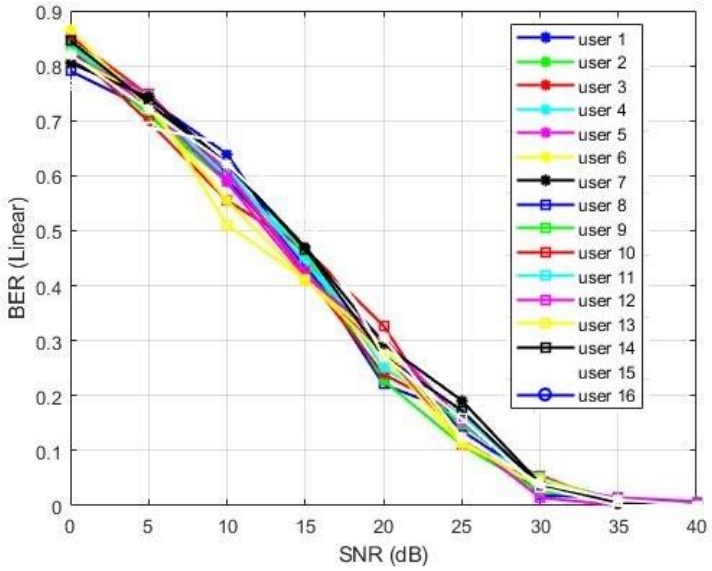


Figure 3.12 BER pour un canal industriel en MtO 16 utilisateurs

c. 32 utilisateurs :

- Awgn

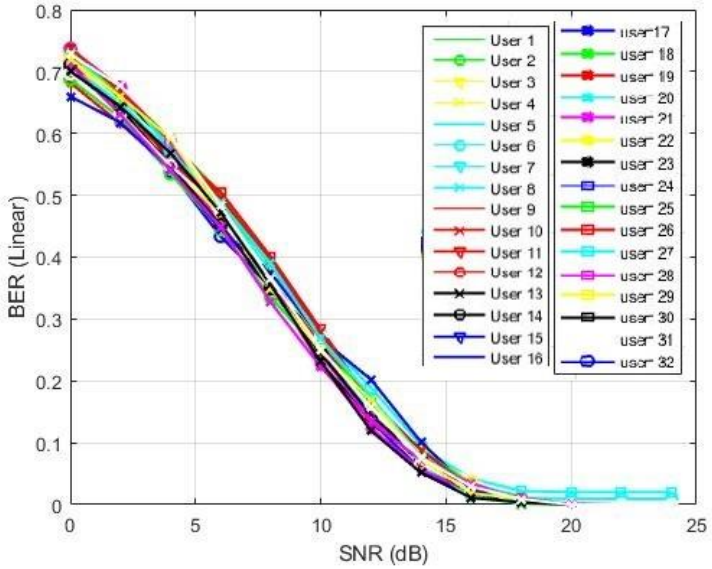


Figure 3.13 BER pour un canal AWGN en MtO 32 utilisateurs

- Canal industriel

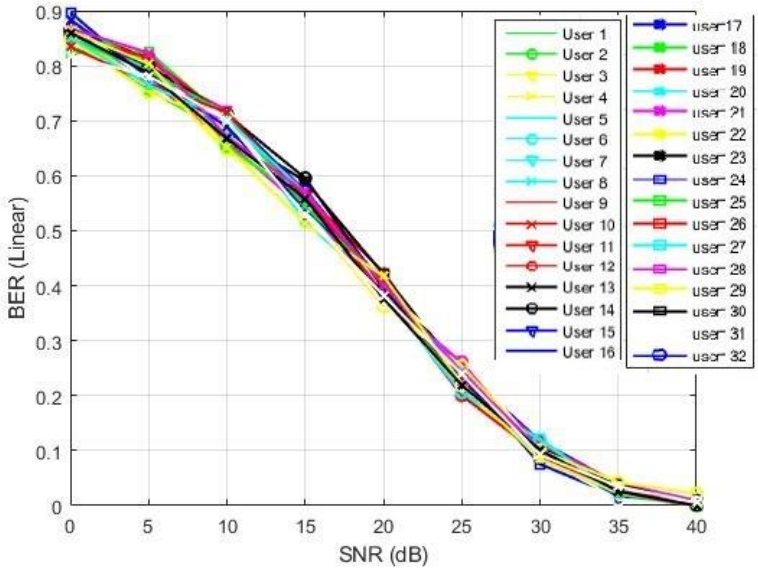


Figure 3.14 BER pour un canal industriel en MtO 32 utilisateurs

Les résultats dans le canal AWGN montrent que les signaux reçus sont tous détectés correctement comme illustré sur les figures sous les sous-sections (AWGN). La qualité du signal reçu est meilleure pour un SNR à partir de 15dB pour l'ensemble des capteurs. À partir de 18dB, tous les signaux sont détectés sans erreurs. En ce qui concerne le bruit industriel, le taux d'erreur binaire est présenté dans les figures dans les sous-sections (bruits industriels). Les résultats montrent une convergence plus lente avec une décroissance des performances, mais l'information est totalement récupérable à partir d'un SNR qui dépasse 36dB. L'écart des taux d'erreur est très considérable dépendamment du canal de propagation. Le bruit industriel risque de noyer totalement l'information, et donc une possibilité de perte totale, si les effets du canal ne sont pas pris correctement en compte.

3.4.4. Mode One to Many (OtM)

Ce mode de communication correspond à une communication maître-esclave, ou l'émetteur avec un module IDWPT à n entrées, peut transmettre les informations à plusieurs récepteurs DWPT avec n sorties. L'information envoyée par l'entrée i est récupérée à la sortie $j$avec $i = j$. Ce mode permet d'avoir une communication descendante, en envoyant les mêmes informations aux capteurs au niveau inférieur. Bien que le débit de données transmis puisse être faible, la réception d'informations provenant de plusieurs capteurs crée une diversité spatiale qui permet de récupérer les données envoyées par au moins un des capteurs comme le montre la figure 3.15.

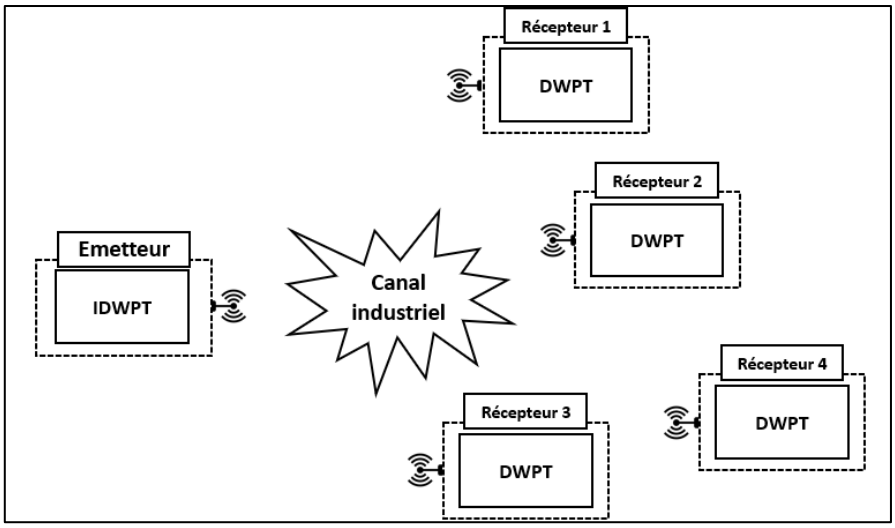


Figure 3.15 Mode de transmission OtM

La figure 3.16 illustre une transmission provenant d'un seul émetteur vers quatre récepteurs. Les données envoyées sont détectées et restaurées dans les sorties de chaque récepteur DWPT. Avant d'élaborer sur les performances de notre architecture avec les deux modes MtO et OtM, un modèle de canal industriel simulé a été présenté ci-dessous.

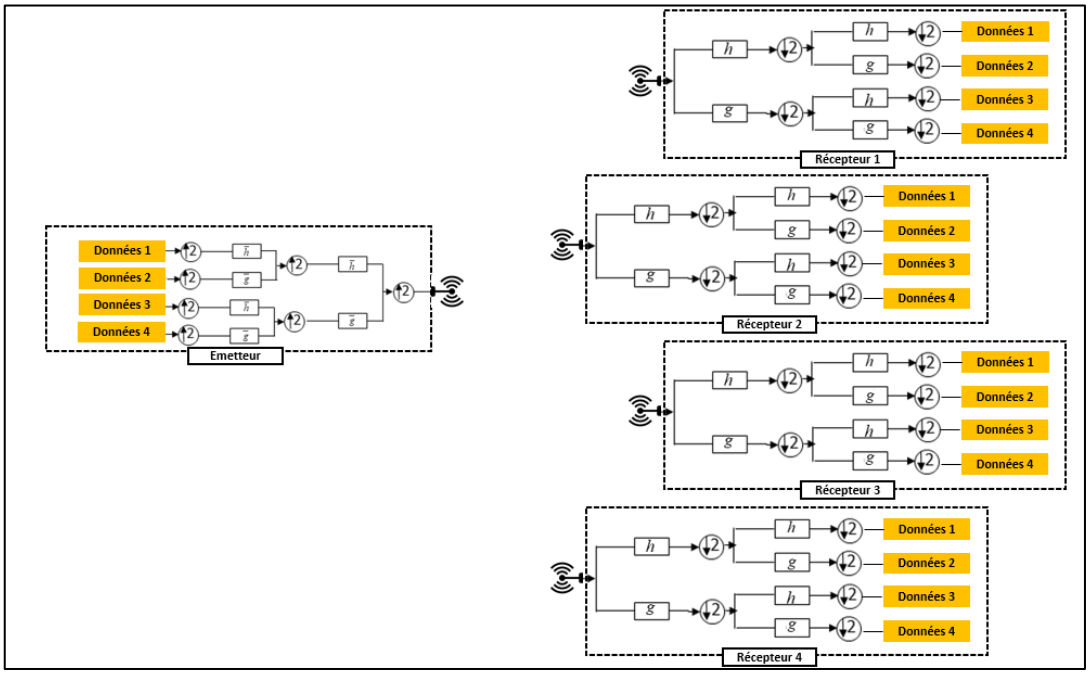


Figure 3.16 Architecture de transmission OtM

3.4.5. Simulation des performances du mode OtM

Cette section présente les résultats de simulation de notre architecture pour un canal AWGN et un canal industriel bruyant, sous le mode d'exploitation MtO. Toutes les simulations ont été réalisées sous MATLAB. Les différents paramètres permettant de définir le contexte de l'étude sont présentés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 Paramètres de simulation

Paramètre	Description
Mode	**OtM**
Mobilité	0-1 Km/h
Dimensions	20 à 100 m
Hauteur	Maximum 20m
Distance entre capteurs	Maximum 100m
R	50
Récepteurs	8,16 et 32
Bande de fréquence	Multifréquence
Ondelette	Symlet

a. 8 utilisateurs :

- Awgn

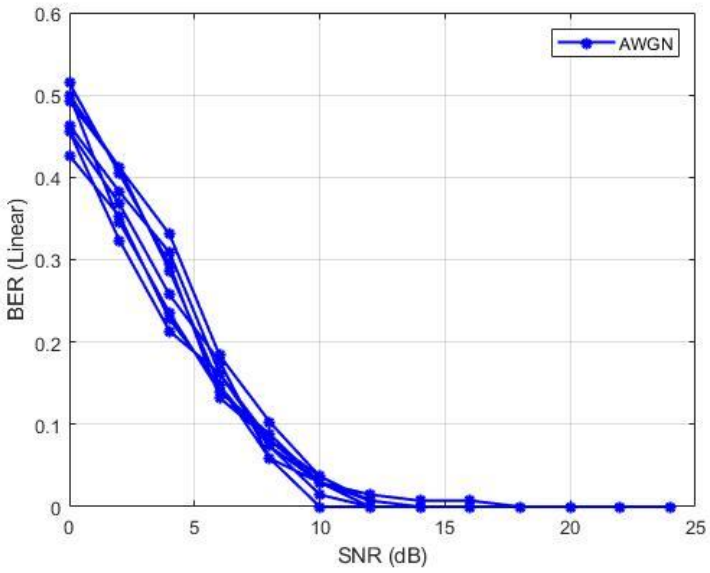


Figure 3.17 BER pour un canal AWGN en OtM 8 utilisateurs

- Canal industriel

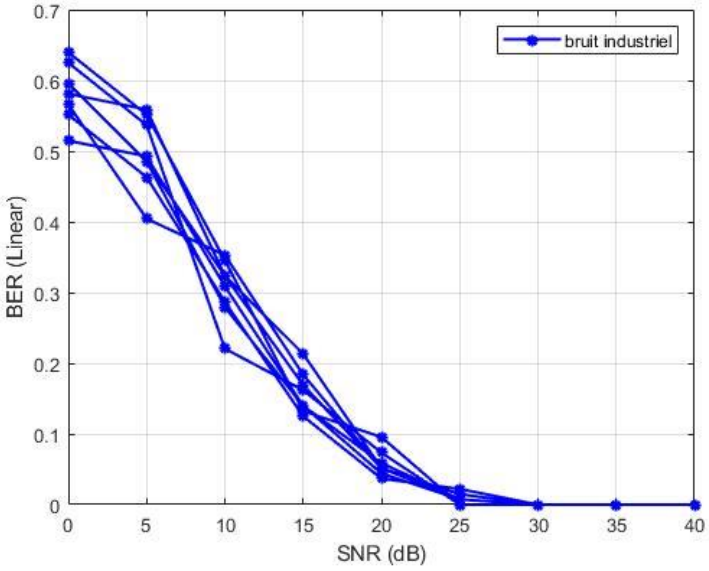


Figure 3.18 BER pour un canal industriel en OtM 8 utilisateurs

b. 16 utilisateurs :

- Awgn

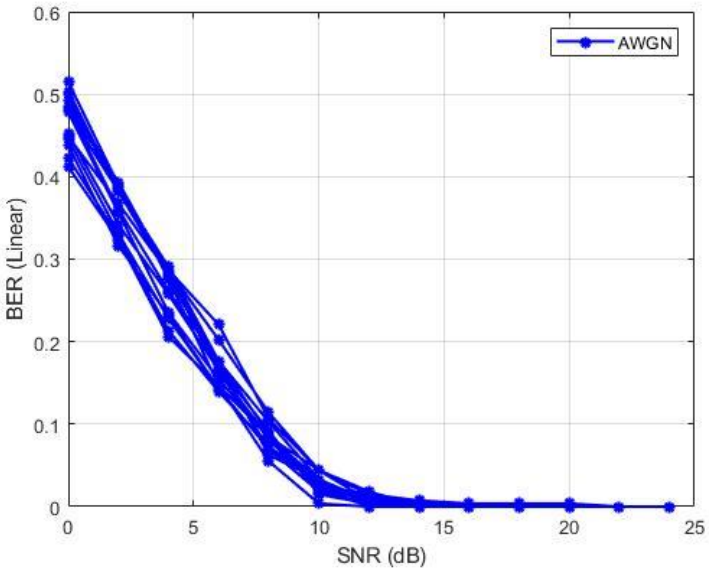


Figure 3.19 BER pour un canal AWGN en OtM 16 utilisateurs

- Canal industriel

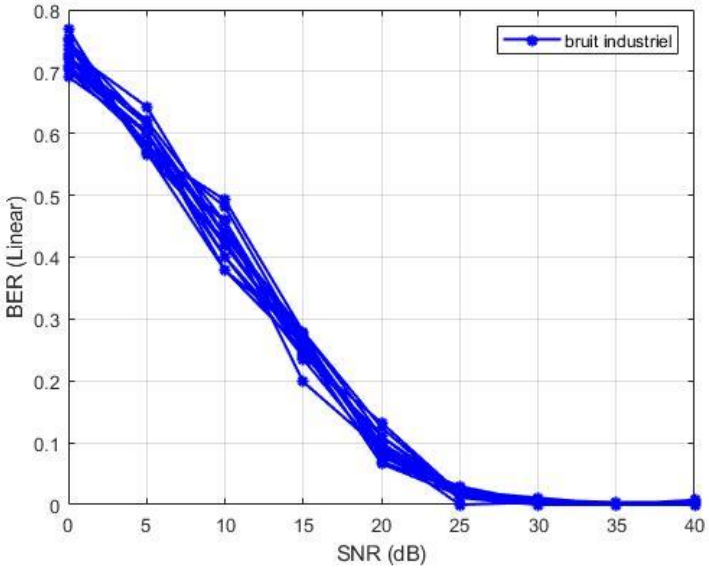


Figure 3.20 BER pour un canal industriel en OtM 16 utilisateurs

c. 32 utilisateurs :

- Awgn

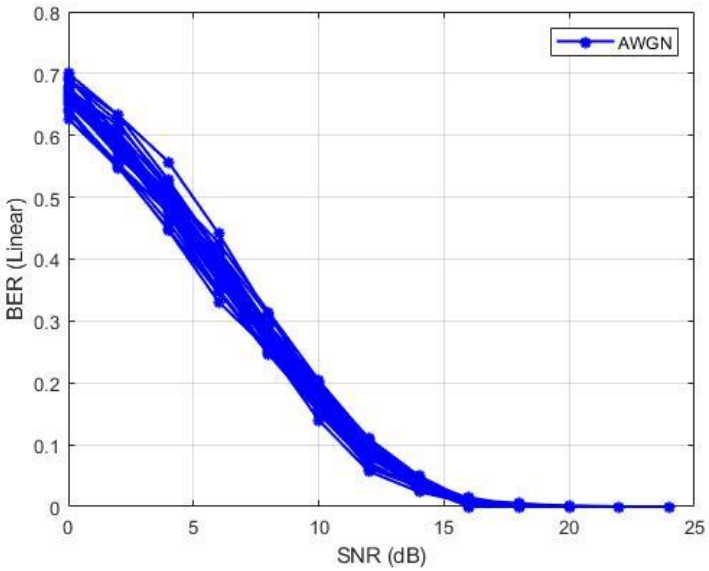


Figure 3.21 BER pour un canal AWGN en OtM 32 utilisateurs

- Canal industriel

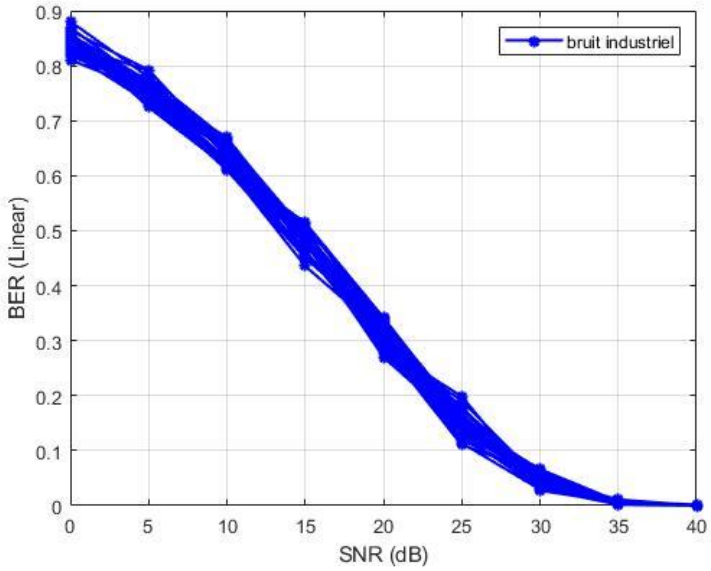


Figure 3.22 BER pour un canal industriel en OtM 32 utilisateurs

Pour une transmission sur un canal AWGN à un SNR de 17dB, les signaux reçus sur les différents capteurs sont illustrés sur les figures dans les sous-sections (AWGN). Le signal est reçu par tous les capteurs, et toutes les sorties de chaque bloc DWPT contiennent les données. Il est certain que le canal qui relie l'utilisateur à chaque récepteur sera différent des autres, car le bruit ainsi que les évanouissements qui les caractérisent ne sont pas les mêmes. D'où la différence, surtout des amplitudes entre les signaux reçus sur l'ensemble des capteurs.

En considérant maintenant l'effet du bruit industriel, notre architecture permet la détection de l'information entière à partir d'un SNR de 34dB tel qu'illustré sur les figures dans les sous-sections (bruit industriel). L'écart entre les taux d'erreur est très important et dépend du canal de propagation. Avec la présence du bruit industriel, l'information peut être perdue complètement, si les effets du canal ne sont pas pris correctement en compte.

3.5. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre, une évaluation des performances de notre architecture impulsionnelle multiutilisateurs utilisant la modulation par paquets d'ondelettes discrètes pour être utilisée dans les milieux industriels bruités. Notre architecture est capable d'assurer une grande flexibilité en fonction des utilisateurs dans les deux modes d'utilisation. Notre architecture est capable d'assurer une résistance aux deux types de bruit : AWGN et Bruit industriel. Nous avons présenté les deux modes d'exploitations MtO et OtM qui permettent d'avoir des communications ascendantes et descendantes suivant le modèle OSI dans une industrie. Puis nous avons présenté notre modèle de canal industriel pour pouvoir nous approcher des conditions réelles. Et on a fini par une série de simulations de notre architecture fonctionnelle pour montrer ses performances sous plusieurs utilisations et modes d'exploitation, et sa capacité d'adaptation à l'environnement industriel fortement bruité pour pouvoir

être intégré dans les IWSNs. Par la suite, on a validé nos hypothèses par les résultats obtenus à la fin du chapitre en évaluant les taux d'erreurs sur bits en fonction des différentes SNR.

Après l'étape de validation de l'architecture, nous allons pouvoir passer à la partie de l'amélioration des performances de notre architecture fonctionnelle, dans notre cas, l'utilisation des codes correcteurs d'erreurs, en étudiant plusieurs modes de combinaisons pour pouvoir améliorer la robustesse en prenant en considération les limites et contraintes des IWSNs.

•

Chapitre 4

Simulations en milieux industriel et amélioration des performances par les codes correcteurs d'erreurs

4.1. Introduction 95

4.2. Exploitation de l'architecture OtM 96

4.2.1. Performances de transmission dans un canal AWGN 97

4.2.2. Performances de transmission dans le canal industriel 99

4.3. Exploitation de l'architecture en MtO 101

4.3.1. Performances de transmission dans un canal AWGN 101

4.3.2. Performances de transmission dans le canal industriel 103

4.4. Combinaison des Reed Solomon et codes convolutifs 105

4.4.1. Technique de combinaison des codes correcteurs d'erreurs 105

4.4.2. Amélioration des performances sous OtM 106

4.4.3. Amélioration des performances sous MtO 107

4.5. Amélioration des performances par les Reed Solomon raccourcis 109

4.5.1. Reed Solomon Raccourci 109

4.5.2. Analyse comparative des codes Reed Solomon 109

4.5.3. Performances de communication sous OtM 110

4.6. Conclusion 112

4.1. Introduction

Tout au long du processus de conception de cette architecture de communication sans fil, les composants développés ont été testés par le biais de simulations logicielles afin de vérifier leur bon fonctionnement. Les résultats dans cette partie seront une comparaison du BER (taux d'erreur sur les bits) et du SNR (rapport signal/bruit), qui permettra de connaître le comportement de deux codes sous

différents SNR. L'évaluation nous aidera à analyser les performances des deux techniques de codage en combinaison avec la transformé en ondelettes.

Dans ce chapitre, nous avons étudié la robustesse de notre architecture de communication en exploitant les deux modes MtO et OtM dans le canal industriel proposé dans le chapitre précédent. Nous avons étudié dans cette partie l'utilisation des codes correcteurs d'erreurs pour améliorer la qualité de transmission de notre système, nous avons testé dans un premier temps les performances de notre architecture en utilisant les codes convolutifs, puis nous avons utilisé les codes Reed Solomon, avec les mêmes paramètres de simulation du chapitre précédent, ensuite nous avons étudié la combinaison de ces deux codes, et enfin nous avons proposé une amélioration des RS en utilisant les RS raccourcis. Nous avons utilisé MATLAB pour modéliser notre architecture de communication, et pour exécuter toutes les simulations. Le modèle du canal industriel utilisé dans notre étude des performances de notre architecture multiutilisateur est issu des simulations en se basant sur les caractéristiques provenant des modèles déterministes que nous avons utilisés dans le chapitre précédent.

4.2. Exploitation de l'architecture OtM

L'objectif premier de notre architecture, est d'y intégrer des codes correcteurs d'erreurs de manière à améliorer ses performances tout en respectant les contraintes et limitations des systèmes sans fil, la figure 4.1 montre le diagramme de notre architecture de communication, deux codes correcteurs d'erreurs ont été testés dans le codage/décodage de canal, comme il a été discuté dans le chapitre 2 en utilisant le codage Reed Solomon RS(31,17), avec une trame de 17 bits de l'information à transmettre, et une trame de 31 bits après codage, et les codes convolutifs CC avec un taux de 1/2, l'émetteur est basé sur la IDWPT, et le récepteur sur la DWPT, pour 8,16 et 32 utilisateurs, dans un environnement industriel et AWGN.



Figure 4.1 Architecture de communication avec codage

Les résultats de la simulation sont présentés dans cette section, en utilisant l'architecture présentée précédemment, sous le mode OtM en utilisant les deux entrées 2 et 8 choisies aléatoirement, les autres entrés sont forcés à zéro. L'ondelette utilisée dans la simulation est l'ondelette "Symlet", les cadres de données pour chaque utilisateur étaient binaires. Les trames de données ont été modulées selon la même modulation d'impulsion, nous avons comparé dans ce travail deux ECC, Reed Solomon RS(31,17), avec 31 symboles de mot de code et 17 symboles de message basés sur la longueur des données transmises, et des codes convolutifs avec un taux de ½

Tableau 4.1 Paramètres de simulation

Paramètre	Description
Mode	**OtM**
Mobilité	0-1 Km/h
Dimensions	20 à 100 m
Hauteur	Maximum 20m
Distance entre capteurs	Maximum 100m
R	50
Récepteurs	8,16 et 32
Bande de fréquence	Multifréquence
Ondelette	Symlet
Codage/Décodage	CC et RS

4.2.1.Performances de transmission dans un canal AWGN

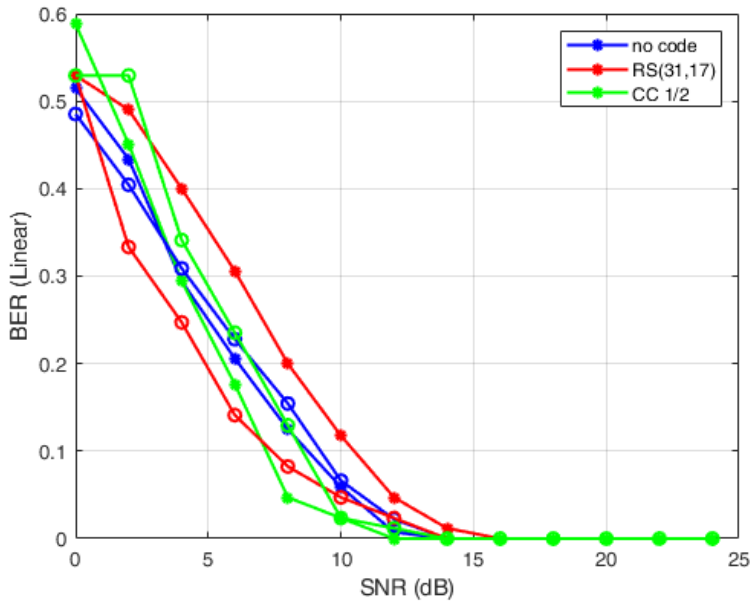


Figure 4.2 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 8 récepteurs en mode OtM

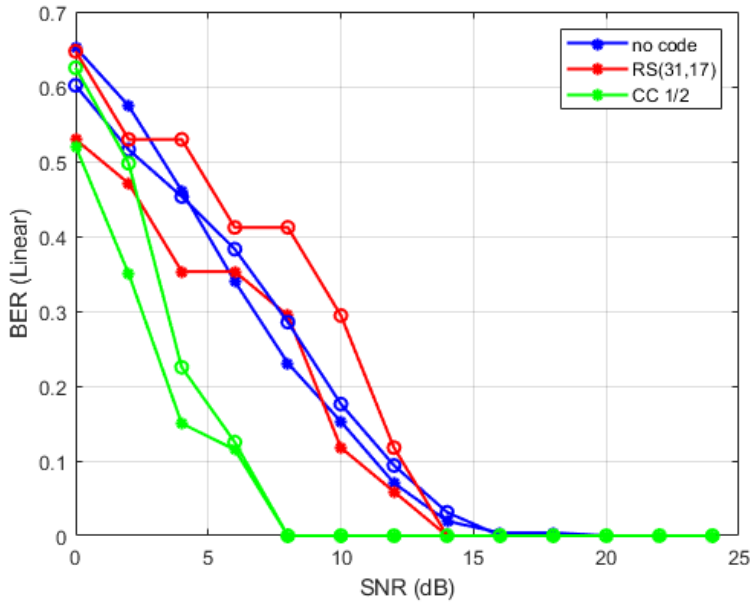


Figure 4.3 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 16 récepteurs en mode OtM

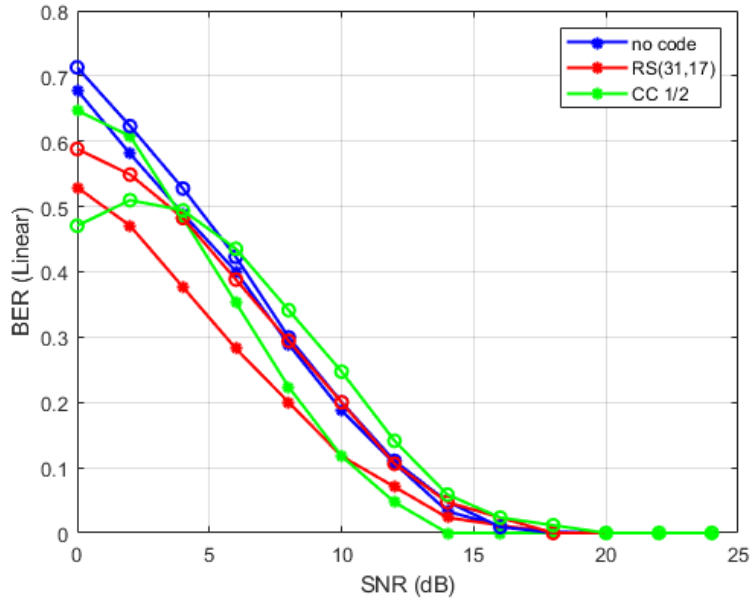


Figure 4.4 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 32 récepteurs en mode OtM

On remarque sur les figures (4.2) (4.3) et (4.4) après les simulations dans un canal AWGN, que le gain varie en fonction du nombre d'utilisateurs, pour une transmission sans codage avec 8 et 16 utilisateurs, les erreurs sont éliminées à partir de 16dB, et à 18dB pour 32 utilisateurs, pour un codage convolutif à 8 utilisateurs elles sont éliminées à 14dB, à 7dB pour 16 utilisateurs et 20dB pour 32, et en fin avec un codage Reed Solomon, avec 8 utilisateurs les erreurs sont éliminées à partir de 16dB, à 14dB avec 16, et à 18dB avec 32 utilisateurs.

4.2.2.Performances de transmission dans le canal industriel

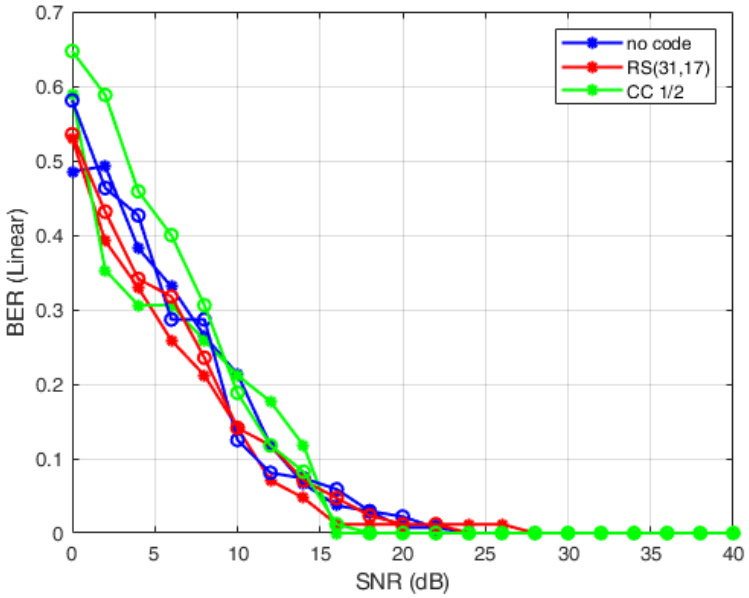


Figure 4.5 BER dans un canal industriel à R=50 sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 8 récepteurs en mode OtM

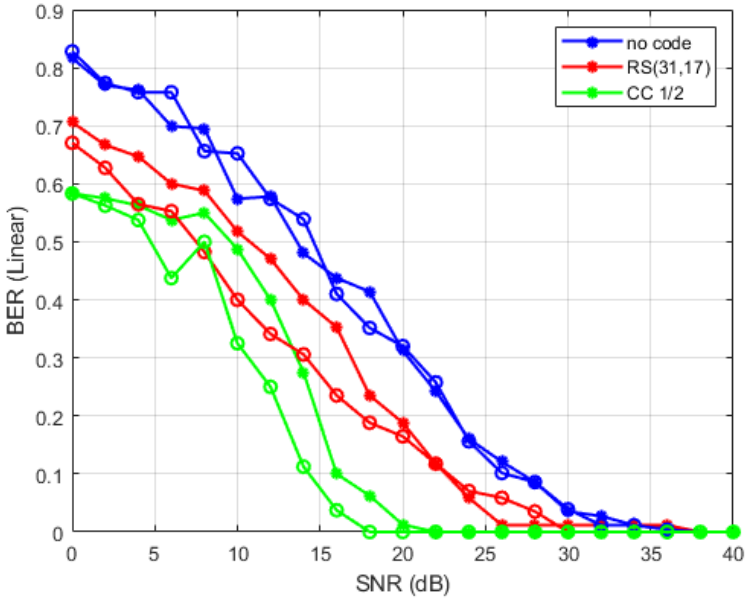


Figure 4.6 BER dans un canal industriel à R=50 sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 16 récepteurs en mode OtM

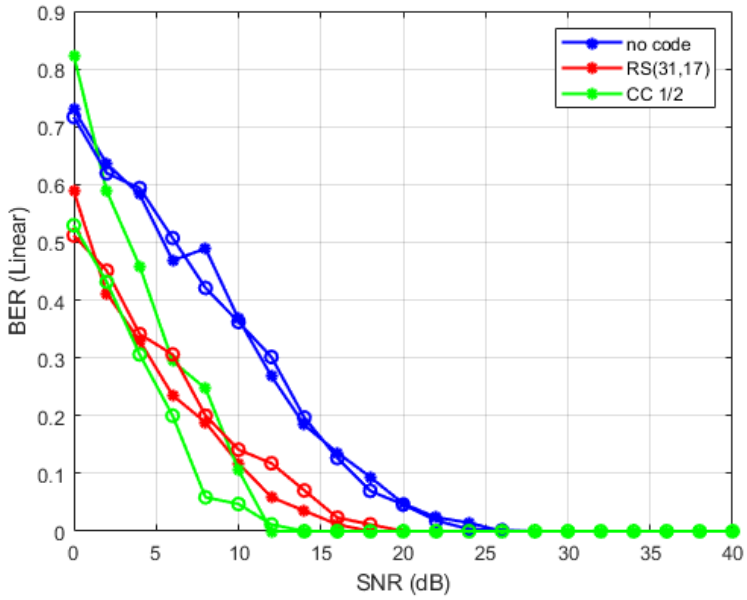


Figure 4.7 BER dans un canal industriel à R=50 sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 32 récepteurs en mode OtM

De la même manière, les résultats obtenus cette fois dans le mode MtO, montré sur les figures (4.5) (4.6) et (4.7) illustrant les transmissions dans le canal industriel, montrent encore que le gain varie en fonction du nombre d'utilisateurs, pour une transmission sans codage les erreurs sont éliminées avec 8 utilisateurs à partir de 24dB, à 37dB pour 16 et à 26dB pour 32 utilisateurs, pour un codage convolutif à 8 utilisateurs elles sont éliminées à 16dB, à 21dB pour 16 utilisateurs et 14dB pour 32, et en fin avec un codage Reed Solomon, avec 8 utilisateurs les erreurs sont éliminées à partir de 27dB, à 30dB avec 16, et à 20dB avec 32 utilisateurs.

Le tableau 4.2 résume les résultats obtenus après toutes les simulations, et on remarque que dans le canal AWGN, par rapport à la transmission sans code pour 8 récepteurs on a un gain de 1dB avec le CC et 2dB avec le RS, de 6.5dB avec le CC alors qu'avec le RS on perd 0.5dB avec 16 récepteurs, et en fin 2dB de gain sur les deux codages avec 32 récepteurs, maintenant du côté du canal industriel une perte de 2dB pour 8 récepteurs, mais quand on passe à 16 et 32 récepteurs les gains sont meilleurs avec 11dB en moyenne pour le CC et 4dB pour le RS. On peut conclure que l'utilisation des codes correcteurs d'erreur dans notre architecture dans le mode OtM est plus efficace dans le canal industriel surtout dans le cas où on utilise 16 récepteurs.

Tableau 4.2 SNR en dB à un BER linéaire fixe de 0,1 pour un canal AWGN et le canal industriel sous le mode OtM avec 8,16 et 32 récepteurs

Récepteurs	AWGN			Canal industriel		
	Sans code	CC 1/2	RS(31,17)	Sans code	CC 1/2	RS(31,17)
8	9	8	7	11	13	13
16	12.5	6	13	26	14	22.5
32	13	11	11	17	7	13

On peut conclure que l'utilisation des codes correcteurs d'erreurs dans notre architecture dans le mode OtM est plus efficace dans le canal industriel surtout dans le cas où on utilise 16 récepteurs.

4.3. Exploitation de l'architecture en MtO

Les résultats de la simulation sont présentés dans cette section, en utilisant la même architecture présentée précédemment, sous le mode MtO cette fois, avec différentes entrées actives, pour 8 utilisateurs on active les entrées (1,3,5 et 7), pour 16 utilisateurs on active les entrées (1,6,12 et 16) et en fin pour 32 utilisateurs on active les entrées (1,12,22 et 30), les autres entrés sont forcés à zéro, la transmission a été faite sous deux canaux, AWGN et canal industriel. L'ondelette utilisée dans la simulation est l'ondelette "Symlet", les cadres de données pour chaque utilisateur étaient binaires, avec une longueur de 17 bits, générés de manière aléatoire, nous avons comparé dans cette partie encore les deux ECC, Reed Solomon RS(31,17), avec 31 symboles de mot de code et 17 symboles de message basés sur la longueur des données transmises, et des codes convolutifs avec un taux de ½. Nous comparons maintenant les différences entre deux systèmes de codage et discutons de leurs avantages et inconvénients par rapport à une transmission sans codage.

Tableau 4.3 Paramètres de simulation

Paramètre	**Description**
Mode	**MtO**
Mobilité	0-1 Km/h
Dimensions	20 à 100 m
Hauteur	Maximum 20m
Distance entre capteurs	Maximum 100m
R	50
Utilisateurs	8,16 et 32
Bande de fréquence	Multifréquence
Ondelette	Symlet
Codage/Décodage	CC et RS

4.3.1. Performances de transmission dans un canal AWGN

D'après les simulations en mode MtO sur un canal AWGN, on remarque sur les figures (4.8) (4.9) et (4.10), que le gain est différent suivant la variation du nombre d'utilisateurs et codages, pour une transmission sans codage avec 8 et 16 utilisateurs, les erreurs sont éliminées à partir de 22dB, et à 20dB pour 32 utilisateurs, pour un codage convolutif à 8 utilisateurs elles sont éliminées à 20dB, pour 16 et 32 utilisateurs une partie des erreurs sont éliminées complètement à partir de 20db et 22dB respectivement, et en fin avec un codage Reed Solomon, avec 8 utilisateurs les erreurs sont éliminées à partir de 21dB, à 22dB avec 16, et à 20dB avec 32 utilisateurs.

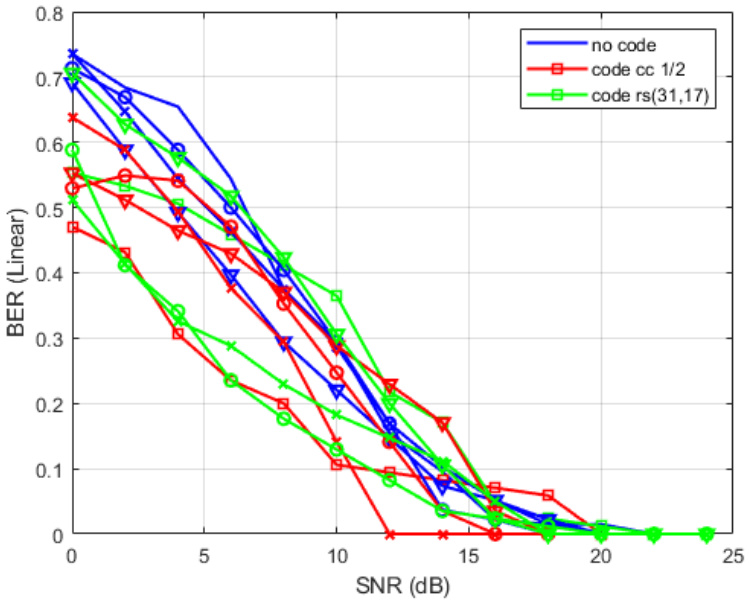


Figure 4.8 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 8 utilisateurs en mode MtO

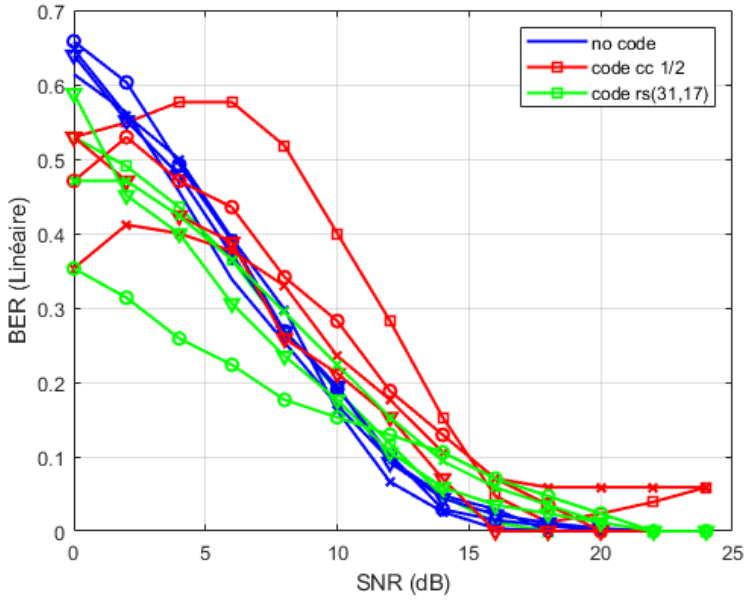


Figure 4.9 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 16 utilisateurs en mode MtO

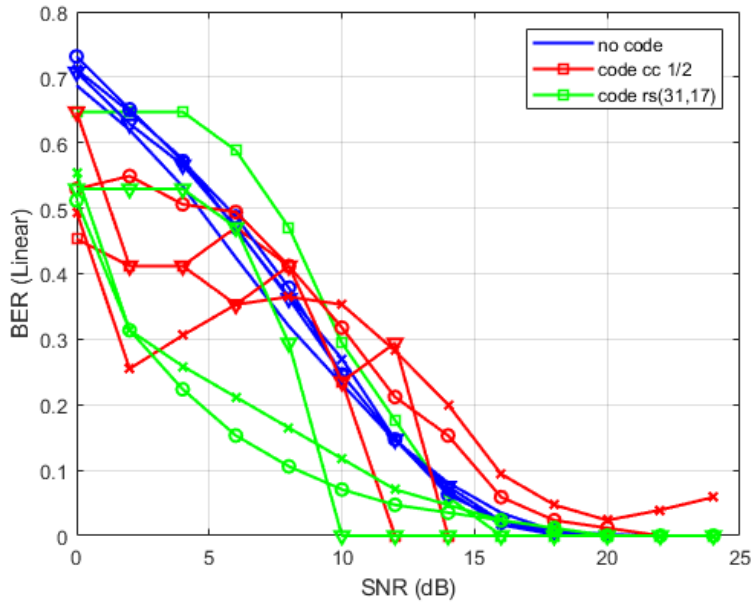


Figure 4.10 BER dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 32 utilisateurs en mode MtO

4.3.2. Performances de transmission dans le canal industriel

Et pour finir, les simulations en mode MtO sur le canal industriel, on peut remarquer de la même manière sur les figures (4.11) (4.12) et (4.13), une différence de gain suivant la variation du nombre d'utilisateurs et codages, on commence par une transmission sans codage avec 8 utilisateurs, les erreurs sont éliminées à partir de 30dB, en ce qui concerne 16 utilisateurs, ils sont éliminés à 35dB et en fin à 39dB pour 32 utilisateurs, du côté du codage convolutif à 8 utilisateurs elles sont éliminées à 26dB, pour 16 utilisateurs ils sont éliminés complètement à partir de 35db et avec 32 utilisateurs ils sont éliminés partiellement à 36dB, et en fin avec un codage Reed Solomon, avec 8 utilisateurs les erreurs sont éliminées à partir de 32dB, à 40dB avec 16, et à 41dB avec 32 utilisateurs.

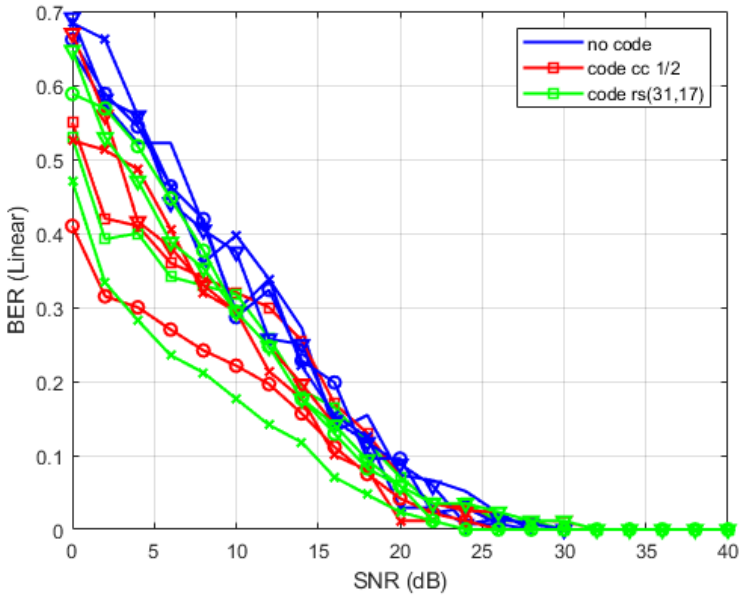


Figure 4.11 BER dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 8 utilisateurs en mode MtO

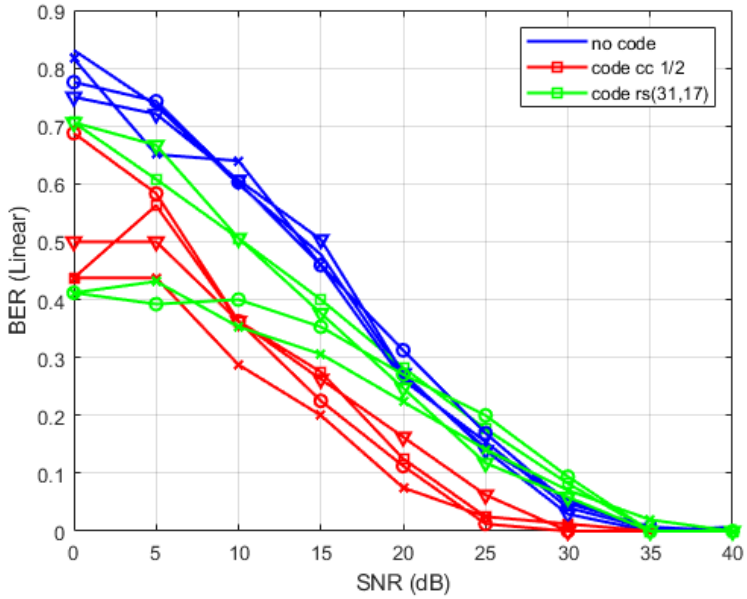


Figure 4.12 BER dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 16 utilisateurs en mode MtO

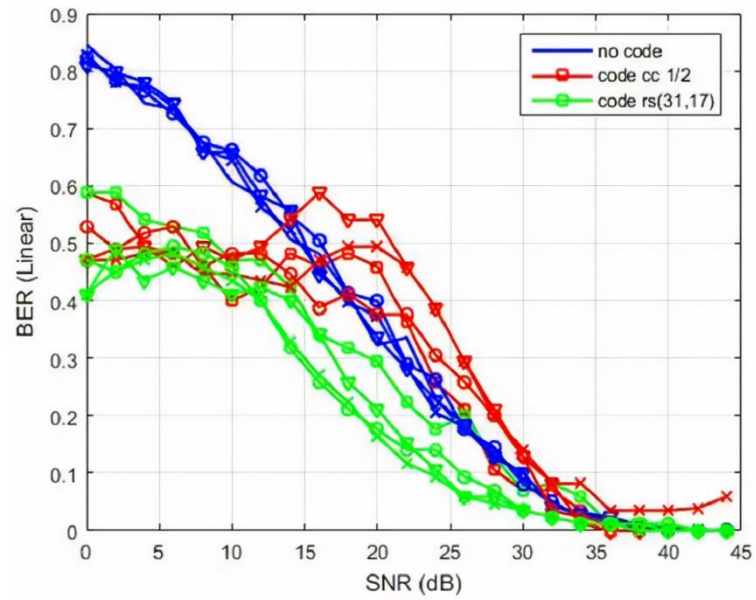


Figure 4.13 BER dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif et codage Reed Solomon pour 32 utilisateurs en mode MtO

Pour résumer les simulations des performances dans le mode MtO, on remarque d'après le tableau 4.4 après toutes les simulations dans le canal AWGN, par rapport à la transmission sans code on a un gain de 3dB avec le CC et 1dB avec le RS avec 8 utilisateurs, une perte de 2dB avec le CC et de 1dB avec le RS avec 16 utilisateurs, et enfin une perte de 1dB de gain avec le CC mais du côté du RS on a

un gain de 6dB avec 32 utilisateurs, pour ce qui est des résultats dans le canal industriel, on a un gain de 3.5dB avec le CC et de 3dB avec le RS en 8 utilisateurs, un meilleur résultat avec 16 utilisateurs avec 7.5dB de gain en CC, alors qu'avec le RS on a 2dB de perte, et pour finir pour les résultats de 32 utilisateurs, un gain de 3dB en moyenne pour les deux codages.

Tableau 4.4 SNR en dB à un BER linéaire fixe de 0,1 pour un canal AWGN et le canal industriel sous le mode MtO avec 8,16 et 32 utilisateurs

Utilisateurs	AWGN			Canal industriel		
	Sans code	CC 1/2	RS(31,17)	Sans code	CC 1/2	RS(31,17)
8	13	10	12	20	16.5	17
16	13	15	14	28	20.5	30
32	14	15	8	30	27	26

Encore une fois, les résultats sont positifs en utilisant les codes correcteurs d'erreurs dans notre architecture dans le mode MtO, avec une efficacité dans tout type de canal cette fois-ci au contraire du mode OtM.

4.4. Combinaison des Reed Solomon et codes convolutifs

La technique de combinaison proposée est très efficace pour corriger la combinaison des erreurs en salves et des erreurs aléatoires, qui sont typiquement le type de bruit industriel, en sachant que les codes Reed Solomon sont bien adaptés à la correction des erreurs en salves, alors que les codes convolutifs sont très efficaces contre les erreurs à effacements aléatoires. En observant les deux techniques de codage, on peut constater qu'ils partagent de nombreuses étapes de calcul communes ou similaires. Sur la base de cette similitude intéressante, un bloc de codage et un de décodage combinant les deux techniques sont proposés, capables de corriger ces deux types d'erreurs divergentes.

La figure 4.14 montre le diagramme de notre système de communication, une combinaison des deux CCE testés dans le codage/décodage de canal discuté dans la partie précédente en utilisant le Reed Solomon RS(31,17) et les codes convolutif CC avec un taux de 1/2, l'émetteur-récepteur est basé sur IDWPT, et le récepteur sur DWPT, les deux modes MtO et OtM ont été exploitées dans les simulations, le premier mode OtM où un l'émetteur envoie des données activant une entrée vers deux récepteurs, le second mode MtO où deux émetteurs envoient des données activant deux utilisateurs différents et les reçoivent dans un récepteur, le tout sous deux canaux, AWGN et le canal industriel.

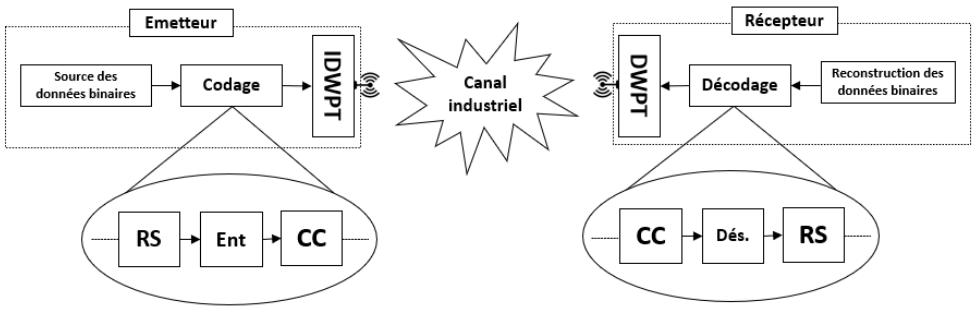


Figure 4.14 Architecture de communication avec combinaison de codage

4.4.1. Technique de combinaison des codes correcteurs d'erreurs

Pour combiner les deux codes proposés, nous avons opté pour la méthode d'entrelacement, les performances des systèmes CCE utilisés dans des environnements industriels difficiles en présence de rafales d'erreurs sont améliorées en faisant passer les données transmises par un entrelaceur. Pour

diffuser les erreurs par salves sur une plus grande plage, le processus d'entrelacement est inséré entre les deux codes. C'est une méthodologie qui rend un système de communication plus efficace, plus rapide et plus fiable en organisant les données de manière non contiguë. C'est une technique régulièrement utilisée dans les systèmes de communication pour surmonter les bruits de canal corrélés tels que les erreurs d'évanouissement ou de salves. Le code de l'entrelaceur réorganise les données d'entrée de telle sorte que les données adjacentes soient espacées les unes des autres, comme le montre la figure 4.15. Du côté du récepteur, les données entrelacées sont organisées par le désentrelaceur pour revenir à la séquence d'origine. En conséquence, le bruit corrélé dans le canal de transmission s'avère statistiquement autonome au niveau du récepteur et permet ainsi de meilleures performances en matière de correction d'erreurs.

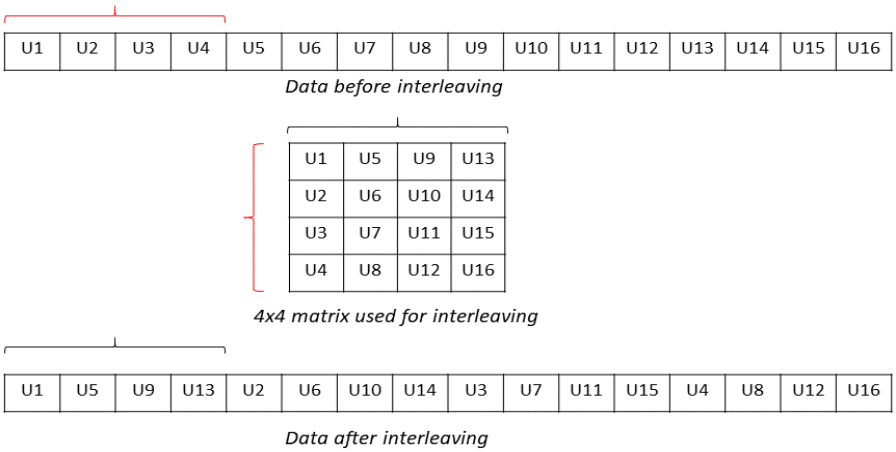


Figure 4.15 Exemple d'entrelacement matriciel

Pour résumer, la trame de code initiale à envoyer, passe par un codage Reed Solomon, puis le code obtenu sera mélanger avec l'entrelaceur avec une méthode d'entrelacement matriciel, puis elle passera par le codage CC à la fin, pour pouvoir être transmise dans le canal après passage dans le bloc IDWPT, de l'autre côté après réception et démodulation par le bloc DWPT, le signal obtenu est dégradé par le bruit du canal de transmission d'une manière aléatoire, le décodage CC étant très efficace avec ce type d'erreur permet d'éliminer un maximum d'erreurs, après cela la trame sera désentrelacé pour récupérer la trame initiale, et là le décodage RS est de son côté très efficace contre les erreurs en salves, pourra corriger plus d'erreurs.

4.4.2. Amélioration des performances sous OtM

Les simulations sont illustrées sur les figures (4.16) et (4.17) montrant les performances de la combinaison de RS et CC en mode OtM avec un émetteur et deux récepteurs dans le canal industriel et un canal AWGN.

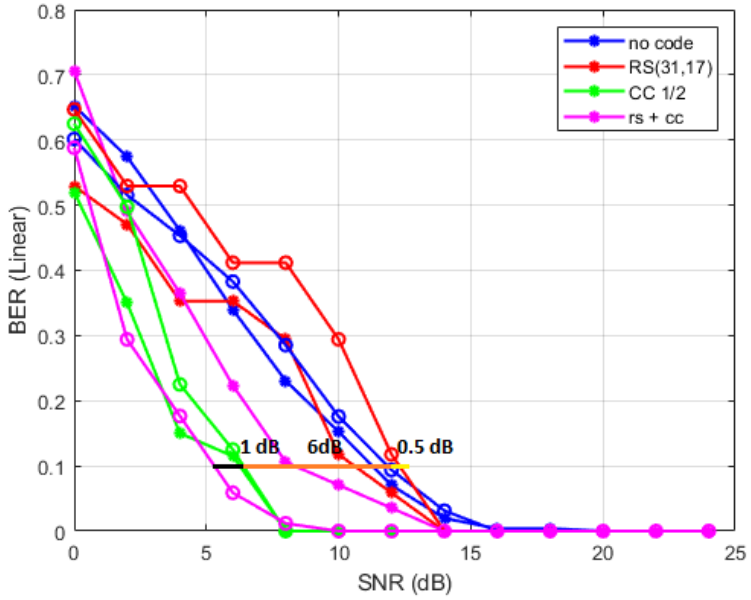


Figure 4.16 Comparaison des performances SNR pour un BER de 0.1 dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif, codage Reed Solomon et combinaison des codages en mode OtM

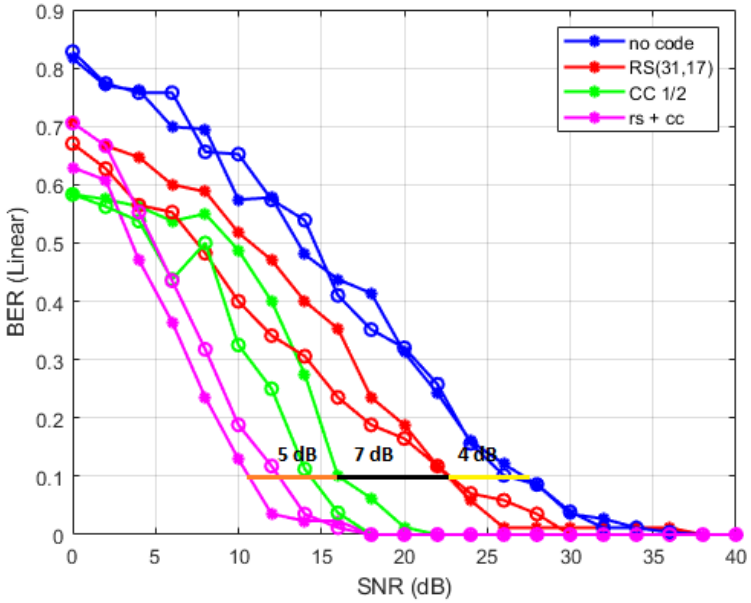


Figure 4.17 Comparaison des performances SNR pour un BER de 0.1 dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif, codage Reed Solomon et combinaison des codages en mode OtM

4.4.3. Amélioration des performances sous MtO

En ce qui concerne les figures (4.18) et (4.19), ils fournissent les performances des mêmes codes avec le mode MtO avec quatre émetteurs et un récepteur

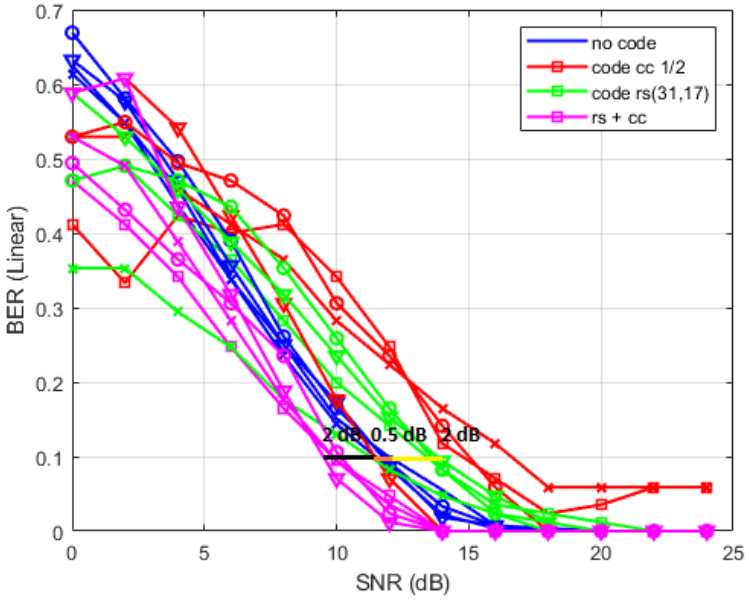


Figure 4.18 Comparaison des performances SNR pour un BER de 0.1 dans un canal AWGN sans codage, avec codage convolutif, codage Reed Solomon et combinaison des codages en mode MtO

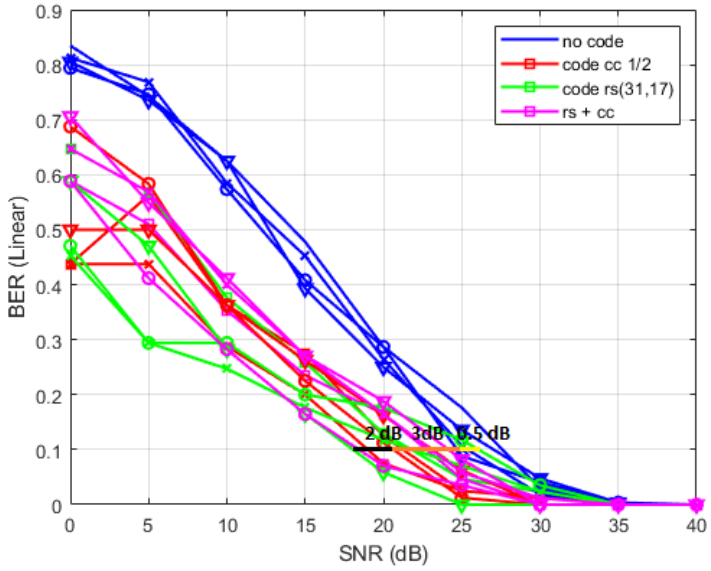


Figure 4.19 Comparaison des performances SNR pour un BER de 0.1 dans le canal industriel sans codage, avec codage convolutif, codage Reed Solomon et combinaison des codages en mode MtO

D'après les simulations, on peut déduire qu'ils permettent d'avoir des résultats positifs, avec une élimination totale des erreurs dans un canal AWGN à partir de 14dB, du côté du canal industriel, les erreurs sont éliminées à partir de 17dB pour le OtM, alors qu'elles sont éliminées à 30dB pour le MtO.

Tableau 4.5 SNR en dB à un BER linéaire fixe de 0,1 pour un canal AWGN et le canal industriel sous les modes MtO et OtM

Modes	OtM				MtO			
	Sans codage	CC 1/2	RS(31,17)	RS+CC	Sans codage	CC 1/2	RS(31,17)	RS+CC

AWGN	13 dB	6 dB	11 dB	5 dB	12 dB	14 dB	14 dB	9.5 dB
Canal industriel	26 dB	16 dB	23 dB	11 dB	25 dB	21 dB	26 dB	18.5 dB

On peut voir dans le tableau 4.5 que la combinaison des codes RS/CC donne de meilleurs résultats que les codes RS et CC seuls, avec un gain de 1dB avec le bruit AWGN, et 5dB sous le canal industriel par rapport aux codes convolutifs, alors que dans le cas du mode MtO, les codes combinés étaient meilleurs avec un gain de 2,5dB sous AWGN et 2dB sous le bruit industriel.

4.5. Amélioration des performances par les Reed Solomon raccourcis

Nous avons divisé les simulations en deux parties, d'abord nous comparons les performances de trois configurations différentes de RS, pour choisir celle qui convient à notre architecture, puis la seconde partie présente les résultats de la combinaison des codes RS et CC dans un canal AWGN et dans le canal industriel, avec 16 utilisateurs sous le mode OtM.

4.5.1. Reed Solomon Raccourci

Dans de nombreuses implémentations des codes RS(n,k), il n'est pas efficace de diviser les données du message en paquets de longueurs k pour le codage. Un moyen courant d'éviter ce problème consiste à réduire la longueur totale du bloc de code lors du stockage ou de la transmission des données, plutôt que d'utiliser la longueur maximale théorique du bloc de code. Pour ce faire, le message à coder est "rembourré" avec des symboles de valeur 0 avant le calcul du vecteur de code, puis les 0 ajoutés sont ignorés pendant la transmission. Lorsqu'un bloc de code est reçu, les 0 supplémentaires sont ajoutés dans le message reçu, ce qui permet de décoder le bloc de code. Bien que le remplissage puisse être effectué à n'importe quel endroit du bloc de code, à condition que l'expéditeur et le destinataire l'appliquent de manière égale, il est plus courant et plus facile à calculer de remplir le bloc de code au début ou à la fin du message (préfixe ou postfixe avec des symboles de valeur 0). Cela crée ce que l'on appelle un code abrégé.

4.5.2. Analyse comparative des codes Reed Solomon

Dans nos simulations, nous avons comparé tout d'abord les performances de RS(255,223) raccourci avec une trame initiale de 168 bits, à laquelle on ajoute 55 zéros pour obtenir une trame de 223 bits, qui deviendra après une trame de 255 bits après codage, ensuite nous avons utilisé un codage RS(255,223) conventionnel avec une trame initiale de 223 qui devient une trame de 255 bits après codage, et enfin nous avons utilisé la même trame du premier codage avec une trame de 168 bits qui devient après codage une trame de 200 bits RS(200,168). Le tableau 4.6 résume le taux de codage et la capacité de correction des erreurs des codes utilisés.

Tableau 4.6 Taux de codage et capacité de correction des erreurs

	Taux de codage	**Capacité de correction des erreurs**
RS(255,223)	0.87	16/255 = 0.062
SRS(255,223)	0.87	16/255 = 0.062
RS(200,168)	0.84	16/200 = 0.08

Les trois techniques de codage partagent le même taux de codage de 0.87, mais cela change quant à la capacité de correction des erreurs, avec un taux plus faible pour le RS(200,168) par rapport au Reed Solomon conventionnel et raccourci.

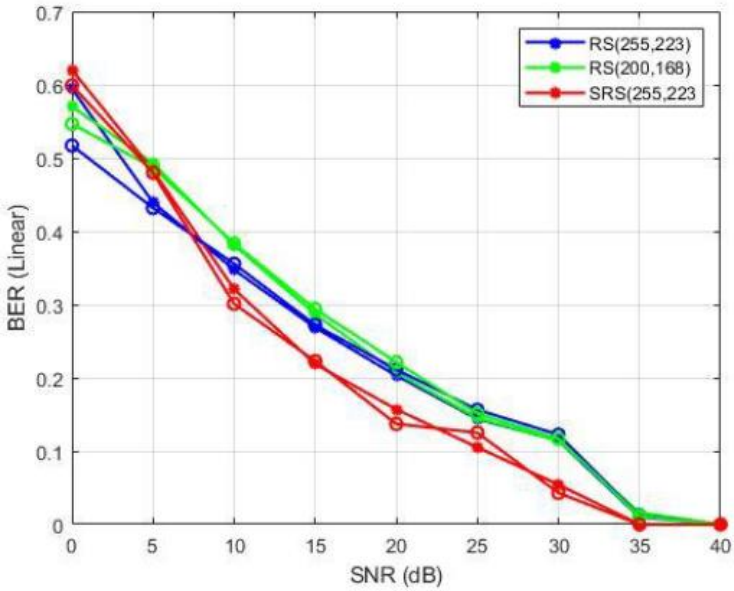


Figure 4.20 Comparaison des performances des différentes combinaison de RS dans un canal AWGN

On peut clairement voir dans la figure 4.20 que la version raccourcie de RS donne de meilleures performances que la RS classique et la même taille raccourcie de RS avec un gain de 6dB avec un BER de 0.1, cela revient au fait que lorsque l'on raccourcit les Reed Solomon, on a la même capacité de correction pour une taille de données plus courte.

4.5.3. Performances de communication sous OtM

Dans cette partie nous avons combiné deux codages, et ils ont été testés sous un canal AWGN et le canal industriel, en utilisant le Reed Solomon raccourci SRS(255,223) et les codes convolutifs CC avec un taux de 1/2, l'émetteur est basé sur IDWPT, et le récepteur sur DWPT, un mode a été exploité dans les simulations, le OtM avec 16 utilisateurs. Les trames de données ont été modulées selon la même modulation d'impulsion et chaque utilisateur a été identifié par un signal unique avec un seul émetteur et deux récepteurs.

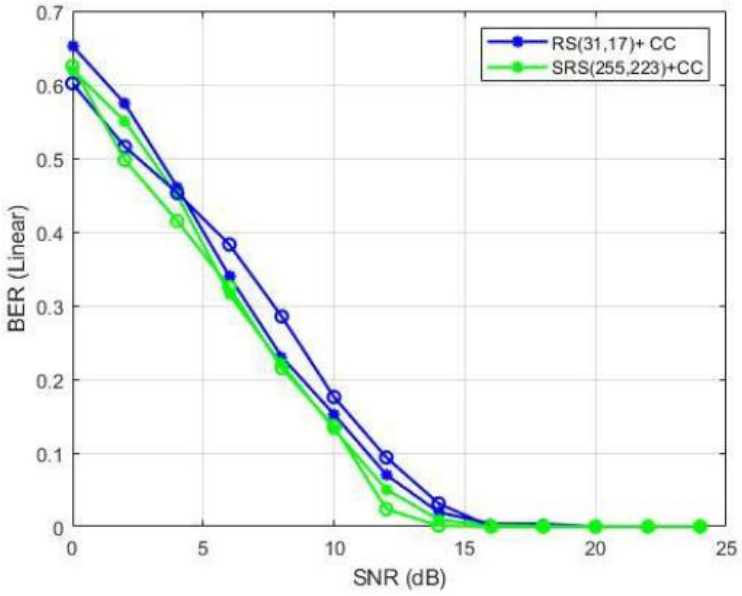


Figure 4.21 BER dans un canal AWGN avec la combinaison des CC, RS et RS raccourcis pour le mode OtM

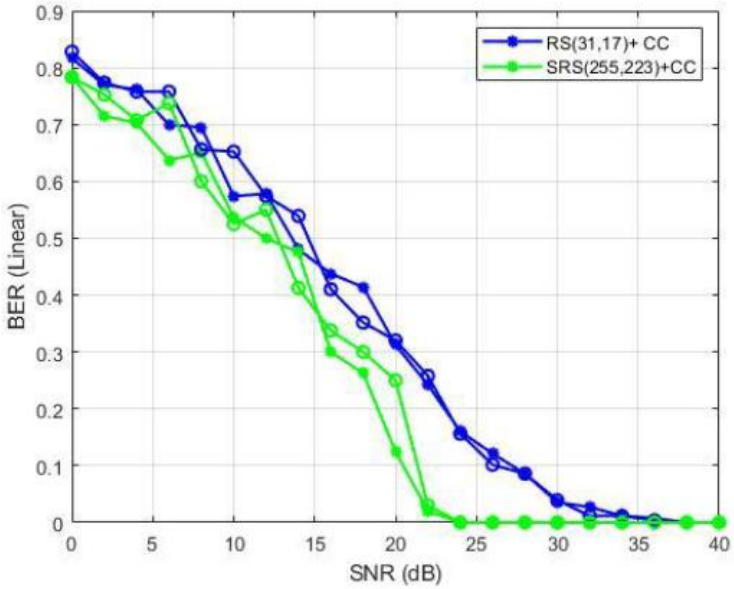


Figure 4.22 BER dans le canal industriel avec la combinaison des CC, RS et RS raccourcis pour le mode OtM

D'après les figures (4.21) et (4.22), les erreurs sont éliminées totalement à partir de 15dB dans le canal AWGN, alors qu'elles sont éliminées à partir de 24dB dans le canal industriel, qui est nettement meilleur que celui du RS(31,17) + CC. Pour une meilleure illustration, nous pouvons voir les différentes valeurs du SNR pour un taux d'erreur binaire linéaire fixe de 0.1 dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7. SNR en dB à un BER linéaire fixe de 0,1 pour un canal AWGN et le canal industriel sous les modes OtM

	OtM 16 utilisateurs	
	RS(31,17) + CC	RS(255,223) + CC
AWGN	13 dB	11 dB
Canal industriel	26 dB	22 dB

La combinaison des codes SRS(255,223) et CC ½ donne de meilleurs résultats que les codes RS(31,17) et CC ½, avec 2dB avec un bruit AWGN, et 4dB sous le canal industriel, les résultats obtenus montrent une amélioration par rapport à nos résultats obtenus dans la partie 4.4.

4.6. Conclusion

Le but dans ce chapitre est l'amélioration de la fiabilité de la transmission des données en augmentant la robustesse des signaux transmis, nous avons montré que l'utilisation du codage de canal individuellement était bénéfique pour notre architecture, mais le canal industriel de propagation est très agressif, et le type d'erreurs qu'on trouve dans ce type de milieu nous a poussé à chercher à combiner les CCE les plus efficaces contres ce types de perturbations, et cela aussi a permis d'avoir des résultats positifs prometteurs pour notre architecture à base d'ondelettes, nous avons fini cette partie par l'exploitation de la technique de raccourcissement des codes Reed Solomon qui a permis aussi à son tour d'avoir des résultats positifs en matière de gain de performances avec en moyenne des gains de 4 à 6dB pour les codages individuels, de 5 à 10db avec la combinaison des codages et de 2 à 4dB de plus pour les codes raccourcis avec les deux modes de transmissions MtO et OtM sous le canal AWGN et canal industriel.

Conclusion générale et perspectives

La transformation en ondelettes analyse naturellement les signaux dans le domaine temps-fréquence, ce qui donne plus de liberté pour localiser le comportement fréquent des signaux dans le domaine fréquentiel. Bien que la STFT analyse les signaux dans le domaine temps-fréquence, elle est limitée par la taille de la fenêtre qui détermine la longueur de la transformation ainsi que le balayage sur l'ensemble du signal, ce qui implique plus de temps de traitement et de calcul. Par conséquent, la transformée en ondelettes est considérée comme la transformée de pointe actuelle. L'utilisation de cette transformée dans les systèmes de communication sans fil et plus particulièrement pour les réseaux de capteurs sans fil industriels est l'un des nombreux domaines de recherche ouverts qui restent à explorer.

Dans ce rapport de thèse, nous avons présenté notre implémentation de la technique de modulation par ondelettes dans une architecture de communication sans fil capable de communiquer dans un milieu industriel fortement bruité, qui a été renforcé par l'introduction de plusieurs combinaisons de codes correcteurs d'erreurs. Comme nouveauté, nous proposons d'utiliser la IDWPT à la transmission et la DWPT à la réception. En outre, nous étendons la qualité de l'architecture en proposant une technique de combinaison des codes convolutifs et codes Reed Solomon. Les conclusions des résultats seront résumées dans la section conclusion et les recommandations sur les futurs sujets de recherche seront abordées dans la section perspectives.

Le premier chapitre fait état de l'art des principales technologies de communication industrielles. Nous avons commencé par présenter les réseaux et configurations des systèmes de communication filaire industriels, avec leurs contraintes et limitations, puis nous avons discuté de l'évolution de ces dernières vers les systèmes sans fil dont les majeures avancées technologiques ont contribué, en plus des différents standards, en finissant avec leurs majeurs avantages et limitations. Après nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil et leur introduction au domaine industriel, notamment avec différentes plateformes IWSN. Nous avons fini ce chapitre par une présentation de l'internet des objets connectés et de l'internet industriel, ainsi qu'une introduction de l'industrie 4.0 et le rôle que jouent ces différentes technologies dedans, et nous avons fini cette partie par les principales plateformes et protocoles. Cette première partie nous a permis de présenter le contexte de notre travail, en prenant part à cette nouvelle révolution technologique avec notre architecture de communication sans fil.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les principales techniques de modulation utilisée dans les réseaux de capteurs industriels, pour présenter par la suite une nouvelle technique se basant sur les ondelettes orthogonales qui servira comme base de modulation pour notre architecture impulsionnelle multiutilisateur. Le principe de cette dernière consiste en l'utilisation de la transformé inverse par paquets d'ondelettes discrètes IDWPT dans la partie transmission, et à la réception la transformé directe par paquets d'ondelettes discrètes DWPT. Le choix de la transformée en ondelettes s'est basé sur sa capacité promettante à être une base potentielle appropriée pour les systèmes de transmission impulsionnelle orthogonale, grâce à son élaboration sous forme de bancs de filtres. Nous avons opté dans notre travail sur l'utilisation de la transformée en ondelettes discrètes, comme technique

de modulation impulsionnelle où les données sont transportées par des impulsions, plus spécifiquement la DWPT à base d'ondelettes orthogonales, qui s'identifie par sa capacité adaptée au découpage temps/fréquence de la bande passante du milieu de propagation industriel. Puisque le travail de notre thèse porte sur l'amélioration des performances de transmission de notre architecture, nous avons fourni des préliminaires sur les codes correcteurs d'erreur, en se basant principalement en premiers lieux sur les codes convolutifs pour leur efficacité en cas de présence d'erreurs aléatoires, et les Reed Solomon qui sont bien adapté pour détecter et corriger les erreurs de données en salves.

Pour donner suite aux deux premiers chapitres, nous avons conçu une architecture capable de répondre aux multiples contraintes rencontrées dans les milieux industriels fortement impactés par le bruit, et cela en utilisant la transformé par paquets d'ondelettes discrètes, et nous avons amélioré son rendement grâce aux codes correcteurs d'erreurs. Pour se faire, nous avons commencé par un troisième chapitre qui se divise en deux parties : la première partie qui nous a servie comme mise en situation dans un contexte de milieu industriel, avec les différentes caractéristiques et contraintes de ce type de milieu, et après nous avons proposé un modèle de canal sans fil qui nous a servie de base de simulation pour tester notre architecture, en essayant de s'approcher le plus possible des différentes contraintes de propagation industrielles. La deuxième partie s'est basée sur l'architecture développée et ces techniques de transmission, en commençant par détaillé les blocs modulation et démodulation, qui se basent sur l'IDWPT pour la transmission et la DWPT pour la réception, puis nous avons présenté nos deux techniques de transmission pour répondre au besoin des réseaux de capteurs sans fil industriels, comme étant un système de communication multiutilisateur, dont le partage et l'accès au canal est d'une criticité importante. Nous avons adapté notre architecture à deux types d'exploitations de communication, avec en premier le mode Man-to-One qui se traduit par une communication entre plusieurs utilisateurs à la transmission, et un seul récepteur, et qui peut représenter une communication esclave-mettre, comme communication ascendante, le nombre d'utilisateurs à l'entrée varie entre 8, 16 et 32 différents émetteurs ou chacun utilise la transformée IDWPT dont le nombre d'entrées équivaut au nombre de capteurs, avec les échelles d'analyses d'ordre 3, 4 et 5 ayant respectivement $2^3 = 8$, $2^4 = 16$ et $2^5 = 32$ entrées. On active une seule et unique entrée à la fois correspondant à un utilisateur en y injectant les données en binaire à transmettre, alors que les autres entrées non sollicitées sont mises à zéro. Chaque utilisateur est identifié par le numéro de l'entrée utilisé. Du côté de la réception, un récepteur utilisant la transformée DWPT à l'échelle équivalente à celle de la transmission, 8, 16 ou 32 sorties sont utilisées. Chaque trame de données transmise est détectée au niveau de la sortie équivalente de l'utilisateur de la transmission. Après avoir détaillé notre architecture, nous avons procédé aux tests des performances de notre architecture, en fixant tout d'abord, le choix de la forme d'ondelette à utiliser en choisissant l'ondelette 'Symlet', à la suite des résultats obtenus au paravent, puisque cette forme est la plus optimale, car son taux d'erreur binaire est le plus bas après comparaison des performances avec d'autres formes. Après simulations sur le canal AWGN, nous avons trouvé que les signaux émis par les capteurs sont détectés avec un BER très faible au-delà d'un SNR de 18dB en moyenne. Du côté du canal industriel, les performances de transmission de notre architecture sont dégradées, jusqu'à un SNR de 36dB en moyenne où le BER est très faible. Le deuxième mode d'exploitation de notre architecture est le One-to-Many, équivalent à une communication maitre-esclave, ou un seul utilisateur communique avec plusieurs récepteurs en émettant un ou plusieurs signaux au même moment. Ici aussi, nous avons utilisé le même nombre d'utilisateurs que la MtO, avec 8,16 et 32 récepteurs, avec le même nombre d'entrées au niveau de l'émetteur, en activant une seule entrée en y injectant l'information à transmettre. Cette dernière sera détectée au niveau de l'entrée équivalente de chaque capteur à la réception. De la même manière, les résultats obtenus après simulation sont satisfaisants, avec un BER très faible au-delà d'un SNR de 17dB en moyenne sur canal AWGN, alors que les performances sont dégradées encore dans le canal industriel avec un début de BER faible à partir de 34dB. Les résultats obtenus de ces simulations sont satisfaisants puisque notre architecture a montré sa robustesse face au bruit industriel.

Notre architecture est basée principalement sur deux avantages, le premier étant l'utilisation des ondelettes orthogonales, qui présentent une certaine robustesse contre les différents phénomènes

dégradants qu'on trouve dans les milieux industriels, et le deuxième avantage est l'élimination de la couche MAC, ce qui a permis de faciliter l'accès au canal de transmission, et de réduire considérablement la consommation d'énergie, et ceci est dû à la séparation des utilisateurs en les identifiants à la transmission par une forme d'impulsion, ce qui permet l'attribution d'une bande passante précise a ces derniers. Grâce à cela, notre architecture n'aura besoin d'aucune technique d'accès au canal supplémentaire pour fonctionner en architecture multiutilisateur.

Dans le chapitre 4, nous avons amélioré les performances de notre architecture avec l'introduction des codes correcteurs d'erreurs, en cherchant principalement une bonne configuration de codage avec les codes de correction d'erreurs, principalement les Reed Solomon et les codes convolutifs, tout en respectant les contraintes et limitations des systèmes de communications sans fil. Dans ce chapitre, notre architecture a été testé et simulé pour différentes configurations utilisateurs/codages avec nos deux modes de transmissions MtO et OtM sous un canal AWGN et le canal industriel, nous avons divisé nos simulations sur plusieurs parties avec les différentes modes, une première partie ou nous avons testé les performances de chaque codage à part, et nous avons trouvé d'une manière générale que effectivement le rendement est meilleur quand on intègre le codage de canal dans notre architecture en exploitant le mode OtM, avec un gain en moyenne de 4dB dans un canal AWGN et de 6dB dans le canal industriel pour les codes convolutifs, de la même manière nous avons obtenu un gain de 4dB pour les deux types de canaux avec les Reed Solomon, du côté du mode MtO nous avons eu avec les codes convolutifs un gain de 2dB sous AWGN et de 6dB sous canal industriel, un gain de 3dB pour les deux types de canaux avec le codage Reed Solomon, ce qui confirme que le codage canal permet d'avoir de meilleur résultat en combinaison avec notre architecture multiutilisateur malgré le milieu de propagation. Dans la deuxième partie, nous avons testé une combinaison des deux codages en utilisant l'entrelacement entre les deux pour augmenter le rendement de la transmission, et les résultats étaient positifs, d'après les simulations, on a pu trouver qu'ils permettent une élimination totale des erreurs dans un canal AWGN à partir de 14dB, et ils sont éliminés à partir de 17dB dans le canal industriel pour le OtM, alors qu'elles sont éliminées à 30dB pour le MtO dans les deux canaux. Nous avons fini ce chapitre par un teste des codes Reed Solomon raccourcis, puisque nous cherchons à avoir un codage efficace tout en réduisant la complexité, donc nous avons comparé cette technique avec les codes RS sans raccourcissement et les résultats ont permis d'avoir un gain de 6dB avec un BER de 0.1, et de la même manière après simulation avec le mode OtM sous le canal AWGN les erreurs sont éliminées à partir de 16dB et à 24 pour le canal industriel. Pour conclure, l'utilisation des codes correcteurs d'erreurs avec notre architecture qui repose sur la modulation par les paquets d'ondelettes discrètes à permis d'avoir un le rendement et des performances meilleurs.

Perspectives

La transformation en ondelettes n'ayant été proposée que récemment et n'ayant pas encore été normalisée, de nombreuses questions de recherche restent encore sans réponses. En perspective de ces travaux, il est judicieux de commencer par une étude de comparaison des codes correcteurs d'erreur, un large panel de code existe dans la littérature, mais leurs utilisations restent limité dans les IWSN à cause des contraintes de consommation d'énergie et de temps de réponse, une étude de consommation d'énergie sera intéressante pour étudier l'efficacité de la modulation par les ondelettes et éventuellement utiliser un autre type de code correcteur d'erreurs plus complexe et dont le rendement est meilleur en qualité de robustesse de la communication.

Un autre mode d'exploitation Manty-to-Many, regroupant les deux modes MtO et OtM, capables de faire communiquer plusieurs utilisateurs entre eux simultanément, peut augmenter la diversité spatiale de notre architecture.

Un autre modèle de canal plus réfléchi, s'approchant le plus possible des cas réels dans les milieux industriels, ce modèle doit intégrer les déférents phénomènes de propagation tels que les variations

temporelles dues à la mobilité, l'évanouissement, et interférence, et ce modèle pourra être développés avec des mesures sur terrain, avec plusieurs études de cas.

La suite logique de notre travail de thèse serait de concevoir une application matérielle de notre architecture en utilisant les plateformes FPGA, et pouvoir réaliser des simulations sur terrain.

Publications

Revue :

[1] S. SAADAOUI, A. KHALIL, M. TABAA, M. CHEHAITLY, F. MONTEIRO, A. DANDACHE. Improved many-to-one architecture based on discrete wavelet packet transform for industrial IoT applications using channel coding. J Ambient Intell Human Comput (2020).

Conférences :

[2] A. KHALIL, S. SADAOUI, M. TABAA, M. CHEAITLY, F. MONTEIRO, A. Oukaira A. DANDACHE. Combined Reed-Solomon and Convolutional codes for IWSN based on IDWPT/DWPT Architecture. Procedia Computer Science (2019)

[3] A. KHALIL, S. SADAOUI, M. TABAA, M. CHEAITLY, F. MONTEIRO, A. DANDACHE. Shortened Reed Solomon Performance for Industrial IOT Wireless Applications. INTIS'2019, December 2019 Tangier, Morocco.

[4] M. TABAA, S. SAADAOUI, F. MONTEIRO, A. KHALIL, A. DANDACHE, K. ALAMI, A DAISSAOUI. Distributed industrial communication based on MQTT and Modbus in the context of future industry. ASD 2018

[5] S. SADAOUI, M. TABAA, F. MONTEIRO, M. CHEAITLY, A. DANDACHE, A. KHALIL, K. ALAMI. Industrial WSN based on Discrete Wavelet Packet Transform for Smart Factory Wireless communications. SADASC'18

Bibliographie

[1] M. Felser and T. Sauter, "Standardization of industrial Ethernet - the next battlefield?," IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2004. Proceedings., Vienna, 2004, pp. 413-420, doi: 10.1109/WFCS.2004.1377762.

[2] Y. Liu, D. Lu, L. Deng, T. Bai, K. Hou and Y. Zeng, "Risk assessment for the cascading failure of electric cyber-physical system considering multiple information factors," in *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 155-160, 12 2017, doi: 10.1049/iet-cps.2017.0002.

[3] HART Communication Foundation, October 2010. http://www.hartcomm.org/

[4] R. Shaw and B. Jackman, "An introduction to FlexRay as an industrial network," *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, 2008, pp. 1849-1854, doi: 10.1109/ISIE.2008.4676987.

[5] Reichenbach, Frank, Matthias Handy, and Dirk Timmermann. "Monitoring the ocean environment with large-area wireless sensor networks." 8th EUROMICRO Conference on Digital System Design. 2005.

[6] Mainwaring, Alan, et al. "Wireless sensor networks for habitat monitoring." Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications. 2002.

[7] Paek, Jeongyeup, et al. "A wireless sensor network for structural health monitoring: Performance and experience." *The Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, 2005. EmNetS-II.*. IEEE, 2005.

[8] Krishnamurthy, Lakshman, et al. "Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the north sea." *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*. 2005.

[9] Szewczyk, Robert, et al. "An analysis of a large scale habitat monitoring application." *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*. 2004.

[10] Zhao, Jing, et al. "Reliable graph routing in industrial wireless sensor networks." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 9.12 (2013): 758217.

[11] Oikonomou, George, and Iain Phillips. "Experiences from porting the Contiki operating system to a popular hardware platform." *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*. IEEE, 2011.

[12] L. Lo Bello and E. Toscano, “Coexistence issues of multiple Co-Located IEEE 802.15.4/ZigBee Networks running on adjacent radio channels in industrial environments,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 5, no. 2, pp. 157–167, 2009.

[13] Ung, Johnny, and Tutku Karacolak. "A wideband implantable antenna for continuous health monitoring in the MedRadio and ISM bands." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 11 (2012): 1642-1645.

[14] Lu, Bin, and Vehbi C. Gungor. "Online and remote motor energy monitoring and fault diagnostics using wireless sensor networks." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56.11 (2009): 4651-4659.

[15] Willig, Andreas, Kirsten Matheus, and Adam Wolisz. "Wireless technology in industrial networks." *Proceedings of the IEEE* 93.6 (2005): 1130-1151.

[16] Shelby, Zach, and Carsten Bormann. *6LoWPAN: The wireless embedded Internet*. Vol. 43. John Wiley & Sons, 2011.

[17] Christin, Delphine, Parag S. Mogre, and Matthias Hollick. "Survey on wireless sensor network technologies for industrial automation: The security and quality of service perspectives." *Future Internet* 2.2 (2010): 96-125.

[18] Ramis Ferrer, Borja. An ontological approach for modelling configuration of factory-wide data integration systems based on IEC-61499. MS thesis. 2013.

[19] García Pájaro, Héctor. A 3d Real-Time Monitoring System for a Production Line. MS thesis. 2011.

[20] Zhang, Bin. Design and Implementation of an InfoStore for Key Performance Indicators. MS thesis. 2012.

[21] Sedlacek, Tomas. A Real-Time Positioning System of Manufacturing Carriers Deploying Wireless MEMS Accelerometers and Gyroscopes. MS thesis. 2012.

[22] Bennett, Bonnie, et al. Assessment study on sensors and automation in the industries of the future. Reports on industrial controls, information processing, automation, and robotics. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), Washington, DC (United States), 2004.

[23] Lee, K., et al. "IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats." *IEEE Instrumentation and Measurement Society* (2007).

[24] Knapp, Eric D., and Joel Thomas Langill. Industrial Network Security: Securing critical infrastructure networks for smart grid, SCADA, and other Industrial Control Systems. Syngress, 2014.

[25] Flammini, Alessandra, et al. "Wired and wireless sensor networks for industrial applications." *Microelectronics journal* 40.9 (2009): 1322-1336.

[26] "RUNES EU Research Project,". ist-runes.org.

[27] " grand view research". http://www.grandviewresearch.com.

[28] Buratti, Chiara, Roberto Verdone, and Gianluigi Ferrari. *Sensor networks with IEEE 802.15. 4 systems: distributed processing, MAC, and connectivity*. Springer Science & Business Media, 2011.

[29] Buratti, Chiara, et al. "An overview on wireless sensor networks technology and evolution." *Sensors* 9.9 (2009): 6869-6896.

[30] Kulkarni, Sanjeev R., and Pramod Viswanath. "A deterministic approach to throughput scaling in wireless networks." *IEEE Transactions on Information Theory* 50.6 (2004): 1041-1049.

[31] Ngo, Vincent, and Alagan Anpalagan. "A detailed review of energy-efficient medium access control protocols for mobile sensor networks." *Computers & electrical engineering* 36.2 (2010): 383-396.

[32] Raza, Usman, Parag Kulkarni, and Mahesh Sooriyabandara. "Low power wide area networks: An overview." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19.2 (2017): 855-873.

[33] El-Hoiydi, Amre. "Aloha with preamble sampling for sporadic traffic in ad hoc wireless sensor networks." *2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. No. 02CH37333)*. Vol. 5. IEEE, 2002.

[34] Briscoe, Neil. "Understanding the OSI 7-layer model." *PC Network Advisor* 120.2 (2000): 13-16.

[35] Koubâa, Anis, Mário Alves, and Eduardo Tovar. "IEEE 802.15. 4 for wireless sensor networks: a technical overview." (2005): 1-21.

[36] Baggio, Aline, and Koen Langendoen. "Monte Carlo localization for mobile wireless sensor networks." *Ad hoc networks* 6.5 (2008): 718-733.

[37] Akyildiz, Ian F., et al. "A survey on sensor networks." *IEEE Communications magazine* 40.8 (2002): 102-114.

[38] Yick, Jennifer, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. "Wireless sensor network survey." *Computer networks* 52.12 (2008): 2292-2330.

[39] Güngör, V. Çağrı, and Gerhard P. Hancke, eds. Industrial wireless sensor networks: Applications, protocols, and standards. Crc Press, 2013.

[40] Chen, Deji, M. Nixon, and A. WirelessHART Mok. "Real-Time Mesh Network for Industrial Automation." (2010).

[41] Wang, Quan, and Jin Jiang. "Comparative examination on architecture and protocol of industrial wireless sensor network standards." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18.3 (2016): 2197-2219.

[42] Shelby, Zach, and Carsten Bormann. *6LoWPAN: The wireless embedded Internet*. Vol. 43. John Wiley & Sons, 2011.

[43] Ergen, Sinem Coleri. "ZigBee/IEEE 802.15. 4 Summary." *UC Berkeley, September* 10.17 (2004): 11.

[44] Li, Daoyuan. "A Proxy for Distributed Hash Table based Machine-to-Machine Networks." (2011).

[45] Ergen, Sinem Coleri. "ZigBee/IEEE 802.15. 4 Summary." *UC Berkeley, September* 10.17 (2004): 11.

[46] Elahi, Ata, and Adam Gschwender. *ZigBee wireless sensor and control network*. Pearson Education, 2009.

[47] Patel, Nidhi, Hiren Kathiriya, and Arjav Bavarva. "Wireless sensor network using Zigbee." *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2.6 (2013): 1038-1042.

[48] Sachs, Jeffrey, et al. "Monitoring the world's agriculture." *Nature* 466.7306 (2010): 558-560.

[49] Holler, Jan, et al. *Internet of Things*. Academic Press, 2014.

[50] Atzori, Luigi, Antonio Iera, and Giacomo Morabito. "The internet of things: A survey." *Computer networks* 54.15 (2010): 2787-2805.

[51] Sarma, Sanjay E., Stephen A. Weis, and Daniel W. Engels. "RFID systems and security and privacy implications." *International Workshop on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002.

[52] Mattern, Friedemann, and Christian Floerkemeier. "From the Internet of Computers to the Internet of Things." *From active data management to event-based systems and more*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. 242-259.

[53] Y. Lu, "Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues," Journal of Industrial Information Integration, vol. 6, pp. 1-10, 2017.

[54] Cook, Diane, and Sajal Kumar Das. *Smart environments: technology, protocols, and applications*. Vol. 43. John Wiley & Sons, 2004.

[55] Zuehlke, Detlef. "SmartFactory—Towards a factory-of-things." *Annual reviews in control* 34.1 (2010): 129-138.

[56] Dujovne, Diego, et al. "6TiSCH: deterministic IP-enabled industrial internet (of things)." *IEEE Communications Magazine* 52.12 (2014): 36-41.

[57] Evans, Peter C., and Marco Annunziata. "Industrial internet: Pushing the boundaries." *General Electric Reports* (2012): 488-508.

[58] Gorecky, Dominic, et al. "Human-machine-interaction in the industry 4.0 era." *2014 12th IEEE international conference on industrial informatics (INDIN)*. IEEE, 2014.

[59] Wan, Jiafu, Hu Cai, and Keliang Zhou. "Industrie 4.0: enabling technologies." Proceedings of 2015 international conference on intelligent computing and internet of things. IEEE, 2015.

[60] Al Nuaimi, Mariam, Farag Sallabi, and Khaled Shuaib. "A survey of wireless multimedia sensor networks challenges and solutions." *2011 International Conference on Innovations in Information Technology*. IEEE, 2011.

[61] Haykin, Simon. "Communication Systems, John Wiley&Sons." *Inc* (2001).

[62] Proakis, J. G., and M. Salehi. "Digital Communications. New YorN: McGraw." (2008).

[63] Sklar, Bernard. Digital communications: fundamentals and applications. 2001.

[64] Feher, Kamilo. "Bit rate agile third-generation wireless CDMA, GSM, TDMA and OFDM system." U.S. Patent No. 6,757,334. 29 Jun. 2004.

[65] Riaz, Naveel, and Mohammad Ghavami. "Analytical performance evaluation of ultra-wideband multiple access schemes for different wireless sensor network application environments." *IET communications* 3.9 (2009): 1473-1487.

[66] Barnela, Manoj, and Dr Suresh Kumar. "Digital modulation schemes employed in wireless communication: A literature review." *International Journal of Wired and Wireless Communications* 2.2 (2014): 15-21.

[67] Proakis, John G., and Masoud Salehi. *Fundamentals of communication systems*. Pearson Education India, 2007.

[68] Proakis, John G. "Digital communications through fading multipath channels." *Digital Communications*. McGraw-Hill, 2001. 824-825.

[69] Burke-Hubbard, Barbara. "The world according to wavelets: The story of a mathematical technique in the making." (1998).

[70] Daubechies, Ingrid. *Ten lectures on wavelets*. Society for industrial and applied mathematics, 1992.

[71] Mallat, Stephane G. "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation." *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 11.7 (1989): 674-693.

[72] Mallat, Stephane G. "Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of L^2 (R)." *Transactions of the American mathematical society* 315.1 (1989): 69-87.

[73] Gopinath, Ramesh A., et al. "Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer." (1997).

[74] Marvasti, Farokh, ed. *Nonuniform sampling: theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2012.

[75] Mallat, Stephane G. "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation." *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 11.7 (1989): 674-693.

[76] Haar, Alfred. "Die Minkowskische Geometrie und die Annäherung an stetige Funktionen." *Mathematische Annalen* 78.1 (1917): 294-311.

[77] Almuttiri, Abdullah S., and Scott L. Linfoot. "An advanced modulation scheme for mobile broadcasting." *MELECON 2014-2014 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. IEEE, 2014.

[78] Haar, Alfred. "On the theory of orthogonal function systems." *Mathematische Annalen* 69.3 (1910): 331-371.

[79] Ingrid, Daubechies. "Ten Lectures on Wavelets, 9e." *SIAM, ISBN* (2006): 780-89871.

[80] Daubechies, Ingrid, and Wim Sweldens. "Factoring wavelet transforms into lifting steps." *Journal of Fourier analysis and applications* 4.3 (1998): 247-269.

[81] Lindsey, Alan R. "Wavelet packet modulation for orthogonally multiplexed communication." *IEEE Transactions on signal processing* 45.5 (1997): 1336-1339.

[82] Khan, U., Sobia Baig, and M. J. Mughal. "Performance comparison of wavelet packet modulation and OFDM for multipath wireless channel." *2009 2nd International Conference on Computer, Control and Communication*. IEEE, 2009.

[83] Le, Ngon Thanh, Siva D. Muruganathan, and Abu B. Sesay. "An efficient PAPR reduction method for wavelet packet modulation schemes." *VTC Spring 2009-IEEE 69th Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2009.

[84] Vaidyanathan, P. P. "Multirate Systems and Filter Banks,‖ Prentice-Hall." *Englewood Cliffs, NJ* (1993).

[85] Mix, Dwight F., and Kraig J. Olejniczak. *Elements of wavelets for engineers and scientists*. John Wiley & Sons, 2003.

[86] Nikookar, Homayoun. Wavelet radio: adaptive and reconfigurable wireless systems based on wavelets. Cambridge University Press, 2013.

[87] Jamin, Antony, and Petri Mähönen. "Wavelet packet modulation for wireless communications." *Wireless Communications and Mobile Computing* 5.2 (2005): 123-137.

[88] Pahlavan, K., and A. H. Levesque. "Topology, Medium Access, and Performance." *el Wireless Information Networks, 2nd ed. Wiley-Interscience* (2005): 501-572.

[89] Morelos-Zaragoza, Robert H. *The art of error correcting coding*. John Wiley & Sons, 2006.

[90] Papirla, Veera, and Chaitali Chakrabarti. "Energy-aware error control coding for flash memories." *2009 46th ACM/IEEE Design Automation Conference*. IEEE, 2009.

[91] Shier, Douglas R., and K. T. Wallenius, eds. *Applied mathematical modeling: A multidisciplinary approach*. CRC Press, 1999.

[92] Jiang, Yuan. A practical guide to error-control coding using MATLAB. Artech House, 2010.

[93] Malenko, Maya. "Implementation of Reed-Solomon RS (255,239) Code." *Titel: Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Innovations in IT*. Bibliothek, Hochschule Anhalt, 2018.

[94] Lone, Faisal Rasheed, Arjun Puri, and Sudesh Kumar. "Performance comparison of reed solomon code and BCH code over rayleigh fading channel." *arXiv preprint arXiv:1307.6930* (2013).

[95] Hamming, Richard W. "Error detecting and error correcting codes." *The Bell system technical journal* 29.2 (1950): 147-160.

[96] El Hassani, Sanae, Marie-Helene Hamon, and Pierre Pénard. "A comparison study of binary and non-binary LDPC codes decoding." *SoftCOM 2010, 18th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*. IEEE, 2010.

[97] Petrova, Marina, et al. "Performance study of IEEE 802.15. 4 using measurements and simulations." *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006.*. Vol. 1. IEEE, 2006.

[98] Saadaoui, Safa, et al. "Performance of IDWPT/DWPT compared with OFDM under an Industrial Channel." *Procedia Computer Science* 170 (2020): 396-402.

[99] Pauluzzi, David R., and Norman C. Beaulieu. "A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel." *IEEE Transactions on communications* 48.10 (2000): 1681-1691.

[100] Degardin, Virginie, et al. "Classification and characterization of impulsive noise on indoor powerline used for data communications." *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 48.4 (2002): 913-918.

[101] Zabin, Serena M., and H. Vincent Poor. "Parameter estimation for Middleton Class A interference processes." *IEEE Transactions on Communications* 37.10 (1989): 1042-1051.

[102] Middleton, David. "Non-Gaussian noise models in signal processing for telecommunications: new methods an results for class A and class B noise models." *IEEE Transactions on Information Theory* 45.4 (1999): 1129-1149.

[103] Berry, Leslie A. "Understanding Middleton's canonical formula for class A noise." *IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility* 4 (1981): 337-344.

[104] Zabin, Serena M., and H. Vincent Poor. "Efficient estimation of class A noise parameters via the EM algorithm." *IEEE Transactions on Information Theory* 37.1 (1991): 60-72.

[105] Cheffena, Michael. "Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks [wireless corner]." *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 58.1 (2016): 66-73.

[106] Saleh, Adel AM, and Reinaldo Valenzuela. "A statistical model for indoor multipath propagation." *IEEE Journal on selected areas in communications* 5.2 (1987): 128-137.

[107] Karedal, Johan, et al. "A measurement-based statistical model for industrial ultra-wideband channels." *IEEE transactions on wireless communications* 6.8 (2007): 3028-3037.

[108] Ferrer Coll, Javier. RF Channel Characterization in Industrial, Hospital and Home Environments. Diss. KTH Royal Institute of Technology, 2012.

[109] Willig, Andreas, et al. "Measurements of a wireless link in an industrial environment using an IEEE 802.11-compliant physical layer." *IEEE Transactions on industrial electronics* 49.6 (2002): 1265-1282.

[110] Downey, Stephanie G., et al. "Prognostic factors related to clinical response in patients with metastatic melanoma treated by CTL-associated antigen-4 blockade." *Clinical Cancer Research* 13.22 (2007): 6681-6688.

[111] Gummadi, Ramakrishna, et al. "Understanding and mitigating the impact of RF interference on 802.11 networks." *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 37.4 (2007): 385-396.

[112] Parkash, B., et al. "Holocene tectonic movements and stress field in the western Gangetic plains." *Current Science* (2000): 438-449.

[113] Li, Jiandong, et al. "Performance evaluation of modified IEEE 802.11 MAC for multi-channel multi-hop ad hoc networks." *Journal of Interconnection Networks* 4.03 (2003): 345-359.

[114] Saadaoui, Safa, et al. "Discrete Wavelet Packet Transform-Based Industrial Digital Wireless Communication Systems." *Information* 10.3 (2019): 104.

[115] Saadaoui, Safa, et al. "Improved many-to-one architecture based on discrete wavelet packet transform for industrial IoT applications using channel coding." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* (2020): 1-9.

Résumé

Ces dernières années ont été marquées par des mutations rapides et profondes des technologies de transmission de données. Ces mutations sont dictées par l'augmentation massive des débits, la diversité des médias physiques, la multiplication des normes de transmission conjointe aux exigences d'interopérabilité, ainsi que l'accroissement des contraintes liées à ma qualité de service qui se traduisent notamment en contraintes de sûreté de fonctionnement (fiabilité, tolérance aux fautes). Dans le domaine des communications sans fil, à ces aspects s'ajoute l'utilisation d'un spectre de fréquences déjà bien encombré et non extensible, ainsi que la prise en compte de la mobilité, l'autonomie et la sécurité des utilisateurs. Inévitablement, tout ceci induit de très fortes contraintes au niveau de la conception des circuits et systèmes de transmission devant prendre en charge les nouveaux protocoles de transmission. C'est notamment le cas pour tous les aspects relatifs aux codes correcteurs d'erreurs chargés de protéger les communications contre les perturbations extérieures susceptibles d'altérer les informations transmises. En fait, les algorithmes de traitement à mettre en œuvre, très exigeants en termes de débit et de complexité, rendent les architectures de codage/décodage existantes inadaptées à cause de leurs capacités de calcul insuffisantes. Le but de la thèse se situe dans la continuation de travaux précédents ayant fait l'objet de plusieurs thèses et publications concernant les architectures dédiées au traitement des codes correcteurs d'erreurs, les architectures de processeurs et les architectures de réseaux sur puce, le tout en s'intéressant aux aspects tolérances aux fautes. L'objectif global ici est de concevoir de nouvelles architectures numériques fonctionnelle basé sur la modulation par paquets d'ondelettes discrètes, utilisant la transformé inverse par paquets d'ondelettes discrètes (IDWPT) dans la transmission, et la transformé par paquets d'ondelettes discrètes (DWPT) dans la réception, en exploitant deux modes de transmission : One-to-Many (OtM) pour une transmission entre un seul transmetteur et plusieurs capteurs allant de 8, 16 jusqu'à 32 ou plus, et un mode Many-to-One (MtO) pour une transmission entre plusieurs utilisateurs et un seul récepteur avec la même configuration possible, suivie par l'intégration des codes correcteurs modernes dans cette architecture (notamment les différentes familles de codes Reed Solomon et Codes Convolutifs), offrant une forte puissance de traitement et une versatilité élevée (flexibilité et configurabilité), pour les milieux industriels fortement bruité. L'utilisation des codes correcteurs d'erreurs nous ont permis d'avoir un gain de 4 à 6dB pour les codages Reed Solomon et les codes convolutifs utilisés individuellement, de 5 à 10db avec la combinaison de ces deux codages et de 2 à 4dB de plus pour les codes Reed Solomon raccourcis.

Mots-clefs : sûreté de fonctionnement, réseaux de capteurs sans fil industriel, Industrie 4.0, IOT, transformée par paquet d'ondelette discrete.

Abstract

recent years have been marked by rapid and profound changes in data transmission technologies. These changes are dictated by the massive increase in data rates, the diversity of physical media, the multiplication of joint transmission standards and interoperability requirements, as well as the increase in constraints linked to the quality of service, which are reflected in particular in operational safety constraints (reliability, fault tolerance). In the field of wireless communications, these aspects are compounded by the use of an already congested and non-extensible frequency spectrum, as well as the need to take account of the mobility, autonomy and safety of users. Inevitably, all this leads to very strong constraints in the design of transmission circuits and systems that must support the new transmission protocols. This is particularly the case for all aspects relating to error-correcting codes responsible for protecting communications against external disturbances likely to alter the information

transmitted. In fact, the processing algorithms to be implemented, which are very demanding in terms of throughput and complexity, make the existing coding/decoding architectures unsuitable because of their insufficient computing capacity. The aim of the thesis is in the continuation of previous work that has been the subject of several theses and publications concerning architectures dedicated to the processing of error-correcting codes, processor architectures and on-chip network architectures, while focusing on the fault tolerance aspects. The overall objective here is to design new functional digital architectures based on discrete wavelet packet modulation, using Inverse Discrete Wavelet Packet Transform (IDWPT) in transmission, and Discrete Wavelet Packet Transform (DWPT) in reception, exploiting two transmission modes: One-to-Many (OtM) for transmission between a single transmitter and several sensors ranging from 8, 16 up to 32 or more, and a Many-to-One (MtO) mode for transmission between several users and a single receiver with the same possible configuration, followed by the integration of modern correction codes in our architecture (notably the different families of Reed Solomon codes and Convolutional Codes), offering high processing power and versatility (flexibility and configurability), for high noise industrial environments. The use of error-correcting codes allowed us to have a gain of 4 to 6dB for Reed Solomon codings and convolutional codes used individually, 5 to 10db with the combination of these two codes and 2 to 4dB more for shortened Reed Solomon codes.

Keywords : dependability, industrial wireless sensor networks, Industry 4.0, IOT, discrete wavelet packet transform.