



HAL
open science

Conception d'un système de communication sans fil industriel basé sur la transformée en ondelettes

Safa Saadaoui

► **To cite this version:**

Safa Saadaoui. Conception d'un système de communication sans fil industriel basé sur la transformée en ondelettes. Automatique. Université de Lorraine, 2019. Français. NNT : 2019LORR0048 . tel-02328130

HAL Id: tel-02328130

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02328130v1>

Submitted on 23 Oct 2019

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>

Conception d'un système de communication sans fil industriel basé sur la transformée en ondelettes

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 29 Mars 2019 à 10H

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

(Mention : Systèmes Électroniques)

par

Safa SAADAoui

Composition du jury

| | | |
|-----------------------|---------------------------------|--|
| <i>Rapporteurs :</i> | Aawatif Hayar Emmanuel SIMEU | Professeur, ENSEM Université Hassan II Maître de Conférences - HDR, Université Grenoble Alpes |
| <i>Examineurs :</i> | Luc HEBRARD Fabrice MONTEIRO | Professeur, Université de Strasbourg Professeur, Université Lorraine |
| <i>Invités :</i> | Kais MABROUK Karim ALAMI | Professeur, Université Centrale de Tunis Maître de Conférences, EMSI Casablanca |
| <i>Directeur :</i> | Abbas DANDACHE | Professeur, Université Lorraine |
| <i>Co-Directeur :</i> | Mohamed TABAA | Maître de Conférences, EMSI Casablanca |

Mis en page avec la classe thesul.

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé dans le Laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche et Innovation (LPRI) de l'Ecole Marocaine des Sciences de l'Ingénieur (EMSI-Casablanca) en collaboration avec le laboratoire LGIPM (Laboratoire de Génie Industriel en Production et Maintenance) de l'Université de Lorraine à Metz. Je remercie énormément toutes les personnes qui ont cru en moi et qui m'ont permis d'arriver au bout de cette thèse.

Je commence tout d'abord par remercier mon directeur de thèse Monsieur Abbas Dandache qui a cru en moi et en mes capacités et qui a été d'un grand soutien pour moi. Je ne le remercierai jamais assez pour son encadrement mais surtout pour ses grandes qualités humaines. J'étais très chanceuse de l'avoir comme directeur de thèse.

Un énorme merci pour mon co-directeur Monsieur Mohamed Tabaa. Merci de m'avoir donné l'opportunité de collaborer et de travailler ensemble, et de m'avoir fait confiance. Merci aussi pour tous les conseils et recommandations, et quoi que je dise, je ne pourrai exprimer assez ma reconnaissance envers vous. Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur Fabrice Monteiro, pour tous nos longs échanges et pour les conseils pertinents.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres du jury, qui m'ont fait honneur en acceptant d'évaluer mon travail de thèse. Merci à Madame Aawatif Hayar professeur à l'université Hassan II, et à Monsieur Emmanuel Simeu Maître de Conférence-HDR à l'Université Grenoble Alpes, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail de recherche. Merci à Monsieur Luc Hébrard professeur à l'Université de Strasbourg, et à Mr Fabrice Monteiro professeur à l'Université de Lorraine d'avoir accepté d'examiner ce travail de recherche. Je remercie aussi Mr Kais Mabrouk professeur à l'université Centrale de Tunis et Mr Karim Alami professeur et directeur pédagogique de l'EMSI.

Je tiens à remercier sincèrement le président directeur général de l'EMSI Monsieur Kamal Daissaoui, le directeur pédagogique Karim Alami ainsi que le directeur du laboratoire LPRI Mohamed Tabaa, pour leurs encouragements, leur disponibilité, et leur participation au développement et rayonnement de la recherche au Maroc via des collaborations en enseignement et recherche. Mes remerciements vont à tous mes collègues du Laboratoire LPRI et mes collègues de l'EMSI Casablanca ainsi qu'à ceux du laboratoire (LGIPM) de Metz qui ont contribué au bon déroulement de ma thèse et à une bonne ambiance générale. Je dis Merci à : Abderrahmane, Zakaria, Meryem, Laila, Sofia, Khadija, Aamre, Oussama, Redouane, Asmaa, Laila, Karima, Ayoub, Hasnaa, Sanaa, Soukaina...

Un grand remerciement plein de tendresse et d'amour spécialement envers mes chers parents qui m'ont soutenu, encouragé, prié pour moi et qui ont accepté de garder mes petites filles avec toute la douceur du monde durant les périodes de mes déplacements. Je vous suis très reconnaissante et vous prie d'accepter ce mémoire de thèse comme fruit de vos encouragements et nombreux sacrifices. Je remercie mon tendre mari pour ses encouragements, sa patience, sa tendresse et son beau sourire. Énorme merci à mes petites filles chéries qui ont été une source d'inspiration et de motivation pour compléter ce travail de thèse. Merci à mes très chers frères, belles sœurs, neveu et nièces pour votre affection, votre disponibilité et amour inconditionnel. Je remercie également mes grand-mères, mes tantes, oncles, cousins, ma belle-famille et mes copines pour leurs prières et leurs générosités. Enfin, j'exprime ma gratitude à toute personne que j'ai omis de citer ci haut mais qui a contribué de prêt ou de loin à ma réussite tant professionnelle que personnelle.

Je dédie cette thèse :

A mes chers parents, source inépuisable d'affection et de motivation. Vos prières m'ont été d'un grand réconfort tout au long de ma vie et particulièrement durant ces années de thèse.

A mon tendre mari, qui n'a jamais cessé de me soutenir et de m'épauler. Qui a cru en moi, et m'a voulu toujours la meilleure.

A mes princesses Alya et Rhita, ma joie de vivre. Vous étiez et êtes ma source d'inspiration et de motivation. Je puise mes ambitions dans vos regards remplis d'amour.

A la mémoire de mon frère Karim qui est parti si jeune. Je sais que là où tu es, tu es très fière de moi.

Sommaire

Avant propos xv

Introduction générale xix

Chapitre 1

Les réseaux industriels : État de l'art **1**

| | | |
|-------|--|----|
| 1.1 | Introduction | 1 |
| 1.2 | Réseaux industriels filaires | 1 |
| 1.2.1 | Architectures d'automatismes industriels | 2 |
| 1.2.2 | L'informatique et les automatismes industriels | 4 |
| 1.2.3 | La communication sur les réseaux locaux industriels | 5 |
| 1.3 | Exigences des communications sur les réseaux locaux industriels | 7 |
| 1.3.1 | Le modèle OSI et les RLI : | 8 |
| 1.3.2 | Aspects de la couche physique : | 8 |
| 1.4 | Évolution des réseaux industriels vers une communication sans fil | 11 |
| 1.4.1 | Trusted Wireless : | 12 |
| 1.4.2 | Bluetooth : | 12 |
| 1.4.3 | WirelessHART : | 13 |
| 1.4.4 | ZigBee : | 13 |
| 1.4.5 | EnOcean : | 14 |
| 1.4.6 | WLAN IEEE 802.11 (WiFi) : | 14 |
| 1.4.7 | Réseaux cellulaires (2G/3G/4G, LTE) : | 14 |
| 1.5 | Les réseaux de capteurs | 16 |
| 1.5.1 | Domaines d'application des réseaux de capteurs | 16 |
| 1.5.2 | Caractéristiques des réseaux de capteurs | 17 |
| 1.6 | La communication industrielle et le déploiement de l'Internet des Objets | 18 |
| 1.6.1 | L'internet des objets IoT | 18 |
| 1.6.2 | L'internet Industriel des Objets IIoT | 19 |
| 1.7 | Les réseaux dédiés à l'internet des Objets IoT | 21 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 1.7.1 | Sigfox : | 22 |
| 1.7.2 | LoRa et LoRaWAN : | 22 |
| 1.7.3 | NB-IoT (Narrow Band IoT) : | 23 |
| 1.7.4 | LTE-M : | 24 |
| 1.8 | Conclusion | 24 |

| |
|---|
| <p>Chapitre 2</p> <p>Canal de propagation sans fil : Contexte et modèle utilisé</p> |
|---|

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | Introduction | 25 |
| 2.2 | Caractéristiques d'un canal de propagation sans fil | 25 |
| 2.2.1 | Propagation à trajets multiples | 26 |
| 2.2.2 | La réponse impulsionnelle | 27 |
| 2.2.3 | Distribution statistique des amplitudes | 30 |
| 2.2.4 | Évanouissements sélectifs et non sélectifs Fading | 31 |
| 2.3 | Modèles des canaux industriels existants | 32 |
| 2.3.1 | Modèles statistiques : | 32 |
| 2.3.2 | Modèles déterministes du canal | 36 |
| 2.3.3 | Modèles hybrides | 36 |
| 2.4 | Bruit industriel | 38 |
| 2.4.1 | Le modèle de Middleton | 38 |
| 2.4.2 | Le modèle Alpha Stable Symétrique | 39 |
| 2.4.3 | Le modèle issu des chaînes de Markov | 40 |
| 2.4.4 | Détection et suppression du bruit impulsionnel | 40 |
| 2.5 | Modèle du canal industriel utilisé | 41 |
| 2.5.1 | Génération des coefficients du canal à trajets multiples | 42 |
| 2.5.2 | La distribution de l'enveloppe du signal | 43 |
| 2.5.3 | Modèle du bruit industriel | 46 |
| 2.6 | Conclusion | 47 |

| |
|--|
| <p>Chapitre 3</p> <p>La théorie des ondelettes</p> |
|--|

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Introduction | 50 |
| 3.2 | La transformée en ondelette continue et discrète | 50 |
| 3.2.1 | La transformée en ondelette continue | 50 |
| 3.2.2 | La transformée en ondelette discrète | 52 |
| 3.3 | Analyse multirésolution et banc de filtres | 52 |
| 3.3.1 | Définition des espaces d'approximation et de détails | 52 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3.2 | Transformée en ondelette orthogonale | 54 |
| 3.3.3 | L'analyse multirésolution | 55 |
| 3.3.4 | Banc de filtres : algorithme d'analyse | 56 |
| 3.3.5 | Banc de filtres : algorithme de reconstruction | 57 |
| 3.3.6 | Structure globale du banc de filtres | 58 |
| 3.4 | Transformée par paquets d'ondelettes | 58 |
| 3.4.1 | Le concept de la transformée par paquets d'ondelettes | 60 |
| 3.4.2 | Décomposition et reconstruction | 60 |
| 3.4.3 | Ondelette de Haar | 62 |
| 3.4.4 | Ondelette de Daubechies | 63 |
| 3.4.5 | Ondelette de Symlet | 64 |
| 3.4.6 | Ondelette de Coiflets | 64 |
| 3.4.7 | Ondelette Biorthogonale | 64 |
| 3.5 | Conclusion | 66 |

Chapitre 4

Modes d'exploitation de l'architecture basée sur la transformée en ondelettes

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Introduction | 69 |
| 4.2 | Les techniques d'accès multiple | 69 |
| 4.2.1 | Méthodes statiques | 70 |
| 4.2.2 | Méthodes aléatoires | 72 |
| 4.2.3 | Techniques d'accès déterministes | 72 |
| 4.2.4 | Conclusion | 73 |
| 4.3 | Architecture DWPT et ses modes de fonctionnement | 74 |
| 4.3.1 | Fonctionnement à l'émission | 74 |
| 4.3.2 | Exploitation de l'architecture en milieu industriel | 76 |
| 4.4 | Mode de transmission <i>Point To Point</i> | 77 |
| 4.5 | Mode de transmission <i>Many To One</i> | 78 |
| 4.6 | Mode de transmission <i>One To Many</i> | 80 |
| 4.7 | Conclusion | 81 |

Chapitre 5

Simulations et validation de l'architecture de communication proposée en milieu industriel

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1 | Introduction | 83 |
| 5.2 | Le fonctionnement du mode <i>Many To One</i> en milieu industriel | 83 |
| 5.2.1 | La forme des signaux en émission et réception | 84 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 5.2.2 | L'impact de la forme d'ondelette | 85 |
| 5.2.3 | Transmission dans un canal industriel | 88 |
| 5.3 | Amélioration de la robustesse de l'architecture | 93 |
| 5.3.1 | Apport des codes correcteurs d'erreur | 93 |
| 5.3.2 | Récepteur optimal pour minimiser les bruits impulsionnels | 96 |
| 5.4 | Le fonctionnement du mode <i>One To Many</i> en milieu industriel | 97 |
| 5.4.1 | La forme des signaux à la réception | 97 |
| 5.4.2 | L'impact de la forme d'ondelette | 100 |
| 5.4.3 | Transmission dans un canal industriel | 101 |
| 5.5 | Amélioration de la robustesse de l'architecture | 103 |
| 5.5.1 | Codage du canal | 103 |
| 5.5.2 | Seuillage du bruit industriel | 105 |
| 5.5.3 | Conclusion | 105 |
| 5.6 | Comparaison avec un système à modulation multi-porteuses | 106 |
| 5.7 | Conclusion | 108 |
| | Conclusion générale et perspectives | 111 |
| | Publications | 115 |
| | Bibliographie | 117 |

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Exemple d'automatismes centralisés | 2 |
| 1.2 | Les automatismes décentralisés | 3 |
| 1.3 | La décentralisation des E/S | 3 |
| 1.4 | Pyramide CIM | 4 |
| 1.5 | Hierarchie des réseaux industriels | 5 |
| 1.6 | Niveaux du modèle CIM et leurs réseaux correspondants [1] | 6 |
| 1.7 | Le modèle OSI | 7 |
| 1.8 | Modèle OSI réduit | 8 |
| 1.9 | Les différentes topologies de réseaux | 9 |
| 1.10 | Technologies de communication sans fil industrielles [13] | 11 |
| 1.11 | Exemple d'un réseau WirelessHART [4] | 13 |
| 1.12 | Évolution de l'industrie | 20 |
| 1.13 | Technologies de communication [13] | 21 |
| 1.14 | Les bandes NB-IoT | 23 |
| 2.1 | Phénomène des multi-trajets | 26 |
| 2.2 | Atténuation de la puissance en fonction de la distance | 27 |
| 2.3 | Exemple de la réponse impulsionnelle | 28 |
| 2.4 | Exemple de la sélectivité du canal | 29 |
| 2.5 | Modèle de Saleh-Valenzuela | 33 |
| 2.6 | La PDP normalisée dans un milieu indoor | 34 |
| 2.7 | Scénario de propagation dans une configuration géométrique cubique [38] | 35 |
| 2.8 | Principe du Lancer de rayons | 37 |
| 2.9 | Principe de l'optique géométrique | 37 |
| 2.10 | Processus de Markov à deux états | 40 |
| 2.11 | La réponse impulsionnelle LOS à 2.4 GHz | 44 |
| 2.12 | La réponse impulsionnelle NLOS à 2.4 GHz | 44 |
| 2.13 | La réponse impulsionnelle LOS à 5 GHz | 45 |
| 2.14 | La réponse impulsionnelle NLOS à 5 GHz | 45 |
| 2.15 | L'enveloppe du canal à évanouissement LOS à 2.4GHz en dBm | 46 |
| 2.16 | Bruit blanc gaussien et bruit impulsionnel $R = 50$ | 47 |
| 3.1 | Pavage du plan temps-échelle | 51 |
| 3.2 | Inclusion des sous espaces fermés V_i | 53 |
| 3.3 | Les sous espaces d'ondelettes | 54 |
| 3.4 | Décomposition des bloque passe haut et passe bas | 56 |
| 3.5 | Reconstruction à l'aide de filtres passe haut et passe bas | 57 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.6 | Analyse et synthèse multirésolution à l'échelle 3 | 58 |
| 3.7 | Analyse par paquets d'ondelette | 59 |
| 3.8 | Arbre de décomposition en paquets d'ondelette | 59 |
| 3.9 | Décomposition par paquets d'ondelette | 61 |
| 3.10 | Reconstruction par paquets d'ondelette | 62 |
| 3.11 | Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Haar [69] | 63 |
| 3.12 | Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Daubechies (2 et 4) [69] | 63 |
| 3.13 | Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Symlet (2 et 4) [69] | 64 |
| 3.14 | Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Coiflets (2 et 4) [69] | 65 |
| 3.15 | Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Biorthogonale 2.4 [69] | 65 |
| 3.16 | Architecture globale de l'émetteur et récepteur à l'échelle 3 | 66 |
| | | |
| 4.1 | Accès par TDMA | 70 |
| 4.2 | Accès par FDMA | 70 |
| 4.3 | Accès par CDMA | 71 |
| 4.4 | Différence entre OFDM et OFDMA | 71 |
| 4.5 | Mode d'anneau à jeton ' <i>Token Ring</i> ' | 73 |
| 4.6 | Architecture à 4 utilisateurs avec entrée 1 activée | 74 |
| 4.7 | Architecture à 4 utilisateurs avec entrée 2 activée | 75 |
| 4.8 | Architecture à 4 utilisateurs avec entrée 3 activée | 75 |
| 4.9 | Architecture à 4 utilisateurs avec entrée 4 activée | 75 |
| 4.10 | Bandes de fréquences pour 10 utilisateurs | 76 |
| 4.11 | Illustration des modes de communications en milieu industriel | 77 |
| 4.12 | Mode de transmission <i>Point To Point</i> | 78 |
| 4.13 | Mode de transmission <i>Many To One</i> | 79 |
| 4.14 | Mode de transmission pour une liaison <i>Many to One</i> | 79 |
| 4.15 | Architecture de l'émetteur pour un utilisateur en mode MTO | 80 |
| 4.16 | Mode de transmission <i>One To Many</i> | 81 |
| | | |
| 5.1 | Mode de communication MTO à 16 capteurs émetteurs | 84 |
| 5.2 | Signaux à l'émission après IDWPT | 85 |
| 5.3 | Signal reçu après DWPT identifié au capteur 2 | 86 |
| 5.4 | BER pour différentes ondelettes dans un canal BABG | 87 |
| 5.5 | BER pour un canal BABG avec différentes Ondelettes | 87 |
| 5.6 | BER pour un SNR = 15 dB | 88 |
| 5.7 | BER pour un système MTO 16 sur un canal BABG | 89 |
| 5.8 | BER pour un canal LOS à évanouissement | 90 |
| 5.9 | BER pour un canal NLOS à évanouissement | 90 |
| 5.10 | BER pour un canal à évanouissement à 2.4GHz en présence du bruit industriel | 91 |
| 5.11 | BER pour un canal à évanouissement à 5GHz en présence du bruit industriel | 92 |
| 5.12 | BER pour différents canaux (<i>Capteur 15</i>) | 92 |
| 5.13 | Architecture MTO avec codage correcteur d'erreur | 93 |
| 5.14 | Exemple d'un générateur de code convolutif | 93 |
| 5.15 | BER pour un code correcteur d'un rendement 1/2 pour 4 capteurs | 95 |
| 5.16 | BER pour un code correcteur d'un rendement 1/3 pour 4 capteurs | 95 |
| 5.17 | BER pour un code correcteur d'un rendement 1/4 pour 4 capteurs | 96 |
| 5.18 | Seuillage du bruit impulsionnel à la réception | 97 |
| 5.19 | Mode de transmission OTM avec un émetteur et 5 récepteurs (entrée 7 activée) | 98 |

| | |
|--|-----|
| 5.20 Récepteur DWPT pour chaque utilisateur (Signal récupéré à la sortie 7) | 98 |
| 5.21 Signal détecté à la sortie 2 (en rouge), les autres sorties sont nulles | 99 |
| 5.22 BER pour différentes ondelettes dans un canal BABG | 99 |
| 5.23 BER pour un canal BABG avec 4 récepteurs | 100 |
| 5.24 BER pour un canal LOS et NLOS à 2.4GHz | 101 |
| 5.25 BER pour un canal LOS et NLOS à 5GHz | 102 |
| 5.26 BER pour un canal à évanouissement en présence du bruit industriel | 102 |
| 5.27 Architecture OTM avec codage correcteur d'erreur | 103 |
| 5.28 BER pour un canal à évanouissement avec code correcteur | 104 |
| 5.29 BER pour un canal à évanouissement avec code correcteur | 104 |
| 5.30 BER au niveau du récepteur 2 avec seuillage | 105 |
| 5.31 BER pour un système OFDM sur un canal à évanouissements | 107 |
| 5.32 BER pour un système OFDM sur un canal industriel | 107 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Dispersion des retards τ_{rms} réelles | 42 |
| 2.2 | Retards et puissances simulés des canaux LOS et NLOS | 43 |
| 2.3 | Dispersion des retards τ_{rms} simulées | 46 |
| 3.1 | Coefficients DWT et IDWT de quelques ondelettes | 66 |
| 5.1 | Paramètres de l'architecture | 86 |
| 5.2 | Codes convolutifs utilisés | 94 |
| 5.3 | BER pour différents mode de communication à 15dB | 106 |
| 5.4 | BER comparatif pour un canal à évanouissement | 108 |
| 5.5 | BER comparatif pour un canal à évanouissement avec bruit industriel | 108 |

Avant propos

Ce projet de thèse effectué sous la direction du Professeur Abbas Dandache et la co-direction du Dr. Mohamed Tabaa, s'inscrit dans le cadre d'une collaboration d'enseignement et de recherche entre l'Université de Lorraine et l'École Marocaine des Sciences de l'Ingénieur (EMSI) de Casablanca.

Cette thèse est financée principalement par l'EMSI, vise à faire de l'accompagnement pour le développement de l'activité de recherche en conception des systèmes électroniques au sein de l'établissement ainsi que la création du Laboratoire Pluridisciplinaire en Recherche et Innovation (LPRI), dirigé par le Dr. Mohamed Tabaa.

Cette collaboration a permis de développer un savoir-faire commun entre le Laboratoire de Génie Informatique de Production et Maintenance (LGIPM) de Metz et le Laboratoire Pluridisciplinaire en Recherche et Innovation (LPRI) de Casablanca, notamment dans le domaine de la conception architecturale des systèmes de communication sans fil en milieu industriel.

Plusieurs évènements scientifiques nationaux et internationaux ont été organisés lors de cette collaboration, tels que :

— Les éditions de la "Conférence Internationale sur l'Innovation et Nouvelles Tendances dans les Systèmes d'Information INTIS" (INTIS'2017 à Casablanca, et INTIS'2018 à Marrakech).

— Les éditions de la "Journée Doctorale des Sciences de l'Ingénieur JDSI" (JDSI'14, JDSI'15, JDSI'16 et JDSI'17), en collaboration étroite avec les membres du laboratoire LGIPM de l'Université de Lorraine.

— La conférence internationale en micro-électronique IEEE ICM 2015 ayant eu lieu du 20 au 23 décembre 2015 à Casablanca, organisée par l'EMSI Casablanca en collaboration avec l'École Polytechnique de Montréal, l'Université de Lorraine à Metz et l'Université Libanaise à Beirut.

Cette collaboration a également permis de développer des liens entre les enseignants/Chercheurs de l'EMSI par une implication dans le programme d'enseignement et recherche, en leur offrant une mobilité entre Casablanca et Metz. Aussi, en proposant des stages de fin d'études en recherche pour les futurs lauréats de l'EMSI qui les incitent à intégrer le monde de la recherche.

Introduction générale

Les évolutions technologiques permanentes des systèmes de communication sans fil se sont succédées ces dernières décennies permettant l'émergence de besoins croissants des utilisateurs en termes d'accessibilité, de débits, quantité de données et de consommation d'énergie. Ces technologies sont en innovation permanente dans le but d'améliorer la connectivité des usagers mais aussi de connecter des milliards d'objets entre eux. Ces objets connectés sont des éléments physiques/numériques autonomes, capables de communiquer entre eux créant ainsi une révolution technologique qui apporte des innovations plus ambitieuses dans différents domaines d'application. Ce qui constitue une révolution pour laquelle on estime à 80 milliards d'objets connectés à l'horizon de 2020. L'intelligence embarquée dans des objets assure leur connectivité, et répond à un besoin de contrôle ou de surveillance dans différents domaines d'applications tels la médecine, l'industrie, l'environnement ou la sécurité.

Dans le monde industriel, une orientation vers des usines connectées, robotisées et intelligentes est en plein essor pour faire face à la concurrence des pays à faible coût de production. La révolution du monde numérique réduit considérablement les limites entre le monde physique et numérique. Ce qui donne vie à des usines interconnectées dans lesquelles les collaborateurs, les machines et les produits interagissent entre eux pour ainsi constituer la nouvelle révolution technologique connue sous le nom de l'Industrie 4.0, ceci avec une vocation purement connectée et notamment l'industrie 5.0 caractérisée par le retour de la dimension humaine. Cette révolution permet d'avoir des interactions qui visent une production sans défaut avec une traçabilité en temps réel des produits aux différentes étapes de production. En effet, cette nouvelle génération d'usines a pour objectif de relancer le dynamisme de l'industrie en modernisant la production et en augmentant de la compétitivité.

Étant donné le grand intérêt de la connectivité des objets dans le milieu industriel, il est nécessaire de proposer une architecture de communication à base des réseaux de capteurs sans fil robuste et fonctionnelle à l'intérieur des usines. Ses réseaux sont caractérisés par leur autonomie, leur faible consommation d'énergie et leur capacité à échanger et traiter plusieurs données provenant de différentes sources en temps réel. Nombreux travaux de recherches ont porté sur le développement et l'optimisation des réseaux de capteurs sans fil qui sont déployés dans divers champs d'applications. La conception de ces réseaux diffère pour chaque application tenant compte des contraintes liées au milieu de propagation. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons aux applications qui s'opèrent dans un milieu industriel. Un tel environnement de propagation diffère des autres milieux intérieurs classiques comme les bâtiments d'habitation ou bureaux, par ses grandes dimensions et surtout la nature des objets et obstacles présents dans ce milieu. Lors d'une transmission sans fil des données, l'interaction des signaux avec les différents objets peut engendrer une perte partielle ou totale des données dont il faut pallier. La complexité de l'environnement ainsi que le bruit présent dans le milieu de propagation industriel oblige à proposer un système de communication sans fil robuste face aux différentes perturbations. Ceci en considérant les contraintes énergétiques des réseaux de capteurs lors des transmissions et

réceptions des informations.

Des études ont présenté l'intérêt de la théorie des ondelettes pour concevoir des systèmes à modulation impulsionnelle qui peuvent être embarqués sur des réseaux de capteurs. Par le biais de la transformée en paquets d'ondelettes et des bancs de filtres, il est possible de générer des impulsions orthogonales en temps et en fréquence permettant de concevoir des systèmes de communication souples à base de modulation multiporteuses. La propriété de la multirésolution temps/fréquence de ces systèmes permet d'atteindre l'optimum en choisissant la forme d'onde adéquate. Aussi, la sensibilité aux interférences engendrées par le canal de propagation peut être réduite significativement en utilisant la transformée en paquets d'ondelettes discrètes par le biais de la caractéristiques d'orthogonalité des formes d'ondelettes à l'entrée des bancs de filtres.

Dans le cadre de cette thèse, un système de communication sans fil multi-utilisateurs à base des réseaux de capteurs industriels est proposé selon deux modes de fonctionnement distincts. Le premier mode assure une communication Many-To-One reliant plusieurs émetteurs à un seul récepteur. Le second mode relie un capteur émetteur à plusieurs récepteurs en mode One-To-Many. Ces modes de communications illustrent les différentes liaisons entre les niveaux 0, 1 et 2 de la pyramide CIM (Computer integrated manufacturing) déployée dans les milieux industriels. L'architecture de communication est basée sur la transformée par paquets d'ondelettes dont l'échelle d'analyse contrôle le nombre d'entrées actionnées et donc le nombre d'utilisateurs ou capteurs. Un choix de l'ondelette optimale en termes de taux d'erreur binaire est fait pour réaliser les simulations dans un canal industriel. Un modèle de ce canal est aussi proposé pour simuler le fonctionnement de notre architecture de communication dans un environnement qui s'approche le plus possible d'un milieu industriel réel.

Ce mémoire comporte 5 chapitres :

Le premier chapitre présente une revue sur les systèmes communicants en milieu industriel et de leur évolution des systèmes filaires vers les systèmes sans fil en arrivant à l'exploitation de l'internet des objets industriels. Nous allons présenter une revue des différents modes et standards de communications industriels, leurs avantages, contraintes et leurs diverses applications. Nous présenterons aussi les techniques et standard de communication pour la nouvelle révolution industrielle l'industrie 4.0 qui exploite l'internet des objets pour assurer la communication entre les différents équipements.

Le deuxième chapitre se compose en deux parties ; une première qui fait l'objet d'un état de l'art sur les caractéristiques des canaux de propagation sans fil industriels. Et une deuxième partie dans laquelle nous proposons un modèle de canal industriel simulé qui servira comme base d'étude de notre architecture de communication. Tenant compte de la revue de littérature sur les canaux de propagation industriels, notre modèle simulé sera caractérisé par le phénomène des trajets multiples engendrant des évanouissements fréquentiels des signaux. Les deux configurations de propagation en visibilité directe LOS (Line Of Sight) et non visibilité directe NLOS (Non Line Of Sight) seront présent en compte. De plus, un modèle de bruit industriel sera ajouté aux phénomènes des trajets multiples pour illustrer les fluctuations du canal dues aux différentes sources de bruit.

Dans le troisième chapitre, une étude de la transformée en ondelette sera effectuée. L'évolution de la théorie des ondelettes du cas continu au cas discret, vers une transformée en paquet d'ondelettes discrètes qui offre plus de souplesse pour générer des formes d'onde orthogonales. Les avantages de l'analyse multi-résolution qui propose des structures de décomposition et de reconstitution adaptées aux signaux seront aussi présentés dans ce chapitre. Aussi, quelques exemples de formes d'ondelettes orthogonales générées qui seront testées en transmission au cha-

pitre suivant. A la fin du chapitre, une structure globale de l'architecture à l'émission basée sur la IDWPT (Inverse Discrete Wavelet Transform) et à la DWPT (Discrete Wavelet Transform) à la réception sera présentée.

Avant de présenter les deux modes de fonctionnement de notre architecture, un aperçu sur les techniques d'accès multiples utilisés en milieu industriel sera donné au début du quatrième chapitre. Comme pour tout système de communication multi-utilisateurs, le partage du canal de propagation est contraint à respecter des techniques d'accès afin que tous les utilisateurs puissent partager le même médium sans interférences entre eux ni pertes de données. Les deux modes d'exploitation qui seront étudiés sont le mode Many To One, où plusieurs capteurs envoient des données différentes vers le même récepteur. Et le mode One To Many selon une topologie Maître/Esclaves, où seul et même capteur envoie de la données vers plusieurs capteurs récepteurs.

Au cinquième chapitre, l'architecture de communication sera testée et simulée pour différentes configurations de communication. Le choix de l'ondelette optimale sera fait pour une communication sur un canal à bruit blanc gaussien. Par la suite, les simulations sur les différentes configurations du canal de propagation industriel seront effectuées dans le but d'étudier la robustesse de notre architecture multi-utilisateurs. Des performances en termes de taux d'erreur binaire de l'architecture seront évaluées afin de proposer des améliorations. Deux techniques seront utilisées pour renforcer la robustesse de l'architecture de communication ; un codage correcteur d'erreur pour protéger les signaux contre les erreurs de la propagation et un récepteur optimal à base d'un seuillage à l'entrée du récepteur pour réduire l'effet du bruit industriel. Pour conclure, la validation de l'architecture IDWPT proposée sera effectuée en la comparant avec un système OFDM classique pour un canal BABG et un canal industriel simulé. Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale ainsi que des perspectives et travaux futures.

Chapitre 1

Les réseaux industriels : État de l'art

1.1 Introduction

L'industrie au niveau mondial, a fait une remarquable avancée grâce au déploiement des réseaux de communication. Ces réseaux, qui ont évolué d'une communication filaires vers une communication sans fil, ont facilité l'accès à la donnée en tout temps et lieu. Afin de mieux comprendre le rôle des réseaux de communication dans le milieu industriel, ce premier chapitre fera l'objet d'un état de l'art sur les systèmes industriels communicants. Les réseaux industriels filaires avec leurs architectures et produits seront présentés dans un premier temps. Ainsi que les différents niveaux de communications avec leurs correspondances selon le concept "Computer Integrated Manufacturing (CIM)". Par la suite, nous aborderons l'évolution des systèmes communicants vers des communications sans fils, avec les différents standards et protocoles régissant ce domaine. Ce point amènera à présenter les réseaux de capteurs industriels sans fil qui sont d'une forte importance vu le gain en ressources qu'ils permettent d'obtenir.

Pour conclure ce chapitre, une présentation de L'Internet des Objets IoT et l'Internet Industriel des Objets IIoT, permettant de connecter dans un même réseau des équipements ou objets divers grâce à des techniques de communication filaires et sans fil. Cette technique est déployée pour l'usine de future dans le contexte de la 4ème révolution industrielle qui est l'*industrie 4.0*. Nous présenterons aussi, les réseaux et standards de communication dédiés à l'Internet des Objets pour mieux l'adapter au type d'application visée.

1.2 Réseaux industriels filaires

L'industrie a connu différentes révolutions qui se sont succédées d'une manière décalée dans le temps et dans l'espace. Allant de la mécanisation ensuite l'électrification, vers l'automatisation puis l'informatisation des systèmes de production. Cette évolution a montré que pour l'amélioration de la productivité, il ne suffisait pas de maîtriser la gestion de production, ou d'avoir une machine à commande numérique sophistiquée et évoluée, mais il faut faire communiquer tous les éléments constituant un système de production dans sa globalité. Ceci nous amène à présenter les réseaux de communication dans un milieu industriel avec les différents paramètres qui le constituent.

En général, un réseau de communication est composé d'un ensemble de connexion assurant l'acheminement de l'information entre des entités ou des terminaux. Il comprend idéalement : des émetteurs, des récepteurs, un message, et des canaux de transmission. L'emplacement du

réseau, le domaine d'application ainsi que la distance entre les différents terminaux, influencera la nature de la communication. Nous pouvons distinguer trois types de réseaux en fonction des distances entre les équipements :

- Les réseaux longue distance (Wide Area Network) : $> 100\text{km}$.
- Les réseaux métropolitains (MAN) : $> 1\text{km}$.
- Les réseaux locaux (LAN) : $< 1\text{km}$.

Un réseau local industriel (RLI) est un réseau de communication de type (LAN) qui permet de faire communiquer des équipements divers en temps réel. Ces équipements communicants peuvent être des ordinateurs, des capteurs, des automates programmables industriels (API) ou tout autre équipement automatisé.

1.2.1 Architectures d'automatismes industriels

L'évolution de la production industrielle est le fruit direct de l'évolution des réseaux locaux ainsi que les avancées technologiques des systèmes industriels communicants. Les réseaux locaux ne garantissent pas uniquement la transmission de valeurs numériques ou analogiques fournies par les capteurs, bien plus que cela, ils sont chargés de transmettre des informations de plus haut niveau telles que des fichiers ou des requêtes paramétrées issus par exemple d'un superviseur et destinés à une unité de contrôle. C'est la décentralisation des fonctions classiques d'un système de contrôle-commande, que sont la commande locale, la coordination, la surveillance et la supervision.

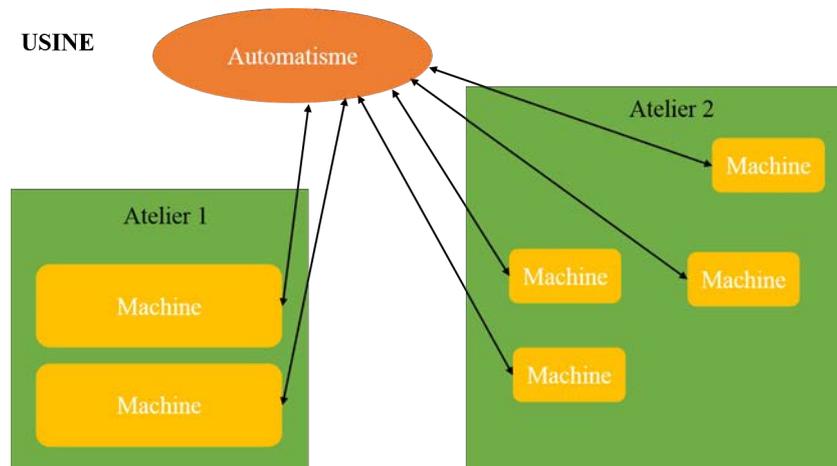


FIGURE 1.1 – Exemple d'automatismes centralisés

Il en découle que les réseaux sont amenés à véhiculer des données de natures et tailles différentes, et surtout dont les contraintes temporelles sont différentes (échanges en temps réel versus ceux à temps différé).

- Les automatismes centralisés :

Au début des années 80, les automatismes s'appuyant sur des API abordaient essentiellement des fonctions séquentielles. Ils géraient et élaboraient des demandes d'exécution d'action tel l'état de l'automatisme ou le positionnement des entrées sorties [1]. Les années d'après, les automatismes centralisés géraient tout un ensemble de fonctions (machines) n'ayant pas forcément d'interaction

entre elles (appartenant à des ateliers différents). De ce fait, pour intégrer une fonction supplémentaire à un automate déjà existant au sein d'une usine, il suffisait de vérifier si cet automate pouvait gérer les entrées-sorties additionnelles et quelle est la capacité de mémoire disponible tel que montré sur la figure (1.1).

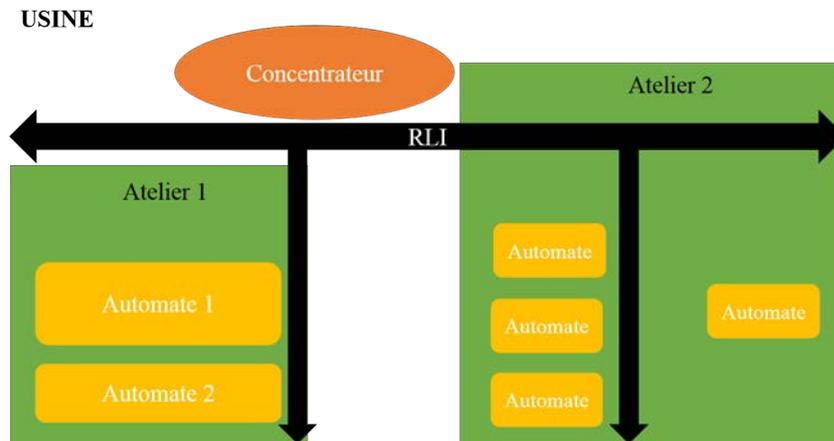


FIGURE 1.2 – Les automatismes décentralisés

Ces automatismes présentaient un certain nombre de contraintes telles l'absence d'autonomie des différents sous-ensembles, la mise en service de la maintenance difficile et complexe du fait de la quantité des Entrées/Sorties (E/S) ou encore l'arrêt de l'ensemble des fonctions gérées par l'API en cas de défaut systèmes de cet API.

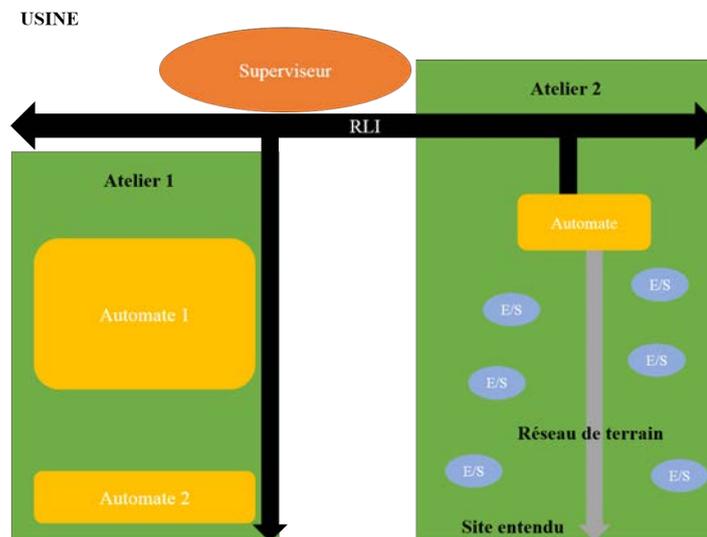


FIGURE 1.3 – La décentralisation des E/S

- Les automatismes décentralisés :

Les automatismes centralisés étant contraints, une proposition d'une nouvelle architecture basée

sur la segmentation de l'automatisme en entités fonctionnelles s'avère nécessaire. C'est ce qui est illustré sur la figure (1.2).

Ceci a permis de simplifier les automatismes en réduisant le nombre d'E/S gérées et ainsi, faciliter le service de la maintenance. Ce découpage nécessitait un besoin de communication entre les entités fonctionnelles de l'automatisme. Ainsi, les constructeurs d'automates ont donc créé des RLI afin d'assurer une communication fiable entre les différents API.

- La décentralisation étendue :

Selon le site de déploiement et pour faire baisser le coût des câbles de liaison, il aurait fallu considérer la topologie des automatismes pour gérer un nombre de points diffus importants et prendre en compte les fonctions des modules. La solution proposée était les réseaux et bus de terrain. Ceux-ci ont permis de gérer dans un premier temps les E/S décentralisés puis la périphérie de l'automatisme comme illustré sur la figure (1.3). Chose qui a rendu accessible les services de diagnostic, programmation, et maintenance sur tout le site [1].

1.2.2 L'informatique et les automatismes industriels

La communication entre le monde de l'informatique et celui de l'automatisme est devenue indispensable pour l'évolution de la productivité des usines. Elle a vite bénéficié des grands standards développés sur les architectures informatiques [1]. D'abord cette communication a été assurée par des liaisons série puis par des produits issus de partenariat entre les constructeurs d'API et les grandes firmes informatiques tels que IBM, HP ou DEC.

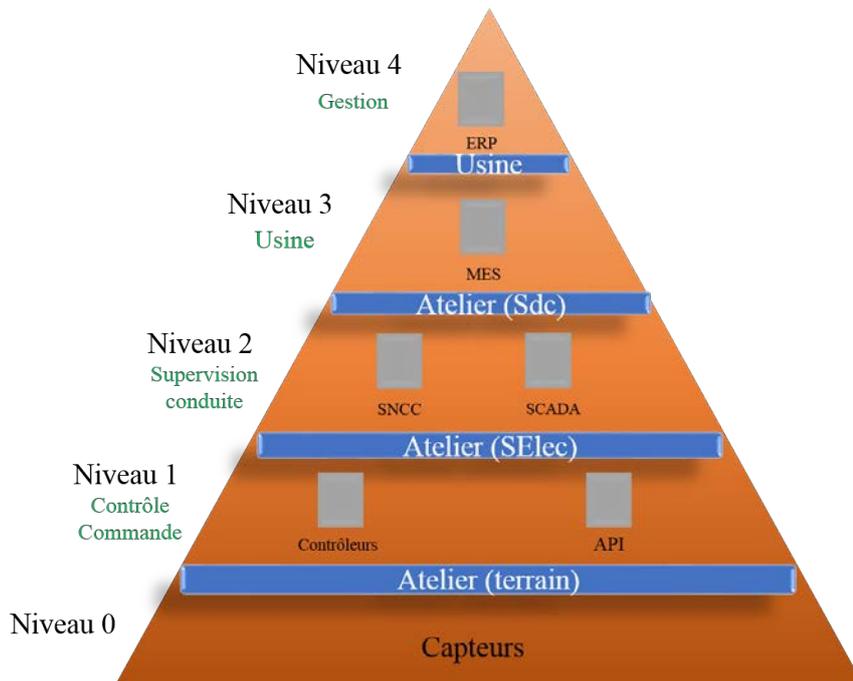


FIGURE 1.4 – Pyramide CIM

Cette combinaison entre l'automatisme et l'informatique demande une adaptation des composants de la structure de communication et des réseaux locaux afin de permettre des échanges performants. Ces réseaux locaux, s'inscrivent donc à différents niveaux au sein d'un agencement

connu sous le nom du modèle CIM classique présenté à la figure (1.4), qui de par l'émergence des technologies de communication (industrielles notamment) donne lieu à une organisation de fonctions autour de réseaux comme montré à la figure (1.5).

Ce modèle (ou pyramide) permet de décrire l'organisation des différents systèmes (Entreprise, usine, atelier, machine..) selon une segmentation verticale de cinq niveaux de communication hiérarchiques [1]. Le sommet de la pyramide est constitué de la gestion, des réseaux d'usine ou entreprise (niveaux 2, 3 et 4) qui déploient les réseaux informatiques et les systèmes de télécommunication pour véhiculer de gros paquets de données. Les niveaux plus bas (niveaux 0 et 1), sont constitués des systèmes d'automatisme qui font appel aux RLI pour acheminer l'information binaire à petit volume. Le CIM ne résout donc pas la problématique de la gestion d'achalandage

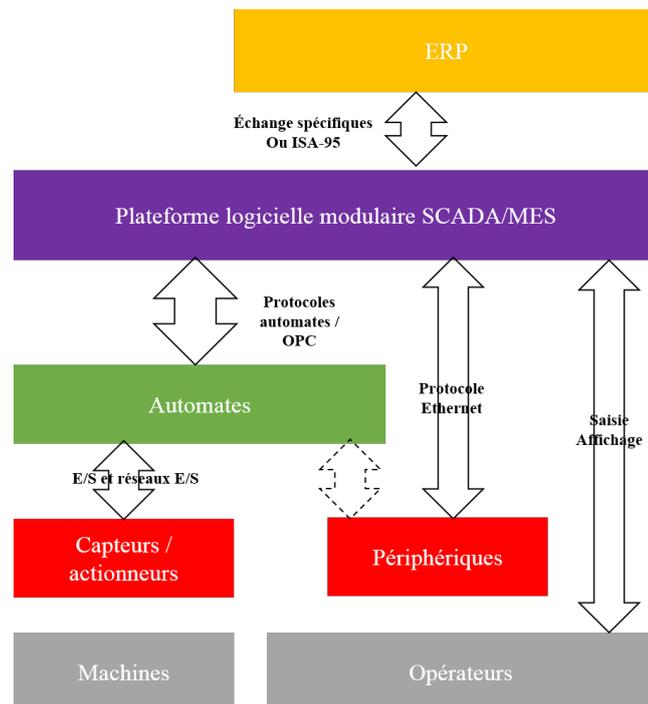


FIGURE 1.5 – Hiérarchie des réseaux industriels

du trafic sur les médiums. Il permet par contre de structurer les différentes fonctions dans l'entreprise pour une meilleure estimation des besoins et de l'importance des flux de données pour attribuer la solution de communication la plus optimale pour chaque niveau de la pyramide. Les performances des réseaux doit être adaptée en fonction des niveaux du CIM sur lesquels ceux-ci seront positionnés.

1.2.3 La communication sur les réseaux locaux industriels

La pyramide CIM a contribué à la segmentation de l'automatisme en quatre niveaux : niveau machine, niveau cellule ou atelier, niveau usine, et niveau entreprise. Pour mieux comprendre la hiérarchie des RLI, nous allons présenter ci après, un descriptif expliquant chaque niveau de communication avec les différents paramètres physiques le constituant.

Le niveau terrain ou machine (niveau 0 et 1) : Ce sont les niveaux les plus bas, qui contiennent les équipements de fabrication tel que les capteurs, les actionneurs ou les machines automatisées.

Le niveau atelier ou cellule (niveau 2) : Ce niveau contient plusieurs îlots de fabrication ; de supervision, des robots, des automates,...etc

Le niveau usine (niveau 3) : C'est le niveau qui englobe des tâches de gestion de la production tel que l'ordonnancement et suivi de la production, le contrôle de fabrication, la conception assistée par ordinateur ainsi que le contrôle de qualité.

Le niveau entreprise (niveau 4) : A ce niveau, nous trouvons des services de gestion tel que la gestion des ressources, gestion financière et commerciale.

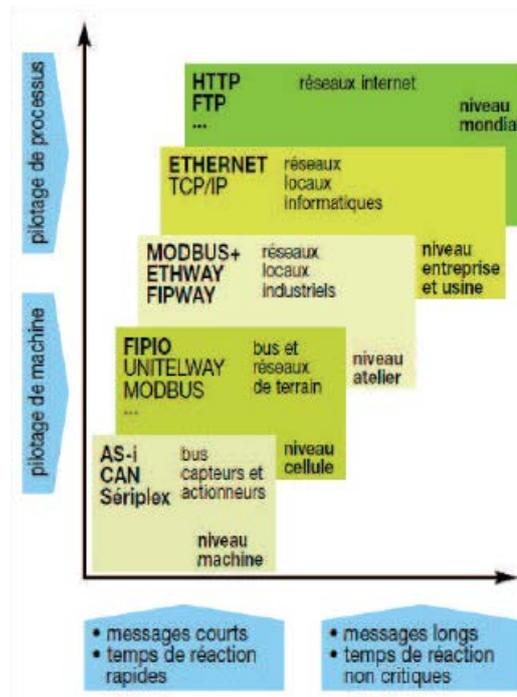


FIGURE 1.6 – Niveaux du modèle CIM et leurs réseaux correspondants [1]

A chaque niveau dans un milieu industriel, correspond un réseau permettant de relier ces différents éléments. Entre deux niveaux différents il doit y avoir une passerelle si les deux réseaux sont hétérogènes comme le montre la figure (1.6). On distingue donc trois types de réseaux :

- **Les réseaux de terrain** : Ils sont constitués des réseaux appelés "bus capteurs et actionneurs" et des réseaux de commande individuelle des machines. Ils connectent les capteurs, les actionneurs et tout autre automate du terrain et machine. Ils doivent fournir les mêmes services que les systèmes d'E/S industrielles et d'autres plus importants tel la synchronisation pour faciliter la distribution des applications. Les bus capteurs et actionneurs ont pour principal objectif de réduire les coûts de câblage ainsi que de faciliter l'exploitation et la maintenance des équipements d'automatisme industriel connecté. Les bus les plus utilisés à ce niveau sont les bus CAN, AS-i et Interbus. Pour la commande des machines, les bus les plus couramment utilisés sont les bus FIP, Profinet, Profibus et Unitelway [1].

- **Les réseaux d'atelier** : Connectent dans un atelier ou une cellule, les modules de commande de robots, de maintenance et de contrôle de la qualité. Ils permettent d'avoir une communication entre l'automatisme et le monde informatique. Les bus utilisés pour ces réseaux sont les bus Modbus+, Fipway et Ethway.

- **Les réseaux d'usine** : Ce sont des réseaux locaux informatiques qui relient l'ensemble de l'usine. Les plus couramment utilisés sont Ethernet, TCP/IP et WiFi.

Les besoins en communication sont très diversifiés selon les équipements connectés et les applications qu'ils supportent ce qui explique que les réseaux locaux industriels sont nombreux et variés. Le trafic au niveau des réseaux de terrain n'est pas le même que celui des réseaux d'atelier ou d'usine. Les besoins diffèrent selon la taille des données à transmettre et les contraintes de temps associées. Les flux d'échanges de données provenant du bas des architectures ne cessent de croître. Ceci nécessite d'augmenter les capacités de traitement des composants d'automatisme. Il devient donc obligatoire d'augmenter les capacités et les performances des réseaux de communication essentiellement sur le bas des architectures et de développer au maximum une communication horizontale. Il n'est pas envisageable aujourd'hui de limiter cette course à la performance, le modèle CIM devient donc dépassé dans sa formulation actuelle et il faut repenser à ce concept.

1.3 Exigences des communications sur les réseaux locaux industriels

Le milieu industriel où doivent opérer les réseaux industriels, a des besoins très particuliers du point de vue temporel, de partage de données et de fiabilité de l'information. Ces besoins nécessitent d'être pris en charge au niveau physique ainsi qu'au niveau des liaisons et protocoles. Au niveau physique, les RLI doivent être dotés de matériels robustes et résistant aux perturbations tel que les câbles et les connecteurs blindés. Les moyens de communication utilisés à chaque niveau doivent répondre en terme de débit aux besoins de ce niveau. En ce qui concerne les protocoles de communication, il faut choisir des protocoles déterministes qui garantissent la livraison des données dans des délais connus pour pouvoir répondre aux exigences du temps réel [2].

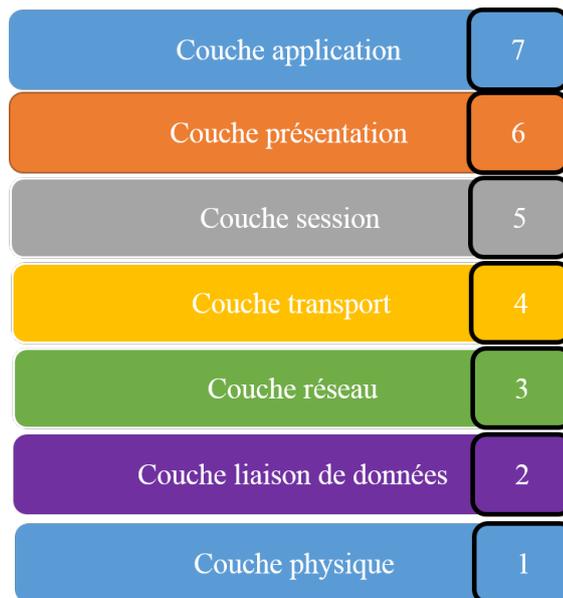


FIGURE 1.7 – Le modèle OSI

1.3.1 Le modèle OSI et les RLI :

Le modèle OSI (Open Systems Interconnection) régit la communication entre deux systèmes informatiques selon sept niveaux et permet d'élaborer des normes d'interconnexion et de coopération de systèmes répartis comme le montre la figure (1.7). Il est applicable à tous types de réseaux et est divisible en deux catégories : la première constituée des couches 1 à 4, offre les services de communication en permettant le transfert des données. La seconde, constituée des couches 5 à 7, fournit des services d'accès à la communication pour différents types d'applications. A chacun des sept niveaux du modèle, les données sont encapsulées en ajoutant une entête et une fin de trame comportant les informations nécessaires suivant des règles définies par le protocole réseau employé. Malgré la clarté du modèle OSI, il a montré dès ses premières applications une lour-

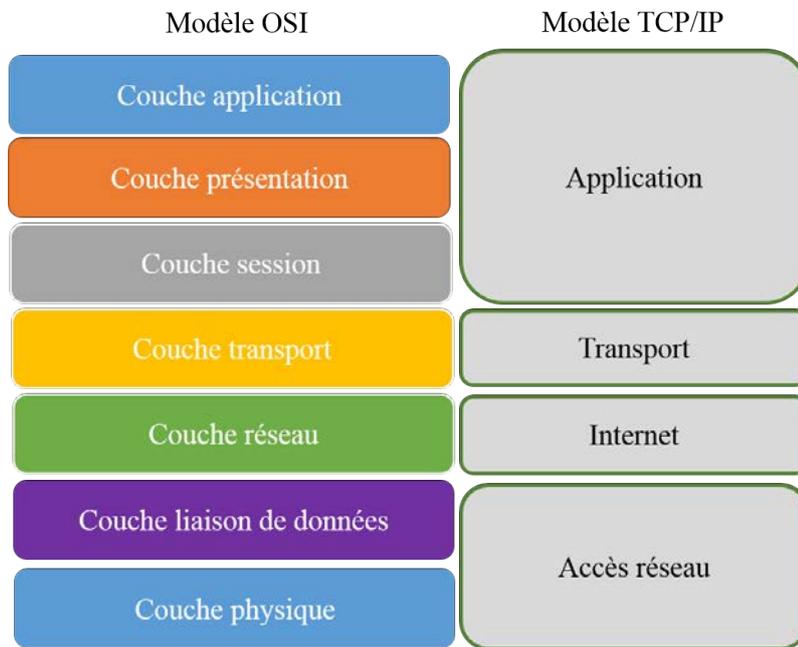


FIGURE 1.8 – Modèle OSI réduit

deur et une latence assez remarquables pour les communications industrielles, vu la complexité de certaines couches et l'inutilité d'autres. Des versions réduites sont rapidement apparues pour résoudre ces problèmes afin de ne garder que l'essentiel des couches OSI. De ce fait, les couches réseau, transport, session et présentation vont être éliminées pour ne garder que la couche physique, liaison et la couche d'application tel que illustré sur la figure (1.8). Brièvement, la couche physique permet d'adapter les signaux numériques au support de transmission. La couche liaison se charge de rendre les échanges de données entre deux stations le plus fiable possible et la couche application, donne aux processus d'application le moyen d'accéder à l'environnement OSI.

1.3.2 Aspects de la couche physique :

La couche physique est chargée de la transmission effective des signaux (électriques ou optiques) entre les interlocuteurs. La transmission de données est limitée à l'émission et à la réception d'un bit ou d'un train de bits continu. Les propriétés importantes de cette couche sont : la topologie, le support de transmission, le taux de transmission de données, la longueur maximale

et la robustesse contre les perturbations physiques.

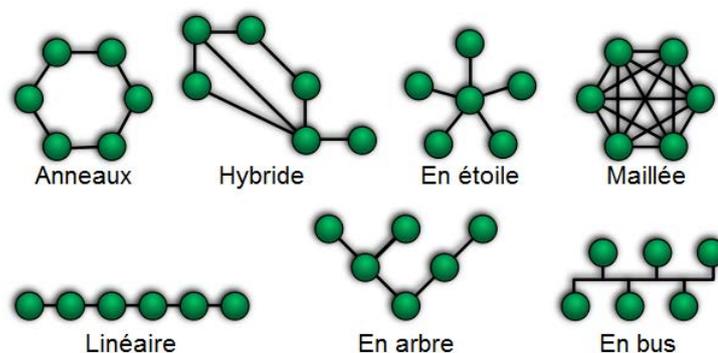


FIGURE 1.9 – Les différentes topologies de réseaux

A. La topologie des réseaux :

La topologie d'un réseau est caractérisée par son système de câblage. Elle peut définir la façon dont les équipements sont interconnectés et la représentation spatiale du réseau comme le montre la figure (1.9).

- Point à point :

C'est la forme des réseaux la plus basique qui implique deux équipements. Elle représente en général la topologie d'une partie d'un réseau pour réaliser une liaison série ayant des vitesses limitées par la distance. La fibre optique peut compenser cette faiblesse.

- Topologie étoile :

Dans une topologie de réseau en étoile, les équipements du réseau sont reliés à un système matériel central (le nœud). Celui-ci a pour rôle d'assurer la communication entre les différents équipements du réseau. Cette topologie correspond soit au câblage par étoile passive soit à celui d'un autocommutateur privé ou à un Hub. Le nœud central est une unité de distribution dont le bon fonctionnement est indispensable à la communication. Cette dernière correspond à une partie de réseau dans la mesure où les équipements sont peu nombreux car le coût de câblage devient vite prohibitif et les performances douteuses. Les câbles utilisés sont les paires torsadées et fibres optiques. Ce type d'architecture "structurée" se rencontre en industrie avec quelques adaptations de façon à ce que sa gestion soit souple et décentralisée. L'inconvénient majeur de cette architecture est sa mise en œuvre lourde qui nécessite un câble pour chaque équipement avec des longueurs différentes.

- Topologie en bus :

C'est la topologie la plus commune aux réseaux locaux du fait qu'elle est plus économique. Les industriels préfèrent en général cette topologies pour laquelle chaque nœud est raccordé au bus par l'intermédiaire de modules de dérivation actifs ou passifs selon le protocole du réseau. Les réseaux en bus posent par contre des problèmes de collision quand deux utilisateurs veulent transmettre des données au même moment sur le bus. Les systèmes qui utilisent une topologie en bus ont normalement un arbitre qui gère l'accès au bus.

- Topologie en arbre :

Dans une topologie en arbre, il existe un hôte principal à la tête du réseau. Cet hôte est lui-même

connecté à n autres. Ces n autres sont eux connectés à y autres hôtes etc ... L'inconvénient majeur avec cette topologie, c'est que si un câble est brisé, tous les ordinateurs connectés qui se trouvent en dessous sont paralysés. C'est une variante de la topologie en étoile avec les mêmes faiblesses.

- Topologie en anneaux :

Pour cette topologie, chaque nœud est relié à ses voisins en formant une boucle fermée et a un rôle actif dans la propagation des échanges. Cette structure est aussi bien adaptée aux réseaux locaux, en particulier si l'on recherche la disponibilité. La communication sera garantie même si les liens entre les nœuds est rompue. Chaque nœud a la possibilité de re-générer le signal et la structure s'adapte facilement à l'utilisation de la fibre optique, les distances de couverture pouvant être grandes.

- Topologie en maille :

La topologie maillée, classiquement utilisée par les réseaux WAN est une topologie de type étoile mais avec différents chemins pour accéder d'un nœud à un autre. C'est la méthode utilisée sur Internet : pour un transfert entre deux points, chaque nœud (un routeur intelligent) va sélectionner en temps réel la route la plus rapide pour le transfert. Le principal avantage de ce type de topologie est l'adaptabilité : une ligne coupée ne perturbe pas les communications d'où son utilisation dans les réseaux sensibles. Son inconvénient est la difficulté technique liée aux concentrateurs dans chaque nœud.

- Topologie hybride :

Dans une topologie hybride, plusieurs topologies sont combinées pour former un modèle de réseau complexe afin de bénéficier des avantages de chacune. Deux types de topologies hybrides sont fréquemment utilisés : la topologie étoile/bus et la topologie étoile/anneau.

De façon général, les industriels préfèrent des topologies en bus ou en anneau. Pour les bus, le coaxial épais est privilégié pour faire face aux perturbations électromagnétiques. Les réseaux en anneau peuvent être mis en œuvre avec n'importe quel support (fibre optique, cuivre ou coaxial).

B. Les supports de communication :

Les liaisons en milieu industriel sont souvent soumises à des perturbations extrêmes. Le choix des composants utilisés et plus particulièrement les supports de transmission est donc essentiel. Pour les liaisons filaires, les supports les plus utilisés sont le câble coaxiale, la paire torsadée et la fibre optique. Les câbles utilisés en industrie sont renforcés selon leur utilisation ainsi qu'aux conditions aux quels sont exposés tel que les variations de température, les chocs, les produits chimiques et bien d'autres perturbations. On retrouve deux types de câbles ; le câble fin qui n'est presque plus utilisé et le câble épais qui est peu sensible aux perturbations électromagnétiques. Certains types de paires torsadées peuvent être également utilisées en milieu industriel. Celles qui sont blindées sont utilisées en milieu perturbé. La fibre optique est utilisée en présence de fortes perturbations dues aux champs électromagnétiques et lorsque des hauts débits d'information sont nécessaires. Aussi, lorsque les informations à transmettre doivent être transportées sur des grandes distances.

La grande avancée des technologies sans fil a offert aux industriels de nouvelles possibilités d'avoir plus d'accessibilité à l'information et une réduction significative du coût lié à l'installation des réseaux. Le choix du réseau à déployer, filaire ou sans fil, dépend de l'application, du débit à transmettre, ainsi que l'environnement du déploiement. Dans ce travail de thèse, nous allons

nous intéresser à la communication dans le milieu industriel via le support de transmission sans fil. Nous présenterons dans le paragraphe suivant un aperçu sur les réseaux sans fil avec leurs avantages et défis pour un meilleur déploiement.

1.4 Évolution des réseaux industriels vers une communication sans fil

Les installations dédiées à la technique des procédés se caractérisent souvent par des structures réparties sur des surfaces étendues. L'acquisition des données d'E/S, tel que les températures, la pression et les niveaux de remplissage entraîne souvent des dépenses considérables liées aux distances à couvrir ou à l'inaccessibilité du site. Au contraire, les installations d'automatisation de la fabrication sont généralement limitées dans l'espace. Les distances à couvrir sont de l'ordre de quelques centaines de mètres. Les applications sont hautement dynamiques et nécessitent une rapidité d'adaptation pour basculer d'une application à l'autre. La technologie WLAN est utilisée pour gérer ces applications. En réseaux de terrain, et pour les parties d'installation fixes, les signaux radio peuvent remplacer les E/S pour un système de réseau de terrain établi. Une transmission rapide des informations d'E/S en quelques millisecondes est garantie. La principale condition à l'utilisation des technologies sans fil dans un milieu industriel est qu'elles fonctionnent dans un environnement difficile sans erreurs et aussi fiable qu'une communication filaire. En communication sans fil, les données sont transmises via des ondes électromagnétiques. D'où l'exposition des signaux radios aux interférences électromagnétiques pouvant être destructives pour les signaux d'information utiles. Malgré ces perturbations, plusieurs technologies sans fil sont déployées en milieu industriel pour acheminer l'information d'une manière fiable et rapide grâce à leur conception spatiale.

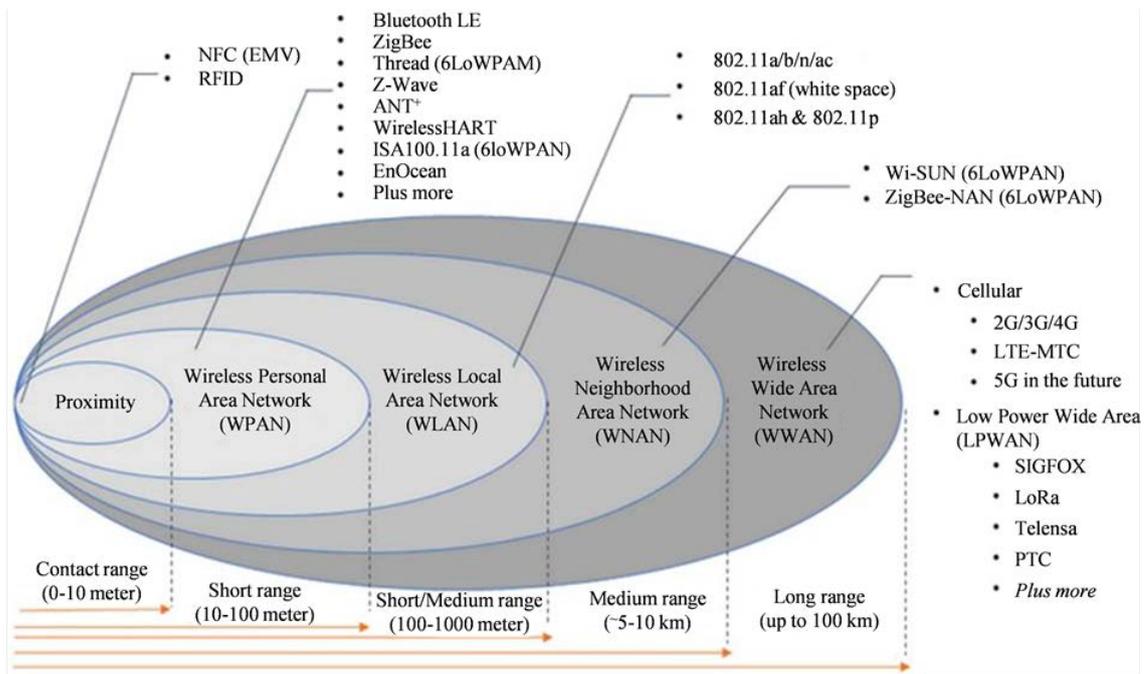


FIGURE 1.10 – Technologies de communication sans fil industrielles [13]

L'exploitation des ondes électromagnétiques pour la transmission des signaux élimine certaines contraintes au niveau des réseaux. Par exemple, la suppression des câbles élimine tous les problèmes liés à l'usure et au vieillissement de ceux-ci. Aussi, ça permet d'éliminer les usures des contacts entraînées par les connexions et déconnexions fréquentes dans le cas des équipements automatisés mobiles. Des câbles de données hautement flexibles pour se connecter à un réseau sont utilisés pour connecter des systèmes montés sur rail ou des véhicules autonomes guidés. L'utilisation de ces matériels implique une hausse globale du coût de l'installation.

La transmission sans fil permet aussi de couvrir des zones pour lesquelles il s'avérerait difficile, voire même impossible de les connecter par câble. L'utilisation de la technologie sans fil s'annonce donc intéressante pour un grand nombre d'applications telles que la maintenance, le contrôle ou la gestion de stock en permettant de réaliser de nouvelles économies tout en apportant davantage de flexibilité en autorisant une liberté totale de mouvement. Ainsi, le passage au sans fil doit apporter un grand gain lié à l'amélioration des processus existants ou à la création de services additionnels. Certaines technologies sans fil sont mieux adaptées aux communications dans le milieu industriel malgré les fortes perturbations. Pour les applications industrielles, la bande de fréquences la plus utilisée est l'ISM (Industriel, Scientifique et Médical). C'est une bande à utilisation libre à travers le monde opérant à la fréquence 2.4 GHz. Pour cette raison si qu'en automatisation et applications industrielles en général, cette bande est la plus exploitée. Ces bandes, bien que d'utilisation gratuite, imposent des taux d'émission maximum, ainsi que des puissances d'émission à ne pas dépasser. De plus, il est nécessaire de partager la bande avec d'autres systèmes de transmissions, générant ainsi des interférences.

Les standards de communication sans fil appliqués en milieu industriel et illustrés à la figure (1.10), varient selon les applications, la portée et les équipements utilisés. Pour les réseaux personnels sans fil WPAN à une faible portée, des technologies telles que le Bluetooth, le WirelessHART et le ZigBee sont déployées [3]. Les réseaux locaux sans fil WLAN à faible et moyenne portée utilisent la norme IEEE 802.11 communément appelée Wi-Fi. Et les réseaux à longue portée WWAN déploient les réseaux cellulaires et Low Power Wide Area LPWAN. Une revue de ces différentes technologies et standards de communication sans fil sera présentée dans les paragraphes suivants.

1.4.1 Trusted Wireless :

Trusted Wireless a été spécialement développée pour la transmission fiable de données et signaux sur de grandes distances dépassant des dizaines de kilomètres à 2.4 GHz. La nouvelle version 2.0 se caractérise par la dispersion du spectre et la gestion de la coexistence. Le débit binaire des données varie entre 16 à 500 KBit/s sur des réseaux maillés comprenant un maximum de 250 nœuds. Cela implique de mettre en réseau par radio des appareils Ethernet en toute fiabilité, sur des distances pouvant atteindre 35 km. Les répéteurs permettent même des distances supérieures. La transmission radio est parfaitement transparente dans le réseau, et tous les protocoles courants IPv4, comme Modbus-TCP, PROFINET ou Ethernet/IP, sont pris en charge.

1.4.2 Bluetooth :

Cette technologie radio normalisée selon le standard IEEE 802.15.1 a été créée en 1994 et est caractérisée par des transmissions de données extrêmement fiables. Elle offre la possibilité de coexistence dans un réseau radio inconnu avec un fonctionnement en parallèle de nombreux systèmes Bluetooth grâce à une utilisation efficace des fréquences. Sa portée peut atteindre 200 m

avec une fréquence de 2.4 GHz. Le Bluetooth est généralement la technologie sans fil adaptée pour assurer une transmission rapide et fiable de données d'automate dans des conditions industrielles rudes. Le mode opératoire du Bluetooth garantit une liaison sans fil à la fois stable et fiable qui se configure rapidement et facilement. Elle s'est imposée comme la solution de communication pour la transmission de données Ethernet et PROFINET vers des parties de machine en mouvement, et plus particulièrement dans le secteur de la construction de machines et d'installations.

1.4.3 WirelessHART :

La technologie WirelessHART est la première technologie sans fil dédiée à la commande et à la surveillance dans l'industrie des procédés. Ce standard a été développé par la HART Communication Foundation afin de répondre aux besoins des réseaux sans fil déployés dans les installations de procédés industriels [4]. WirelessHART est normalisé selon IEEE 802.15.4 et opère aussi à une fréquence de 2.4 GHz. Il se caractérise par sa simplicité, sa fiabilité et sa sécurité contre les écoutes et manipulations. Il a de multiples passerelles vers d'autres réseaux tels : HART/Ethernet, HART/Profibus et assure une excellente interopérabilité avec les autres réseaux (Ethernet, Profibus, ControlNet, ...). La figure (1.11) ci-dessous montre un exemple de connectivité d'un réseau WirelessHART.

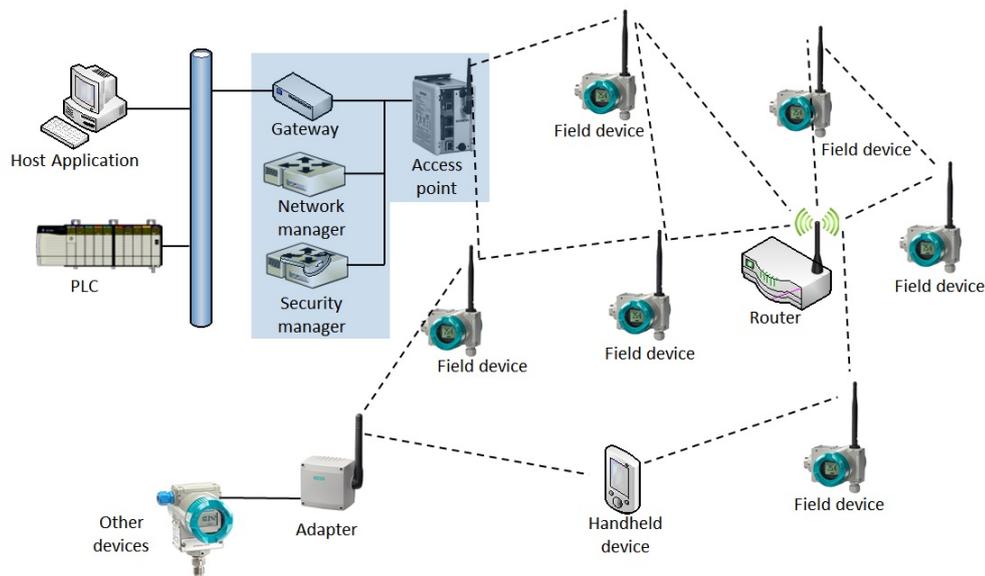


FIGURE 1.11 – Exemple d'un réseau WirelessHART [4]

1.4.4 ZigBee :

La technologie ZigBee, connue aussi sous le nom IEEE 802.15.4, permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégrée dans de petits appareils électroniques [4]. La technologie ZigBee, opérant sur la bande de fréquences des 2.4 GHz et sur 16 canaux, permet d'obtenir des débits pouvant atteindre 250 kbit/s avec une portée maximale de 100 m environ. Ceci permet de positionner cette technologie parmi les meilleures pour la domotique, les télécommunications, les réseaux de capteurs ou les équipements de contrôle dans le secteur industriel.

1.4.5 EnOcean :

EnOcean est le seul protocole radio Ultra Low Power standardisé et bénéficiant d'un très large écosystème. Cette technologie est connue sous le slogan "Sans fil, sans pile et sans limite" permet de simplifier l'installation et la maintenance des systèmes domotiques et l'automatisation industrielle. Cette technologie utilise une fréquence de 868 MHz en Europe et 902 MHz en Amérique avec une portée de 300 m sans obstacles et 30 m à l'intérieur d'un bâtiment. Les produits EnOcean peuvent être utilisés de manière autonome et décentralisée (un interrupteur et une prise par exemple) ou bien à l'aide d'une centrale ou passerelle (gateway) domotique de manière centralisée. Les passerelles permettent d'ouvrir l'accès au réseau EnOcean au monde extérieur (internet, réseau local).

1.4.6 WLAN IEEE 802.11 (WiFi) :

Le WiFi est une norme radio opérant aux fréquences 2.4 GHz ou 5 GHz selon le standard 802.11 a/b/g/n pour réaliser des réseaux locaux sans fil. Ces extensions se différencient de par leur couche physique et/ou leur méthode d'accès au médium. WiFi se caractérise par des débits d'information élevés pouvant atteindre 54 Mbits/s ou 300 Mbits/s et une mobilité des équipements au sein de réseaux de grande portée. C'est une technologie très fiable grâce à la technique spatio temporelle à antennes multiples MIMO (Multi-Input Multi-Output). Grâce au WiFi on peut compléter un réseau local câblé (LAN) par une partie sans fil WLAN, voire se passer entièrement du support filaire.

Ethernet est de plus en plus présent dans l'industrie y compris au niveau terrain où les différentes solutions Ethernet industriel remplacent progressivement les bus de terrain conventionnels. En effet les communications sans fil sur bus de terrain sont souvent possibles mais non standardisées. Pour Ethernet, les solutions sans fil sont parfaitement normalisées et les différents équipements WiFi sont interopérables et largement disponibles. En industrie le WiFi est utilisé pour connecter des équipements par voie sans fil tel : Ethernet, MODBUS/TCP, PROFINET, ou pour connecter des équipements série (RS232, RS422...) entre eux. Cette technologie ne va pas remplacer toutes les liaisons câblées mais sa standardisation, sa flexibilité, sa performance et son coût attractif permettent sans aucun doute à étendre son champ d'application dans l'industrie.

1.4.7 Réseaux cellulaires (2G/3G/4G, LTE) :

Le réseau cellulaire de 1ère génération des téléphones mobiles 1G a été utilisé en début des années 80 en offrant une qualité de transmission bonne mais à un débit insuffisant pour l'envoi de gros paquets de données. De plus, la sécurité des données n'était pas garantie, et le coût du déploiement très élevé. Il fallait penser à une nouvelle technologie, d'autant plus que le besoin de mobilité était trop important.

A. GSM :

Le réseau GSM (Global System for Mobile communications) constitue au début du 21ème siècle le standard de téléphonie mobile le plus utilisé en Europe. Il s'agit d'un standard de téléphonie de deuxième génération (2G) où les communications fonctionnent selon un mode entièrement numérique [5]. En Europe, le standard GSM utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz. Aux Etats-Unis par contre, la bande de fréquences utilisée est la bande 1900 MHz. Ainsi, on qualifie de tri-bande les téléphones portables pouvant fonctionner en Europe et aux Etats-Unis et de bi-bande ceux fonctionnant uniquement en Europe. La norme GSM autorise un débit

maximal de 9,6 kbit/s, ce qui permet de transmettre la voix ainsi que des données numériques de faible volume, par exemple des messages textes (SMS) ou des messages multimédias (MMS). En industrie, le GSM est utilisé pour la commande, le contrôle et la télésurveillance des machines via l'envoi et la réception de messages SMS.

B. GPRS :

Le standard GPRS (General Packet Radio Service) est une évolution de la norme GSM, appelée généralement le 2.5G pour le classer. Le GPRS permet d'étendre l'architecture du standard GSM, afin d'autoriser le transfert de données par paquets, avec des débits théoriques maximums de l'ordre de 171,2 kbit/s (en pratique jusqu'à 114 kbit/s). Grâce au mode de transfert par paquets, les transmissions de données n'utilisent le réseau que lorsque c'est nécessaire. Le standard GPRS permet donc de facturer l'utilisateur au volume échangé plutôt qu'à la durée de connexion, ce qui signifie notamment qu'il peut rester connecté sans surcoût. Le GPRS industriel est utilisé pour la surveillance des machines et installations en envoyant automatiquement par SMS, e-mail et GPRS l'état des applications. Ce qui permet de minimiser les temps d'immobilisation et optimiser les processus.

C. EDGE :

Le standard EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution.) est une évolution de la norme GSM en modifiant le type de modulation. Tout comme la norme GPRS, le standard EDGE est utilisé comme transition vers la troisième génération de téléphonie mobile (3G). EDGE utilise la modulation 8-PSK (Phase Shift Keying), ce qui implique une modification des stations de base et des terminaux mobiles utilisés par le GSM. Cette technologie permet ainsi de multiplier par un facteur de 3 le débit des données avec une couverture plus réduite. Les débits peuvent donc atteindre 384 kbit/s pour les stations fixes et 144 kbit/s pour les stations mobiles. En industrie, cette technologie permet une surveillance par transmission vidéo et images haut débit. Toutefois, elle n'est idéale que pour une surveillance temporaire à distance sur des périodes programmables par le biais d'un détecteur de présence ou contacteur de porte relié à une alarme.

D. 3G/4G(LTE) :

La 3G représentée principalement par l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), repose sur un autre système moins déployé, car nécessitant la mise en œuvre de nouvelles infrastructures, mais plus rapide [6]. En effet, alors que l'EDGE offre un débit de 120 kbit/s, la 3G peut atteindre 250 kbit/s. C'est pourquoi elle est considérée comme la technologie de la visioconférence et de l'accès à la télévision. Les applications telles que la vidéo-surveillance qui était déjà possible sur GPRS, bénéficie grâce à l'UMTS d'un gain substantiel en débit et en qualité d'image. La quatrième génération de réseau mobile 4G quant à elle utilise la norme LTE (Long Term Evolution), nettement plus performante que les normes UMTS du réseau 3G, et propose un débit de 150 Mbit/s. Elle fait entrer la téléphonie mobile et ses utilisateurs dans une nouvelle dimension avec, notamment, une connexion très rapide à Internet grâce à l'utilisation des antennes multiples. La 4G+, utilise, elle, la norme LTE Advanced, version améliorée de la LTE, et offre un débit théorique de 1Gbit/s.

E. 5G :

La technologie 5G pourrait permettre des débits de télécommunication mobile, de plusieurs gigabits de données par seconde, soit jusqu'à mille fois plus rapide que les réseaux mobiles en 2013 et jusqu'à 100 fois plus rapide que la 4G à l'horizon 2020. Le but est de connecter non seulement les smartphones et les tablettes mais plus globalement l'ensemble des objets. Pour le moment, la 5G n'en est qu'à ses débuts.

Les réseaux de communication mobiles ne cessent de se développer et de croître. Leur déploiement dépendra des applications et activités à réaliser. Pour les applications industrielles, les capteurs ou actionneurs sont les systèmes clés de la communication. Situés en bas de la pyramide CIM, ils permettent la collecte des données pour faciliter l'échange d'information tout en minimisant l'utilisation des câbles. Un aperçu sur ces réseaux avec les différentes applications sera présenté ci-dessous.

1.5 Les réseaux de capteurs

La communication inter-machines permet l'échange d'information entre leur différentes entités telles que les capteurs, actionneurs ou des robots. Cet échange consiste à collecter de l'information provenant de différentes sources afin de l'acheminer vers les destinataires. Ceci s'inscrit dans un réseau auto-organisé ne nécessitant pas d'infrastructure fixe, et qui utilise des algorithmes permettant de maintenir une connectivité maillée ou hiérarchique. Le principal avantage d'un tel réseau est sa capacité d'offrir des services robustes, dont la maintenance est facile en un minimum de temps et à faible coût de déploiement. Durant ces dernières années, les avancées technologiques ont permis un grand nombre de conception et d'implémentation de ces réseaux ayant pour objectif de faciliter l'accès à plusieurs applications jusqu'alors inaccessibles faute de lourdeur d'infrastructure.

Les réseaux de capteurs, sans fil plus particulièrement, offrent la possibilité d'échanger des informations, de les traiter mais également de les transmettre [7]. Ils sont constitués d'un ensemble de capteurs, possédant des ressources limitées, mais qui leur permettent néanmoins d'acquérir des données, de les traiter et de les communiquer via des liaisons radio. Chaque capteur analyse son environnement, et envoie les données récoltées aux capteurs appartenant à sa zone de couverture. Les capteurs de relai re-transmettent l'information sur leur propre région de couverture, ce qui permet une couverture entière du réseau. Depuis presque 30 années, les solutions d'amélioration apportées aux capteurs et leur réseaux ne cessent de croître. Leurs objectifs sont la minimisation de la taille et le nombre des messages générés par le réseau ainsi que l'énergie nécessaire pour les transmettre tout en garantissant la fiabilité de l'information échangée. Une optimisation matérielle et logicielle est requise dans ce sens, ainsi que l'amélioration des algorithmes de routage et les méthodes d'accès au canal.

1.5.1 Domaines d'application des réseaux de capteurs

Grâce à la grande avancée réalisée dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, leurs utilisations ont rendu plusieurs applications plus fiables, plus rapides et à moindre coût. Leur déploiement est efficace surtout pour une collecte de données à temps réel. Citons ci-dessous quelques domaines d'application.

- Applications militaires :

Comme pour toutes les technologies de pointes, la première utilisation des réseaux de capteurs a été à des fins militaires. La surveillance de territoire ou de frontière ainsi que l'intervention sur

les champs de bataille ont suscité la création des réseaux miniaturisés de capteurs [8].

- **Applications environnementales :**

Les réseaux de capteurs sont utilisés pour surveiller les changements environnementaux et climatiques [9]. Ils retracent l'activité des volcans, tremblement de terre et lancent un avertissement en cas des feux de forêt.

- **Applications médicales :**

Les capteurs peuvent être implantés dans ou sur le corps pour surveiller l'état de santé d'un patient [10]. Ils servent aussi au diagnostic de certaines pathologies ou maladies à l'aide de mesures physiologiques mesurées telles que la pulsation cardiaque, la tension artérielle ou la température.

- **Applications en domotique :**

Les capteurs détectent et captent toute information utile pour assurer le confort et la sécurité dans une maison.

- **Applications en agriculture :**

L'humidité du sol, le taux de remplissage des bassins ou autres paramètres sur la culture sont facilités par l'utilisation des capteurs afin de réussir l'irrigation.

- **Applications industrielles :**

En industrie, les capteurs peuvent remplacer les puces RFID (Radio Frequency IDentification – Technologie d'identification automatique) pour contrôler les stocks et les flux des produits, aussi pour surveiller des équipements. Ils permettent une meilleure optimisation de la chaîne de production et facilitent l'accès à l'information en temps réel [11]. Dans ce travail de thèse, nous nous concentrons plus particulièrement sur ce type d'application.

1.5.2 Caractéristiques des réseaux de capteurs

Selon l'application choisie, un réseau de capteurs sans fil peut contenir différents types de nœuds de communication [12].

- Un **nœud régulier** est un nœud composé d'une unité de transmission et d'une unité de traitement de données. La partie transmission de données est responsable de tous les échanges (émissions et réceptions) de données via un support de communication sans fil. L'unité de traitement de données qui sont fournies par l'unité de transmission est composée d'une mémoire, d'un microcontrôleur et d'un système d'exploitation spécifique (comme TinyOS). Ces deux unités sont alimentées par une batterie embarquée.

- Un **nœud capteur** nommé aussi nœud source est un nœud régulier équipé d'une unité d'acquisition ou de détection. L'unité d'acquisition est généralement munie d'un ou plusieurs capteurs qui acquièrent des mesures physiques (analogiques) et d'un convertisseur Analogique/Numérique pour convertir l'information relevée en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

- Un **nœud actionneur** est un nœud régulier doté d'une unité lui permettant d'exécuter certaines tâches spécifiques comme la mobilité, le pilotage d'un automate, le démarrage d'une machine, etc ...

- Un **nœud puits** est un nœud régulier muni d'un convertisseur série connecté à une seconde unité de communication (GPRS, Wi-Fi, WiMax, etc.). La seconde unité de communication fournit une retransmission transparente des données provenant de nœuds capteurs à un utilisateur final ou d'autres réseaux comme internet.

- Un **nœud passerelle** (ou gateway) est un nœud régulier permettant de relayer le trafic dans le réseau sur le même canal de communication.

L'application pour laquelle le réseau de capteurs est déployé peut inclure un système mobile porteur d'un ou plusieurs nœuds du réseau. Ce réseau exploite à son avantage la capacité d'une

ou plusieurs liaisons sans fil afin de réaliser facilement une liaison entre un mobile et une partie fixe. La topologie physique des réseaux de capteurs est changeante et dépend de la localisation du mobile et du modèle de déploiement (aléatoire ou déterministe). Les quatre topologies utilisées sont la topologie à plat (ou non organisée), la topologie en cluster, la topologie en arbre et celle en chaîne.

L'envie de développer et d'améliorer de nouvelles applications, la domotique, les services municipaux ou applications industrielles à titre d'exemple, a entraîné de nouvelles contraintes. Les capteurs sans fil peuvent être déployés dans des environnements difficiles et bruités avec des sources d'énergie très limitées. Donc, la contrainte principale, n'est plus la portée ou le débit très élevé comme celui atteint avec les réseaux WLAN, mais plutôt permettre à des petits objets de communiquer entre eux sur des durées de vie très longues. Aussi, ces objets ou capteurs peuvent être contrôlés ou adressés sans intervention directe mais uniquement en utilisant Internet. Ceci nous amène à présenter le nouveau concept qui est Internet des Objets ou IoT (Internet of Things).

1.6 La communication industrielle et le déploiement de l'Internet des Objets

La grande évolution des télécommunications mobiles a amené donc les industriels à envisager la connexion de leurs machines et équipements sur des réseaux sans fil pour proposer de nouveaux services ou améliorer les processus d'exploitation existants. Ainsi, les systèmes industriels communicants existants sont constitués d'une combinaison des réseaux à BUS, Ethernet et quelques solutions sans fil. Une récente émergence de la communication industrielle consiste à introduire le concept de l'Internet des objets IoT et des systèmes Cyber-Physique CPS dans le monde de l'automatisation et de l'industrialisation. Ce concept, connu sous le nom de l'Industrie 4.0 ou usine connectée, s'appuie sur la convergence entre l'industrie et le monde du numérique afin de créer de l'intelligence dans un système manufacturier capable d'une plus grande adaptabilité dans la production et d'une allocation plus efficace des ressources [13].

1.6.1 L'internet des objets IoT

De nos jours, internet connaît une extension inédite avec le développement des objets connectés. Il ne permet plus uniquement aux personnes de communiquer à tout moment et en tout lieu ; mais en plus avec la notion des objets connectés, le monde physique peut désormais communiquer, que ce soit de personnes à personnes, de personnes à objets ou d'objets à objets. C'est ce qu'il a été convenu d'appeler l'internet des objets (IoT) en 1999 par Kevin Ashton, expert en technologie radio-identification RFID (Radio Frequency IDentification). Ce concept naît à l'institut MIT (Massachusetts Institute of Technology) aux États-Unis dans un laboratoire de recherche dédié à la création d'objets connectés à l'aide de l'identification par radiofréquence et les réseaux de capteurs sans fil. L'IoT est en plein essor et connaît un incroyable engouement. Pour l'année 2020, certains chiffres prévisionnels annonçant plus de 80 milliards d'objets connectés et un marché total de plus de 1000 milliards de dollars.

L'IoT est apparu à l'issue de la standardisation appliquée à l'automatisation du traitement du document et de l'information sur support matériel puis numérique. Son extension vers d'autres domaines d'application a été très rapide. Les objets ont été modifiés (avec des puces RFID par exemple) devenant des "objets connectés" reliés à des serveurs centralisés et/ou capables de communiquer entre eux. Les importantes capacités offertes par l'IoT sont encore, pour la plupart, à

découvrir et à explorer.

Les données et leurs exploitations sont en effet au cœur de l'IoT. Elles proviennent de divers terminaux et capteurs, et permettent d'informer les utilisateurs en temps réel de l'évolution de leur environnement. Plus que cela, la gestion de la multiplicité de ces données provenant de sources diverses permet de quantifier l'environnement connecté afin d'en tirer profit et d'enrichir les usages ou en envisager de nouveaux. Grâce à l'IoT, l'utilisateur peut agir en temps réel sur son environnement de manière manuelle ou automatisée, pour faciliter un tas de tâches tel l'optimisation de la production, contrôle des machines, ou encore l'optimisation de chaînes logistiques en temps réels. Citons ci dessous quelques exemples d'application de l'IoT :

- La **maison intelligente** ou *Smart home* : en incluant la domotique, la maison connectée est un système intelligent conçu pour optimiser et automatiser des fonctions techniques et de communication de la maison [14]. Les appareils électriques sont reliés entre eux et peuvent interagir pour réduire la consommation d'énergie en chauffage, eau chaude, climatisation ou éclairage, tout en assurant un confort total à domicile. La maison intelligente peut être simplement gérée par un téléphone portable et offre l'avantage de s'adapter aux besoins et au mode de vie des individus. La domotique c'est aussi une aide précieuse pour les personnes handicapées et les personnes non autonomes.

- La **ville intelligente** ou *Smart city* : c'est l'extension du concept de la ville intelligente appliquée dans toute une ville. Elle permet une gestion plus efficace et démocratique au bénéfice des usagers et de la collectivité. Ces applications les plus courantes concernent le service public, comme les capteurs de présence dans les parkings pour indiquer la disponibilité des places libres, les conteneurs poubelles qui indiquent leur taux de remplissage, ou encore les capteurs indiquant la congestion des trafics routiers.

- L'**usine intelligente** ou *Smart factory* : il est possible de connecter l'ensemble des ressources d'une entreprise ou usine (personnes, logiciels, équipements, produits, etc.), permettant ainsi de prévenir diverses problématiques pouvant entraîner un arrêt de la production, notamment les pannes d'équipements ou les non-conformités.

Cette liste d'application n'est bien sûr pas exhaustive, mais elle donne un aperçu sur les applications actuelles et envisagées de l'IoT. Ce présent sujet de thèse s'intéresse plus particulièrement au déploiement de l'IoT dans le milieu industriel ou manufacturier, communément appelé l'Internet Industriel des Objets IIoT (Industrial Internet of Things).

1.6.2 L'Internet Industriel des Objets IIoT

L'Internet Industriel des Objets (IIoT - Industrial Internet of Things) est le déploiement de l'IoT en milieu industriel. Grâce à une technologie embarquée (capteurs, actionneurs, puces RFID...), l'IIoT consiste à identifier et faire communiquer entre eux, tous les éléments (machines, produits en cours de fabrication, finis et en cours d'utilisation, collaborateurs, fournisseurs, clients, infrastructures...), que l'on peut désigner comme des objets [15]. Ces objets, au travers de dispositifs d'instrumentation échangent des quantités considérables de données qui sont alors véhiculés au travers d'un réseau local ou d'internet. Trois catégories d'objets communicant peuvent être distinguées : les objets connectés directement à internet, les M2M (Machine To machine) pour lesquels la communication entre machines et l'accès au système d'information se fait sans intervention humaine ou les terminaux communicant tels les ordinateurs portables, tablettes, smartphones... L'IIoT est le fondement technologique de l'Usine Intelligente permettant les échanges en temps réel au sein d'une usine ou entreprise afin de faciliter la coordination et la collaboration entre les différents opérateurs. Son déploiement assurera des gains de produc-

tivité et d'efficacité opérationnelle pour l'industrie. De plus il offre la possibilité d'adapter les compétences disponibles en temps réel pour faire face à des évolutions rapides ou à des imprévus. Les informations issues de l'IIoT créent de la connaissance des clients, de l'environnement, des processus de l'entreprise. Toutes ces connaissances constitueront une valeur ajoutée pour l'entreprise lui permettant ainsi de faire des prédictions sur l'évolution de leur produit afin de renforcer sa disponibilité et sa durabilité. L'IIoT va constituer ainsi la quatrième révolution industrielle,

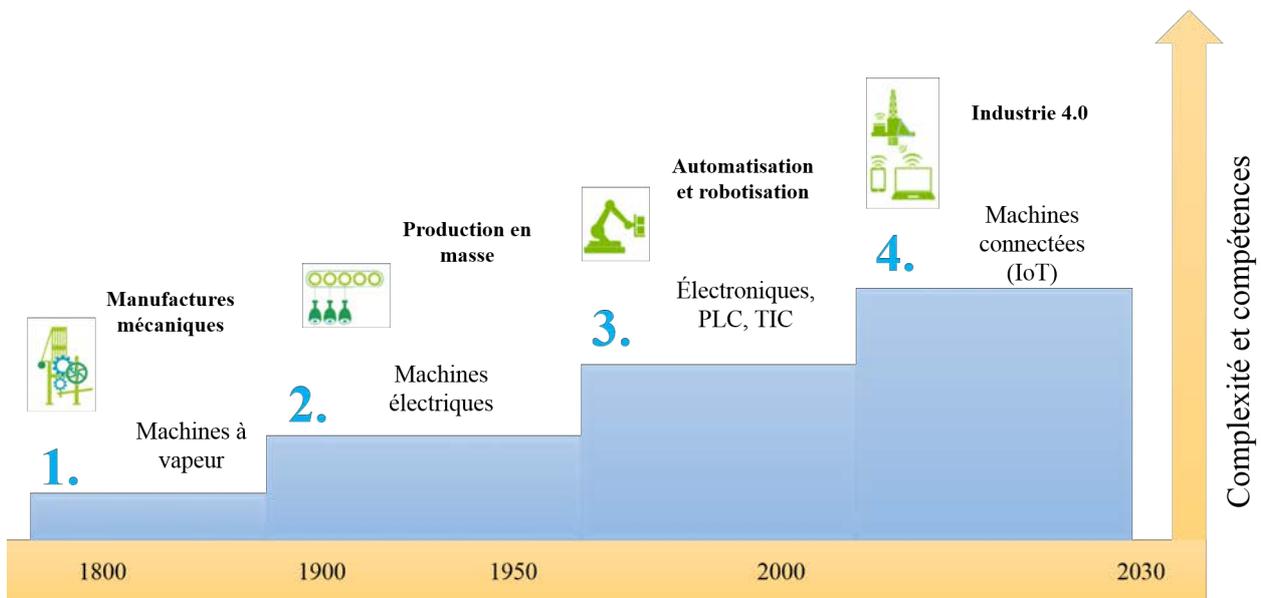


FIGURE 1.12 – Évolution de l'industrie

appelée Industrie 4.0 ou Usine 4.0 dont le principe est illustré à la figure (1.12). Elle va autoriser les entreprises à se lancer dans la conception et la mise sur le marché de produits et de services novateurs qui jusqu'à présent ne pouvaient être envisagés que par certains géants de l'industrie. Citons ci dessous quelques bénéfices de l'industrie 4.0 :

- Optimiser la consommation d'énergie par l'utilisation intelligente des différentes ressources nécessaires à l'industrie. Ceci est réalisable en ayant une vision globale sur l'usine et les équipements utilisés pour mieux gérer et optimiser leur consommation d'énergie.
- Surveiller et contrôler les machines et équipements en temps réel.
- Introduire des procédés intelligents en utilisant des machines capables d'analyser leurs propres données pour prévoir à quel moment leur entretien doit être effectué à titre d'exemple.
- Optimiser la supply chain, par la traçabilité des produits, le suivi logistique et la maîtrise des stocks.
- Éliminer le papier en numérisant les instances des processus de l'usine (les processus réels, en cours d'utilisation) ce qui permet de vérifier leur conformité avec les processus conçus.
- Renforcer la valeur du produit existant en développant de nouvelles gammes de produits intelligents et ainsi gagner de nouveaux marchés.

L'IIoT présente un défis majeur derrière l'utilisation des technologies qui lui sont associées pour réussir la collecte de données et ainsi, les transformer en données mesurables permettant aux décideurs d'avoir une vision en temps réel de ce qui se passe dans l'usine et de prendre des

décisions rapidement. Donc le choix des stratégies de communication est crucial pour garantir un échange de données efficace. Une meilleure intégration de l'Industrie 4.0 consiste à déterminer le type de système embarqué adapté au milieu physique de propagation, à s'assurer de la qualité des informations échangées et à le rendre interopérable avec l'environnement de l'usine [16]. L'entreprise peut ainsi récupérer en temps réel dans les systèmes de gestion et ERP, les données issues de l'IIoT et donc des machines, équipements et produits. Les données de volume important, seront stockées et traitées. Elles seront centralisées dans le Cloud, ce qui implique de traiter des problématiques de sécurité auxquels on peut remédier en implémentant des principes de cybersécurité tel que le concept d'Edge computing.

1.7 Les réseaux dédiés à l'internet des Objets IoT

Les technologies de connectivité sans fil pour les objets sont très nombreuses. Le choix de la stratégie de connectivité se fait selon plusieurs critères et se construit dans le prolongement du choix du capteur. Par exemple, il est nécessaire de prendre en considération la localisation très difficile d'accès pour sélectionner un réseau traversant les obstacles. Ou encore d'adapter le choix au débit nécessaire pour répondre aux enjeux métier. Ce choix peut dépendre majoritairement de sept phénomènes ; la localisation (indoor, outdoor, souterrain...), la mobilité, la consommation électrique, le contrôle à distance, la quantité des données, la fréquence d'envoi, et la sécurité. Si certains objets connectés utilisent des réseaux de faible taille, soit de simples connections de

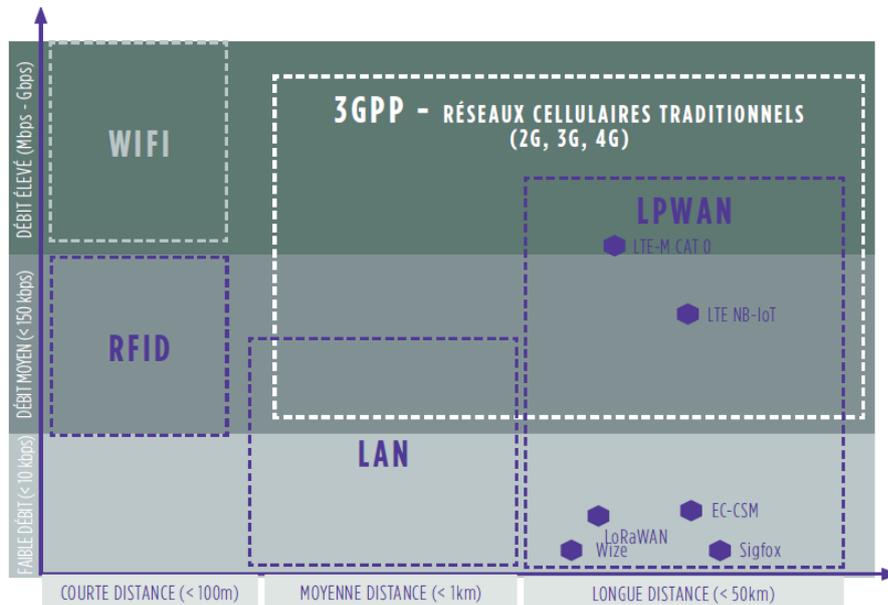


FIGURE 1.13 – Technologies de communication [13]

machine à machine (M2M) ou des réseaux de type LAN, l'immense majorité des objets utilisent des réseaux WAN à longue portée présentés à la figure (1.13), basés directement sur l'IoT. Aujourd'hui la plupart de ces connexions se font via des réseaux mobiles existants essentiellement en 4G. Mais de nouvelles technologies ont été développées pour mettre en place des réseaux spécifiques à l'IoT basés sur les réseaux LPWAN à faible puissance et large étendue, pour des applications à faible débit de données, avec une longue autonomie de batterie. Fonctionnant

sans surveillance pendant de longues périodes. Citons ci dessous les différents réseaux dédiés à l'Internet des objets.

1.7.1 Sigfox :

Sigfox est le premier opérateur à avoir mis en place un réseau de type LPWAN dédié à l'IoT. C'est un opérateur de l'IoT multinational et d'origine française créé en 2009. En 2017, le réseau Sigfox a été utilisé dans 34 pays soit en commercialisation directe soit en faisant appel à des opérateurs partenaires. Le service de Sigfox révolutionne le monde du "M2M" avec son offre de connectivité cellulaire, entièrement dédiée aux communications à bas débit. C'est un pionnier dans le domaine. Il a réinventé la transmission d'informations en réduisant de manière significative la consommation d'énergie des périphériques connectés et leur prix. Sigfox a, en fait, créé un réseau longue portée et à bas débit qui permet la communication de données. Ceci est possible grâce à la technologie radio à bande très étroite UNB (Ultra Narrow Band), qui opère sur les bandes non licenciées ISM à 868 MHz [17].

L'aspect bande étroite du signal concentre l'énergie dans une faible portion du spectre, améliorant ainsi les performances du récepteur. Les transmissions ne sont pas synchronisées à l'émission et réception. Les messages sont transmis par l'objet sans destinataire particulier, car il n'est pas associé à une station de base et le protocole d'échange est indépendant de la qualité du lien radio entre récepteurs et l'émetteur. Ainsi, plusieurs stations de base peuvent recevoir le même message, offrant de la diversité spatiale au système. Le réseau Sigfox est bidirectionnel et n'autorise qu'un message par objet toutes les 10 minutes maximum car il est limité à un débit de 100 bit/s. Il a une portée variant entre 30 et 50 km en zone rurale et entre 3 à 10 km en ville.

Le 14 février 2017, Sigfox a intégré une solution de géolocalisation "Spot'it" lui permettant de localiser l'objet au moment où il envoie un message en se basant sur la puissance du signal reçu. Au moins 3 stations de base réceptrices sont nécessaires pour effectuer une localisation. Cette triple information, allée à une carte de couverture, permet une localisation de l'objet au kilomètre près. L'avantage de cette solution est qu'elle peut être offerte sans modification des objets et sans synchronisation avec le réseau.

1.7.2 LoRa et LoRaWAN :

Promus par l'alliance LoRa, les réseaux LoRa (Longue Range) permettent aux objets connectés d'échanger de petits paquets de données. C'est la principale alternative à Sigfox. LoRa n'est pas un opérateur mais une technique de modulation contrairement à Sigfox. Le protocole de télécommunication permettant la communication d'objets à faible consommation électrique dédié à la technologie LoRa est le LoRaWAN. Cette technologie qui est initiée par Semtech en 2012 en France, elle est aujourd'hui une solution supportée par une trentaine d'opérateurs dans le monde, notamment Orange et Bouygues Télécom en France.

En Europe, LoRa opère sur les bandes non licenciées ISM allant de 867 à 869 MHz. Les largeurs de bandes considérées sont 125 ou 250 kHz en voie montante et 125 kHz en voie descendante, pour des débits allant de 250 bit/s à 50 kbit/s. Elle se distingue par sa réception et son émission à ultra-longue portée maximale de 20 km en zone rurale et 15 Km en milieu urbain, dont le spectre autorise la couverture de plusieurs millions d'appareils sans la moindre difficulté.

LoRa puise sa force dans la technique de modulation utilisée. A l'opposé de Sigfox, LoRa utilise la modulation par étalement de spectre SS (Spread Spectrum). Les techniques d'étalement de spectre permettent, comme leur nom l'indique, d'étaler le spectre fréquentiel du signal émis, pour qu'il occupe une bande bien plus large que la bande qu'il aurait dû occuper avec une tech-

nique de modulation classique. L'idée est de pouvoir, en réception, retrouver le spectre restreint d'origine du signal et ainsi dilater les signaux à bande étroite interférents. Ces techniques sont robustes face aux interférences, au brouillage *jamming* et aux évanouissements du signal causés par l'effet des trajets multiples [18].

Pour la localisation, l'entreprise propriétaire a proposé une technique basée sur la différence de temps d'arrivée des signaux en provenance de l'objet, TDoA (Time Difference of Arrival). De la même manière que le Sigfox, le réseau effectue cette localisation, plusieurs stations de base LoRa pouvant recevoir le même message. Ces stations de bases pouvant disposer d'une base de temps commune, elles peuvent calculer la différence de temps entre les réceptions en différents sites et ainsi estimer la position de l'émetteur.

1.7.3 NB-IoT (Narrow Band IoT) :

En Juin 2016, le monde de l'Internet des Objets vit une nouvelle avancée technologique avec la standardisation par le 3GPP, consortium de normalisation des technologies de réseaux mobiles, de la NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) [19]. Après le GPRS, cette technologie radio à bande étroite semble être la solution appropriée aux besoins du marché de l'IoT. Il a été pensé nativement comme un vrai protocole LPWAN se rapprochant beaucoup plus des protocoles Lora ou Sigfox en terme d'autonomie. Actuellement le NB-IoT est vu comme le concurrent le plus

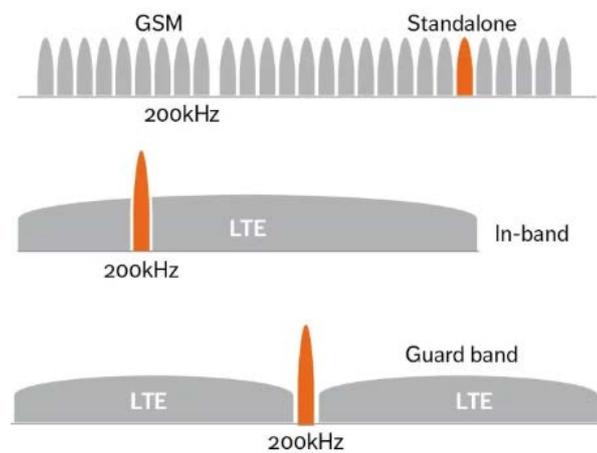


FIGURE 1.14 – Les bandes NB-IoT

sérieux à Sigfox et à Lora. Il permet d'utiliser une partie étroite de la bande de fréquence dédiée au LTE comme montré à la figure (1.14), en n'utilisant que 200 KHz d'une bande de fréquence allouée à une connexion mobile classique, pour un débit limité mais suffisant dans le cadre de la communication des objets. Le débit de transmission de données se limite lui à 150 Kbits/s, mais cela est suffisant pour la majorité des applications. Son déploiement est facile puisqu'il ne nécessite qu'une mise à jour logicielle des antennes déjà déployées pour la 4G. Cette technologie est mieux adaptée pour une communication impliquant un nombre important d'appareils fixes et nécessitant un faible volume de données en termes d'usage. Le cas d'usage le plus courant est la télémétrie pour les compteurs d'eau ou électrique connectés.

Huawei, l'un des grands promoteurs de cette technologie, estime que 5 millions d'objets et capteurs connectés discutent en NB-IoT. Parmi eux, se trouvent des capteurs dans des usines, des compteurs d'eau et de gaz, des lampadaires connectés, des capteurs dans les parkings et

autres. Cette technologie déjà en place dans l'industrie pourrait mettre au pas la smart city, l'agriculture, mais aussi la maison intelligente.

1.7.4 LTE-M :

Le standard LTE-M (Long Term Evolution, category M) extension des normes 4G monte progressivement en puissance avec la déclinaison de premières solutions opérationnelles. C'est une technologie mobile dédiée à l'IoT économiquement rationnelle et consomme moins d'énergie déployée par le biais d'équipements déjà en place et ne nécessite pas l'achat de nouveaux modems compatibles comme pour le NB-IoT. Contrairement au NB-IoT, le LTE-M offre un débit plus rapide 384 kbit/s contre 150 kbit/s critère non négligeable lorsqu'il s'agit de faire remonter de la vidéo particulièrement pour la vidéosurveillance [20]. Mais la principale différence du LTE-M contrario du NB-IoT, c'est qu'il propose les échanges voix sur le réseau et surtout gère la mobilité des objets. Les appareils ne sont pas contraints de rester fixes mais ont la possibilité de se déplacer ce qui est indispensable pour les véhicules connectés ou applications pour travailleurs isolés.

Devant cet éventail de réseaux dédiés à l'IoT, le choix va donc forcément dépendre de l'objet connecté. Il est nécessaire de considérer l'utilisation simplifiée des transmissions liées aux objets connectés et de la sécurité des utilisateurs et des données transmises. Ceci sera possible quand la qualité de la liaison radio utilisée pour acheminer les données est fiable.

Comme nous nous intéressons dans ce travail de thèse aux communications dans un milieu industriel, il est indispensable de faire une modélisation complète du canal de propagation. Ce canal qui est particulièrement difficile et très bruité dont il faut faire l'étude des phénomènes de propagation des ondes afin de pouvoir prédire au mieux les signaux transportant les données d'information.

1.8 Conclusion

Ce premier chapitre a présenté l'évolution des systèmes communicants industriels avec les avantages qu'a tiré l'industrie en les intégrant dans ses différents processus. Le réseau des systèmes communicants industriels étant filaire au départ, a progressé vers des réseaux sans fil basés sur le canal radio fréquence, pour finalement utiliser le nouveau concept qu'est l'Internet des objets facilitant ainsi le déploiement des réseaux de capteurs sans fils.

Cette thèse étudie les transmissions sans fil en milieu industriel, où le canal de propagation est difficile et fortement perturbé par la complexité géométrique ainsi que par la présence d'obstacles métalliques affectant les signaux d'information échangés dans ce type d'environnement. Les performances d'un système de transmissions sans fil sont directement liées aux conditions de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Une modélisation adéquate du canal radio est nécessaire dans ce cas. De plus, et comme nous optons pour des réseaux de capteurs sans fil, il est nécessaire de proposer un meilleur modèle de chaîne de transmission/réception compatible et optimal pour ce type de réseaux.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter un état de l'art sur les différents modèles de canaux de propagation en milieu industriel. Nous présenterons en détail les principaux phénomènes caractéristiques du canal de propagation radioélectrique pour les modèles déterministes et statistiques. Ce qui nous amènera à proposer un modèle de canal simulé qui servira comme canal industriel pour tester les performances de notre architecture de communication.

Chapitre 2

Canal de propagation sans fil : Contexte et modèle utilisé

2.1 Introduction

La communication sans fil dans un milieu difficile tel le milieu industriel, exige l'étude approfondie du canal de propagation afin de pouvoir prédire la qualité et la fiabilité des liaisons radio. En milieu industriel, la propagation des ondes dépend fortement de l'architecture du bâtiment, des objets, des machines et des personnes. Les ondes transportant les signaux, sont affectées par les phénomènes physiques présents dans l'environnement dans lequel elles se propagent telles que l'atténuation, la réflexion, la réfraction et l'absorption. Ainsi, la puissance du signal transmis sera affaiblie et des fois, absorbée entièrement. Pour faire une estimation d'un canal de propagation, il existe plusieurs méthodes basées sur la mesure ou la modélisation mathématique. En général, celles basées sur la mesure sont coûteuses et complexes à mettre en œuvre. Ainsi des modèles de propagation sont pré-établis afin d'offrir une alternative à moindre coût. L'étude du canal de propagation en milieu industriel permettra de proposer des stratégies d'émission/réception de données qui rendent l'échange d'information le plus fiable possible. D'autant plus que la tendance actuelle est l'utilisation des technologies basées sur l'industrie 4.0 qui favorise les communications intelligentes, rapide et fiable.

Afin de proposer un modèle fiable de communication sans fil pour l'usine intelligente, nous ferons dans ce second chapitre une étude des caractéristiques du canal de propagation. Nous présenterons les différents modèles de canaux de propagation en milieu industriel en tenant compte de la présence du bruit additif. Ceci permettra par la suite de proposer une architecture de communication robuste qui fait objet de ce sujet de thèse.

2.2 Caractéristiques d'un canal de propagation sans fil

Un système de transmission radioélectrique permet de transformer un signal électrique émis $x(t)$ en signal électrique reçu $y(t)$ par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques OEM. Le canal de propagation est le support de transmission qui véhicule les ondes électromagnétiques lors de leur propagation. Généralement, ce support de propagation a une influence sur l'onde électromagnétique émise et va dépendre de la présence ou absence des obstacles dans cet environnement.

2.2.1 Propagation à trajets multiples

Dans un système de communication sans fil, l'environnement du système de transmission interfère avec l'onde transmise selon différents mécanismes. L'onde interagit avec les obstacles présents dans l'environnement et engendre le phénomène des multi-trajets présenté à la figure (2.1). De plus, considérant la géométrie de l'obstacle, les OEM peuvent subir différentes interactions dont nous citons :

- La réflexion, qui correspond à un changement de direction du rayonnement électromagnétique quand celui-ci atteint une surface. Elle peut être soit spéculaire, quand le rayon réfléchi par la surface l'est dans une seule et même direction ou diffuse, qui est significative lorsque les surfaces sont rugueuses présentant ainsi un rayonnement réfléchi dans toutes les directions à cause des hétérogénéités du milieu.
- La diffraction, se produit lorsque l'OEM rencontre une arête, le sommet anguleux ou pointu d'un objet ou une surface courbe. Le point de diffraction peut alors être considéré comme une source secondaire rayonnant sur un cône [21].
- La transmission (ou réfraction), se définit comme une déviation de la trajectoire du rayonnement lorsqu'il passe d'un milieu à un autre n'ayant pas le même indice de réfraction.

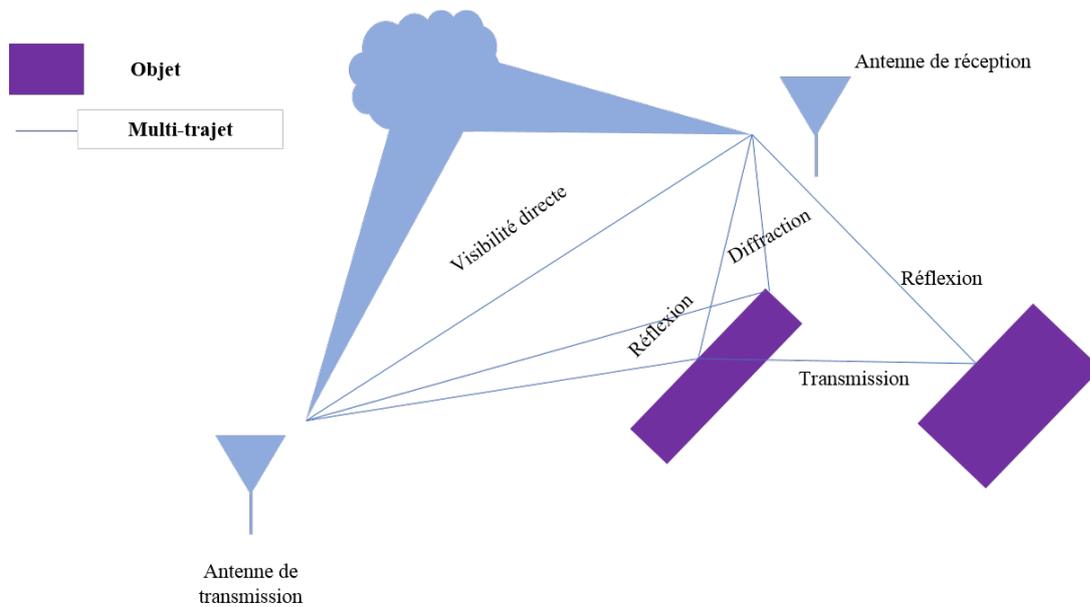


FIGURE 2.1 – Phénomène des multi-trajets

Dans le milieu industriel, qui est notre contexte de recherche, le phénomène des multi-trajets est plus important dû aux différentes interactions avec les structures métalliques de grande dimensions et de murs porteurs en béton armé. Dans un tel environnement contraint et à la fréquence 2.4 GHz, nous pouvons considérer que les ondes ne peuvent traverser les machines et les murs. Donc, les principales interactions pouvant avoir lieu sont les réflexions sur les surfaces lisses et les diffractions sur les arêtes [22]. Ainsi, le phénomène des trajets-multiples sera engendré et une onde émise va générer plusieurs ondes après interaction avec le milieu. Chacune de ces ondes générées aura ses propres caractéristiques en termes d'atténuation, de phase, de polarisation, de distance parcourue et de retard de propagation. En général, les signaux réfléchis sont considérés uniformément distribués sur une région elliptique avec un retard maximal τ_{max} tel que $\tau_0 \leq$

$\tau_m < \tau_{max}$ pour tous les retards τ_m . Le paramètre $\tau_0 = \frac{d_0}{c}$ correspond au retard du trajet en vue directe avec d_0 la distance qui sépare le transmetteur du récepteur, et $c = 3 \times 10^8 m/s$ est la vitesse de propagation de la lumière. τ_m est le retard du m ème trajet pour $m = 0, 1, 2, \dots, M$ où M est le nombre total des trajets.

Les multi-trajets ont l'avantage de permettre la réception des ondes même lorsque l'émetteur et récepteur ne sont pas en ligne de vue directe LOS. Mais, ils présentent l'inconvénient de générer des évanouissements du signal rapides dus aux interférences entre les différentes ondes reçues. D'autres phénomènes sont aussi engendrés par les multi-trajets telles les variations à grande échelle traduites par l'atténuation des signaux à cause de la distance séparant l'émetteur du récepteur. La figure (2.2) montre les variations à petite échelle plus connues sous le nom des Fading en anglais, représentées par les fluctuations rapides du signal liées aux interférences entre les différents trajets. Et le masquage partiel ou total du signal dû aux interactions avec les obstacles présents dans le milieu. Tous ces phénomènes entraînent une variation du canal de propagation dont il faut faire une modélisation exacte afin de considérer les impacts significatifs sur le signal reçu.

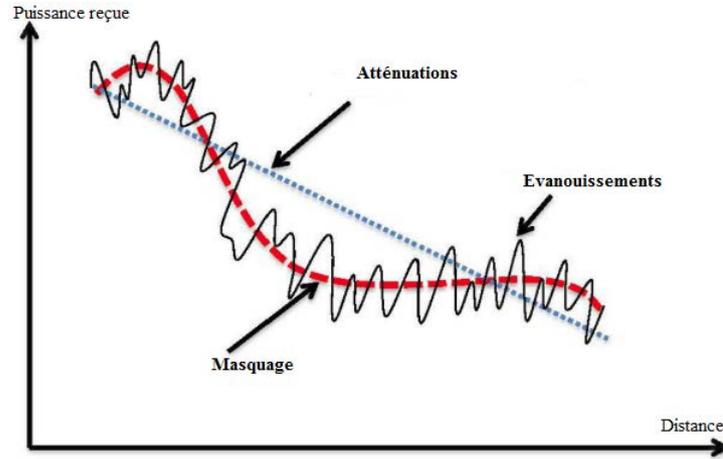


FIGURE 2.2 – Atténuation de la puissance en fonction de la distance

2.2.2 La réponse impulsionnelle

En général, un canal de propagation est modélisé comme un système linéaire variable dans le temps. La fonction de transfert qui le caractérise est aussi variable dans le temps et est nommée réponse impulsionnelle. Elle permet d'évaluer les effets et influence du canal sur un système de transmission. Le signal reçu $r(t)$ est composé d'une superposition de versions retardées et atténuées du signal émis $s(t)$ [23]. Il est donné via une convolution du signal transmis et de la réponse impulsionnelle du canal (éq 2.2). En bande de base (sans modulation), la réponse impulsionnelle est :

$$h(t, \tau) = \sum_{m=1}^M \alpha_m(t) \delta(\tau - \tau_m(t)) \quad (2.1)$$

Avec :

- M est le nombre de trajets,
- $\alpha_m(t)$ est l'amplitude ou gain complexe associé au m ème trajet,

- τ_m est le retard de propagation associé au m ème trajet,
- $\delta(t)$ est la fonction de Dirac.

Le signal reçu est ainsi exprimé par :

$$r(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_m(t) s(t - \tau_m(t)) \quad (2.2)$$

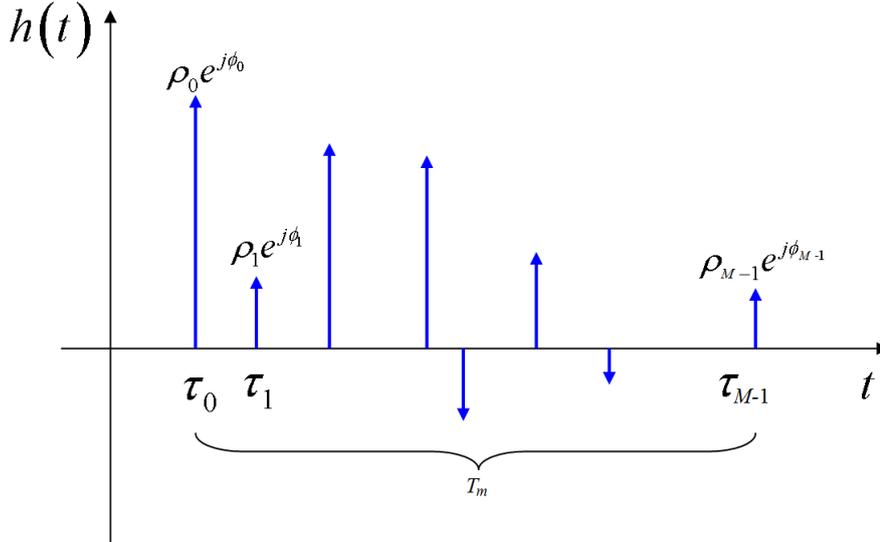


FIGURE 2.3 – Exemple de la réponse impulsionnelle

Le canal de propagation est donc modélisé comme un filtre à réponse impulsionnelle finie (RIF) variable dans le temps tel que présenté à la figure (2.3). A partir de la réponse impulsionnelle, on déduit le profil en puissance (PDP) du canal permettant d'associer à chaque trajet la puissance qui lui correspond. Connaissant le PDP, nous pouvons calculer trois paramètres statistiques importants pour caractériser un canal multi-trajets ; le retard moyen τ (mean excess delay), la dispersion des retards τ_{rms} (RMS delay spread) et la bande de cohérence. En considérant le critère de la mobilité des objets dans l'environnement de propagation, nous allons de plus considérer l'étalement Doppler et le temps de cohérence.

A. La dispersion temporelle (*Delay spread*)

Pour un canal sans fil, le signal transmis atteint le récepteur à des instants différents à cause des trajets multiples. C'est le phénomène de la dispersion temporelle T_m qui correspond à la différence de temps entre les moments d'arrivée de la première composante et de la dernière. La dispersion est caractérisée par deux paramètres ; le retard moyen τ et la dispersion des retards τ_{rms} . Le retard moyen est le moment d'ordre 1 du PDP défini comme la moyenne des retards τ pondérés par leurs puissances α :

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i \tau(i) |\alpha(i)|}{\sum_i |\alpha(i)|} \quad (2.3)$$

La dispersion des retards ou l'écart type des retards τ_{rms} , détermine la sélectivité du canal qui peut entraîner la dégradation des performances du système de communication. C'est le moment

d'ordre 2 de la PDP qui décrit la dispersion du signal à travers la propagation multi-trajets en tenant compte les retards de tous les trajets à la réception en se basant sur le premier trajet reçu. Il se définit comme :

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_i (\tau(i) - \bar{\tau})^2 * |\alpha(i)|}{\sum_i |\alpha(i)|}} \quad (2.4)$$

En générale, quand la valeur de la dispersion des retards est élevée cela signifie que la réponse impulsionnelle du canal est composée d'un ensemble de trajets prépondérants distribués sur un large intervalle des retard de propagation [24]. À l'opposé, si la valeur de la dispersion des retards est faible, cela signifie que l'environnement est peu dispersif.

B. La bande de cohérence B_c

La bande de cohérence est la bande de fréquence dans laquelle le canal est considéré non sélectif ou plat comme le montre la figure (2.4). Quand la largeur de bande du signal transmis en bande de base dépasse la bande de cohérence, on parle alors d'un évanouissement fading sélectif en fréquence [24]. Ce paramètre détermine la sélectivité ou non d'un canal sans fil. L'expression

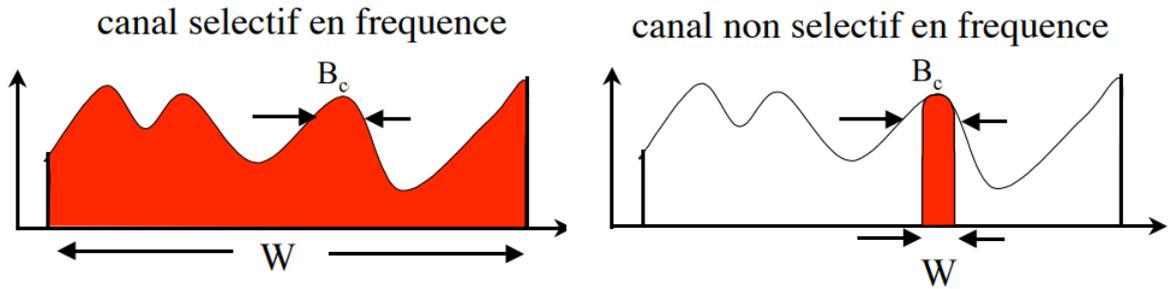


FIGURE 2.4 – Exemple de la sélectivité du canal

de la bande de cohérence est reliée en général à étalement maximal des retards par la relation :

$$B_c = \frac{1}{\Delta\tau} \quad (2.5)$$

C. Étalement Doppler B_D

L'étalement Doppler est causé par la variation temporelle du canal. Il est défini comme la bande de fréquence où le spectre Doppler reçu est non nul et est égal à deux fois la fréquence Doppler maximale causée par la mobilité du canal [25].

$$B_D = 2f_{dmax} \quad (2.6)$$

où le décalage fréquentiel Doppler f_d est donné par :

$$f_d = f_e \cdot \frac{V_{eff}}{c} \cdot \cos\phi = f_m \cdot \cos\phi \quad (2.7)$$

avec c la vitesse de la lumière, ϕ est l'angle entre l'utilisateur et la direction de propagation de l'onde émise, f_m est la valeur maximale du décalage Doppler, V_{eff} est la vitesse effective du mobile et f_e est la fréquence du signal.

D. Le temps de cohérence T_c

Le temps de cohérence T_c correspond à la durée pendant laquelle le canal est considéré comme stable ou invariant dans le temps [24]. Si deux signaux arrivent avec une séparation supérieure à T_c , ils sont donc affectés différemment. Il est exprimé par :

$$T_c = \frac{1}{B_D} \quad (2.8)$$

2.2.3 Distribution statistique des amplitudes

Comme nous l'avons déjà mentionné, le signal reçu n'est que l'interférence entre des trajets multiples qui peut se faire de manière constructive ou bien destructive. L'amplitude des signaux reçus fluctue et peut suivre différentes distributions statistiques [26]. Présentons ci-après les principales distributions en propagation sans fil.

A. La distribution Normale

La distribution normale est l'une des lois de probabilité les plus adaptées pour modéliser des phénomènes naturels issus de processus aléatoires. Cette distribution est souvent employée pour expliquer des variations à moyenne échelle de l'amplitude des signaux. Elle est définie à partir de deux paramètres, sa moyenne μ et son écart-type σ et s'écrit sous la forme suivante :

$$P_x(x) = \frac{x}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.9)$$

B. La distribution Log-normale

Une variable peut être modélisée par une loi log-normale si elle est le résultat de la multiplication d'un grand nombre de petits facteurs indépendants. La distribution de log-normale est définie à partir de deux paramètres, la moyenne m et l'écart-type σ de $\log(x)$ au lieu de x comme présenté à l'équation 2.10.

$$P_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.10)$$

C. La distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est définie à partir du paramètre σ . La fonction de densité de probabilité est donnée par :

$$P_x(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.11)$$

En communication sans fil cette distribution décrit au mieux un évanouissement en l'absence d'un trajet en ligne de vue directe NLOS (Non Line of Sight) entre le transmetteur et le récepteur. C'est la loi qui caractérise une propagation par voix radio la plus utilisée.

D. La distribution de Rice

Contrairement à la distribution de Rayleigh, la distribution de Rice se produit quand un trajet puissant et direct existe en plus des trajets dispersés de puissance plus faible. Elle est définie à

partir de deux paramètres ; l'amplitude de la composante principale nommés s et l'écart-type σ :

$$P_x(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{sx}{\sigma^2}\right) \quad (2.12)$$

avec $I_0(x)$ est la fonction de Bessel modifiée d'ordre 0. Lorsque s tend vers 0, la composante du trajet puissant est éliminée. Par conséquent, la distribution de Rice tend vers la distribution de Rayleigh ce qui en fait un cas particulier.

E. La distribution de Nakagami- m

La distribution de Nakagami est décrite par deux paramètres m et Ω . Sa fonction de densité de probabilité de Nakagami est donnée par :

$$P_x(x) = \frac{2m^2 x^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right) \quad (2.13)$$

où $\Gamma(m)$ représente la fonction Gamma [25] :

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty \exp(-t)t^{x-1} dt \quad (2.14)$$

La distribution de Nakagami est un cas généralisé d'autres distributions. Pour décrire la distribution gaussienne unilatérale, on fixe la valeur de $m = \frac{1}{2}$, et pour décrire la distribution de Rayleigh, on fixe la valeur de $m = 1$. Elle donne aussi une bonne approximation de la distribution de Rice et s'approche, dans certaines conditions, de la distribution Log-normale.

2.2.4 Évanouissements sélectifs et non sélectifs Fading

Comme présenté ci-haut, un canal radio peut être affecté par plusieurs types d'évanouissements. Ceux sélectifs en fréquence qui résultent de la dispersion temporelle qui comportent les évanouissements plats et les évanouissements sélectifs en fréquence. Et ceux sélectifs en temps dû au décalage Doppler qui comporte les évanouissements lents et les évanouissements rapides. Un canal est dit à évanouissements plats (canal non sélectif en fréquence), quand la bande de cohérence B_c du canal est supérieure à la bande occupée par le signal W , et la dispersion temporelle τ_{rms} est inférieure à la durée du symbole émis. Dans ce cas, on peut considérer que le spectre de signal reçu est corrélé et que toutes les fréquences du spectre du signal subissent les mêmes perturbations.

A. Evanouissement sélectifs en fréquence

Le canal est dit sélectif en fréquence lorsque la bande de cohérence du canal B_c est inférieure à la bande occupée par le signal, et la dispersion temporelle τ_{rms} est supérieure à la durée du symbole émis. Dans ce cas, on peut considérer que le spectre de signal reçu est décorrélé.

B. Evanouissement lent

Un canal est considéré non sélectif en temps si le temps de cohérence du signal T_c est supérieur à la durée du symbole émis T_s , et la bande occupée par le signal W est supérieure au décalage Doppler B_d . La réponse impulsionnelle du canal reste constante et invariante sur plusieurs symboles consécutifs. Le canal est considéré dans ce cas comme un canal à évanouissements lents.

C. Evanouissement rapide

Le canal est sélectif en temps quand le temps de cohérence du signal T_c est inférieur à la durée du symbole émis T_s et la bande occupée par le signal W est inférieure au décalage Doppler. Dans ce cas, la réponse impulsionnelle du canal varie très rapidement pendant la durée d'un symbole.

2.3 Modèles des canaux industriels existants

La propagation des signaux dans un environnement industriel est très affectée par le phénomène des trajets multiples comparée à une propagation dans un environnement intérieur (indoor) comme les bureaux ou endroits résidentiels. Ces trajets multiples causeront des interférences inter-symboles ISI, réduisant ainsi la performance du système de communication. D'où l'intérêt de choisir un système communicant robuste en cas de fortes présences des multi-trajets.

Pour proposer un système de communication sans fil optimal opérant dans un environnement industriel, il faudrait déjà avoir plusieurs modèles de canaux de propagation industriel issus des mesures ou des modèles mathématiques qui permettront d'avoir une estimation des paramètres de propagation. Dans [27], des mesures provenant de plusieurs milieux industriels ont permis de classer ces environnements en fonction de la dispersion des retards et du niveau d'interférence. Pour certains milieux industriels n'étant pas de grandes dimensions, et ayant des murs, un plafond et un sol métalliques ainsi qu'une grande variété d'objets métalliques tels que des moteurs, des colonnes et des grues, la dispersion des retards peut être grande (au-delà de 120 ns) pour différents niveaux d'interférences (forte présence ou non d'interférence). Pour les entrepôts de papier caractérisés par leurs grandes dimensions où des rouleaux de papier sont stockés, les ondes sont absorbées par le papier et le niveau des signaux d'interférence est ainsi réduit. Ceci élimine la possibilité d'utiliser des systèmes qui tirent profit des avantages des trajets multiples comme les systèmes à antennes multiples. Dans les milieux étroits comme les tunnels ferroviaires, les interférences ne sont pas sévères et la dispersion des retards est faible.

Le cas idéal pour un système sans fil peut correspondre à un environnement sans interférences et avec un niveau moyen de la dispersion des retards. Ainsi une forte réflexion provenant des murs et cloisons va produire un étalement des retards τ_{rms} relativement élevé et par conséquent des interférences inter-symbole pour un système avec un grand temps symbole. Contrairement à un milieu à faible réflectivité pouvant conduire à une mauvaise couverture dans le cas NLOS. Le niveau idéal dépendra du système à déployer. En général, les environnements industriels sont considérés à fort niveau de réflexion des ondes et sont atteints d'un fort bruit provenant de plusieurs sources. Dans la littérature, les modèles de canaux industriels proposés sont classés soit sous forme statistique, soit déterministe soit une combinaison des deux : modèle hybride.

2.3.1 Modèles statistiques :

Un canal de propagation peut être prédit selon des approches statistiques basées sur des calculs mathématiques régissant la propagation [28, 29]. Les modèles statistiques regroupent un ensemble d'équations mathématiques et d'algorithmes pour caractériser un environnement donné. Le comportement empirique du canal est déterminé à partir d'un grand nombre de mesures caractérisant différents milieux de propagation. A chaque configuration est associée une loi statistique décrivant au mieux les paramètres de propagation. En général, ces modèles ne nécessitent que peu d'informations, et présentent l'avantage d'être simples à utiliser et efficaces. Mais leur précision se limite pour des environnements ayant les mêmes caractéristiques que ceux où

les mesures ont été faites. Plusieurs modèles dans la littérature décrivent la variation d'un canal de propagation pour un environnement industriel. Nous citerons ci-après quelques exemples :

A. Modèle de Rappaport :

Selon les travaux de Rappaport et *al.* [30], l'enveloppe du signal reçu issu d'une propagation dans un environnement industriel suit la distribution de Rice. Constat qui a été vérifié plus tard par plusieurs campagnes de mesures [31, 32]. En 1991, le même auteur a développé un modèle statistique de simulation indoor (Simulation of indoor radio-channel impulse response models) utilisé pour générer, par simulation, la réponse impulsionnelle et l'atténuation dans des bureaux et des bâtiments industriels [33]. Ce modèle est issu des résultats provenant de campagnes de mesures faites dans cinq bâtiments industriels. Il décrit la distribution des amplitudes, phases et retards des multi-trajets dans une zone déterminée et la probabilité de recevoir des multi-trajets à des emplacements de faibles échelles. Il a été constaté que dans la plupart des cas de mesures, la dispersion des retards est plus élevée dans des environnements à grandes dimensions tels les milieux industriels non-partitionnés que dans des environnements partitionnés de type bureaux.

B. Saleh-Valenzuela :

De larges travaux de recherche sur les modèles de canaux sans fil dans le contexte industriel ont étudié le modèle de Saleh-Valenzuela [34] ainsi que ses différentes variantes [35, 36]. Son principe consiste à diviser la réponse impulsionnelle en sous-groupe de trajets multiples nommés *clusters* et présentée à la figure (2.5). Ces *clusters* sont caractérisés par leur séparation dans le temps et leur puissance décroissant exponentiellement dans chaque *cluster*. Les temps d'arrivés

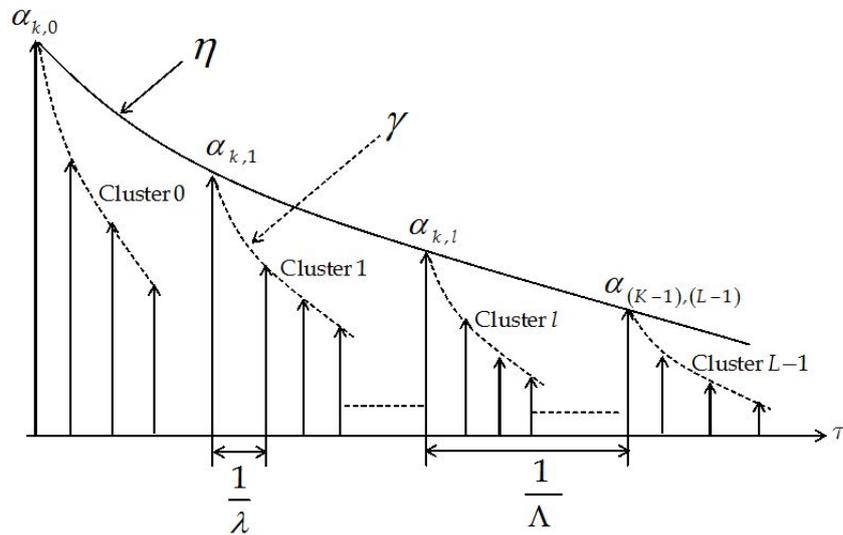


FIGURE 2.5 – Modèle de Saleh-Valenzuela

des *clusters* et des rayons de chaque *cluster* suivent des processus aléatoires selon la loi de Poisson. Ce modèle est assez simple à utiliser et à simuler. Il permet d'avoir des réponses de canal relativement précises par rapport à la mesure. Son utilisation est bien adaptée pour des environnements indoor type bureaux, résidences et environnements industriel de grandes dimensions. La

réponse impulsionnelle selon le modèle de S-V est décrite comme suit :

$$h(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{k,l} e^{j\theta_{k,l}} \delta(t - T_l - \tau_{k,l}) \quad (2.15)$$

où :

- $\delta(t)$ est la fonction de Dirac.
- l est l'indice du *cluster*.
- k est l'indice des trajets à l'intérieur des *clusters*.
- T_l est le retard du l ème cluster, i.e l'instant d'arrivée du premier trajet dans le cluster d'indice l .

- $\tau_{k,l}$, $\alpha_{k,l}$ et $\theta_{k,l}$ sont le retard, l'amplitude et la phase du k ème trajet du l ème cluster.

La valeur moyenne de l'amplitude $\overline{\alpha_{k,l}} = \overline{\alpha_{0,0}} \exp\left(\frac{-T_l}{\eta}\right) \exp\left(\frac{-\tau_{k,l}}{\gamma}\right)$ avec $\overline{\alpha_{0,0}}$ est la puissance moyenne du premier rayon du premier *cluster*. η et γ sont les puissances décroissantes du *cluster* et rayon respectivement. Il existe plusieurs modèles de canaux issus du principe de S-V, et dont les paramètres sont adaptés selon les campagnes de mesures effectuées. En cas général, les propriétés d'un canal de propagation à trajets multiples dépendent du type, de la dimension et de la densité des différents rayons. Les mesures provenant d'un seul environnement ne sont pas forcément semblables à un autre environnement.

C. Le modèle IPDP (*In-room Power Delay Profile*) :

Le modèle IPDP est un modèle de prédiction utilisé afin d'estimer le comportement du canal en se basant sur les dimensions de l'environnement de propagation ainsi que le matériels qui y est présent [37]. Ce modèle définit la PDP du canal telle une composition de plusieurs trajets multiples ayant différentes amplitudes et retards tel que montré sur la figure (2.6).

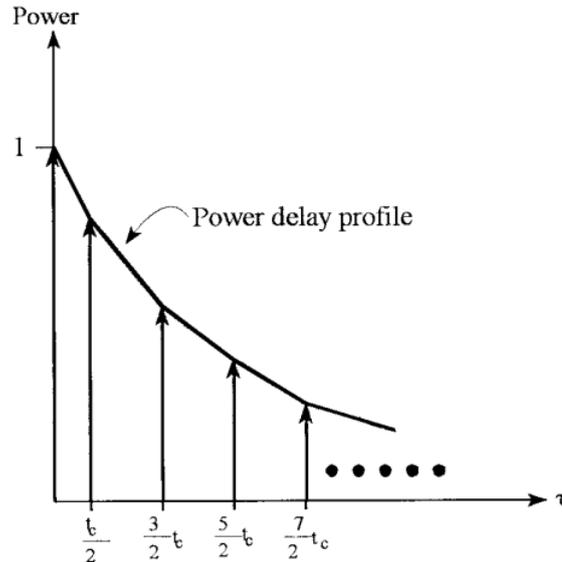


FIGURE 2.6 – La PDP normalisée dans un milieu indoor

$$PDP_{n=0} = 1 \text{ et } \tau = 0 \quad (2.16)$$

$$PDP_{n \neq 0} = \frac{1}{4} \frac{\gamma^n}{n^2} \text{ et } \tau_n = \frac{t_c}{2} (2n - 1) \quad (2.17)$$

Avec : n le nombre de trajets, γ est la puissance moyenne des coefficients de réflexion et t_c le temps caractéristique du canal donné par :

$$t_c = \frac{8V}{cS} \quad (2.18)$$

V est le volume de la pièce, S est la surface totale dans l'environnement et c la vitesse de propagation de la lumière. Ce modèle permet aussi d'estimer la dispersion des retards τ_{rms} à l'intérieure d'une pièce [37].

D. Technique statistique physique :

L'environnement de propagation indoor est décrit par un volume cubique ayant des coordonnées rectangulaires x , y et z comme le montre la figure (2.7). Les composantes des trajets multiples sont modélisées en définissant des espaces circulaires dans l'environnement de propagation contenant des diffuseurs uniformément distribués [38]. Chaque diffuseur à l'intérieur d'un

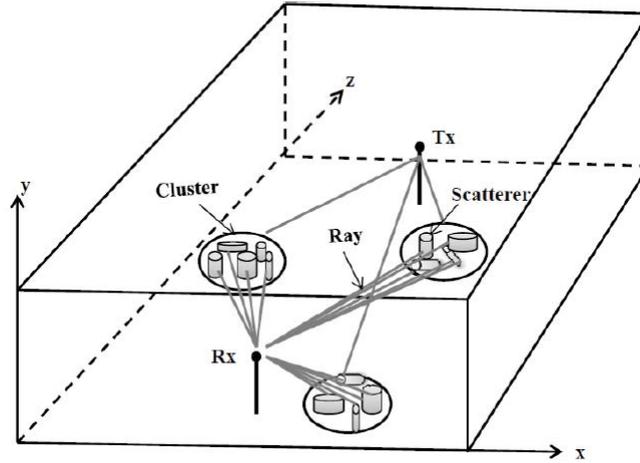


FIGURE 2.7 – Scénario de propagation dans une configuration géométrique cubique [38]

cluster est modélisé tel un diélectrique cylindrique à pertes fini ayant une taille, orientation et composition données. La localisation de chaque *cluster* est déterminée selon un processus stochastique de Poisson. La PDP obtenue de ce modèle suit une décroissance exponentielle telle que celle proposée par le modèle de S-V. Le principal avantage de cette méthode statistique physique, c'est qu'elle est performante dans des environnements de larges dimensions et plus précise que les modèles empiriques basés sur les caractéristiques électromagnétiques des liens.

E. Modèle dynamique d'un canal industriel large bande :

Un modèle complet de canal large bande dans un environnement industriel à base d'un réseau de capteurs a été présenté dans [39]. Le modèle englobe les multi-trajets, interférences et bruit dans un milieu de propagation industriel difficile. La réponse impulsionnelle du canal est donnée

par :

$$h(t, \tau, \theta_{AoD}, \theta_{AoA}) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m(t) \delta[\tau - \tau_m(t)] \delta[\theta_{AoD} - \theta_{AoD,m(t)}] \delta[\theta_{AoA} - \theta_{AoA,m(t)}] \cdot \exp(j\varphi_m(t)) + n(t) + J(t) \quad (2.19)$$

$\tau_m(t)$ est le retard du m éme trajet, $\varphi_m(t)$ est la phase uniformément distribuée, θ_{AoD} et θ_{AoA} sont les angles de départ et d'arrivée des trajets et $A_m(t)$ est l'amplitude complexe du trajet. Les termes $n(t)$ et $J(t)$ définissent respectivement, le bruit et les interférences provenant des signaux multiples : $J(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{2}\alpha_n \exp\{j\varphi_n(t)\}$.

Les différentes composantes des trajets multiples peuvent être calculées en modélisant la zone de propagation telle une région elliptique déterminée par le retard maximal τ_{rms} .

Plusieurs autres travaux proposent des modèles statistiques basés sur des campagnes de mesures effectuées dans plusieurs environnements industriels. Ils se basent en grande partie sur la distribution de la réponse impulsionnelle ou PDP et sur l'étalement des retards τ_{rms} [40, 41, 42].

2.3.2 Modèles déterministes du canal

Le modèle déterministe suppose la connaissance au préalable de l'environnement de propagation, des antennes en émission et réception et du champs électromagnétique émis. La description géométrique précise du milieu et la connaissance de ses propriétés électromagnétiques permettent de calculer les paramètres caractéristiques des ondes. Ce modèle utilise un maillage de l'environnement de propagation par l'utilisation de la technique de traçage 3D. C'est une technique précise, mais complexe et nécessitant un long temps de calcul. En contexte industriel, quelques travaux de recherche proposent des modèles déterministes rigoureux basés sur la discrétisation des équations de Maxwell telle la Finite Difference Time Domain (FDTD) [43, 44]. Ceci consiste à discrétiser l'environnement en cellules tridimensionnelles afin de calculer à chaque instant et dans chaque cellule les composantes du champ électromagnétique. L'inconvénient majeur de cette méthode est l'ampleur de la quantité de données générée. Ainsi dans un environnement industriel complexe, la discrétisation rendra le modèle très complexe et lourd à simuler. D'autres modèles plus souples basés sur les rayons proposent une solution approchée des équations de Maxwell. Ils sont utilisées lorsque les objets modélisés ont une taille supérieure à celle de la longueur d'onde et pour les applications en champ lointain. Ces modèles sont plus adaptés principalement dans un environnement industriel pour lequel le volume à traiter est important et les objets ont une taille supérieure à la longueur d'onde. Ils permettent d'identifier tous les trajets possibles entre un émetteur et un récepteur auxquels seront appliquées des méthodes asymptotiques en fréquence, comme l'optique géométrique et la théorie uniforme de la diffraction. Ceci dans le but de calculer l'amplitude, la phase, le retard et la polarisation de chaque trajet. Au final, tous les rayons reçus seront combinés en considérant les caractéristiques des antennes. Parmi les méthodes existantes pour déterminer l'ensemble des trajets possibles entre un émetteur et un récepteur on retrouve la méthode de lancer de rayons [45] et celle de tracé de rayons [46] basée sur l'optique géométrique présentés aux figures (2.8) et (2.9) respectivement. Cependant, tous ces modèles restent encore complexes en termes des calculs et donc du temps de simulation qui en découle.

2.3.3 Modèles hybrides

Les modèles déterministes comme par exemple le tracer de rayons, ne sont pas les mieux adaptés aux environnements industriels à cause de la modélisation complexe de l'environnement

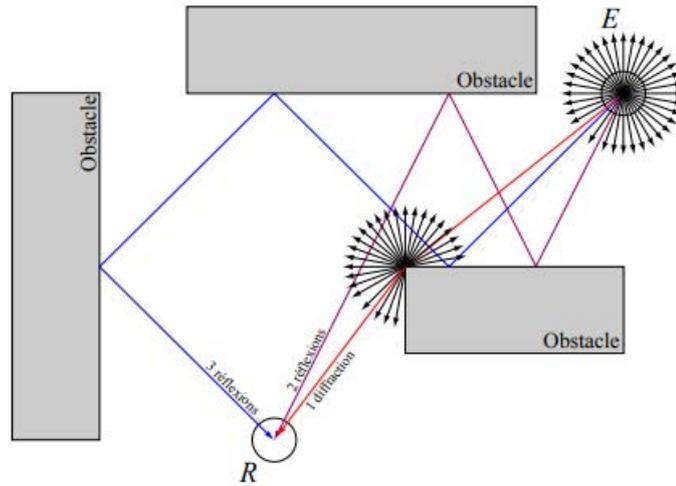


FIGURE 2.8 – Principe du Lancer de rayons

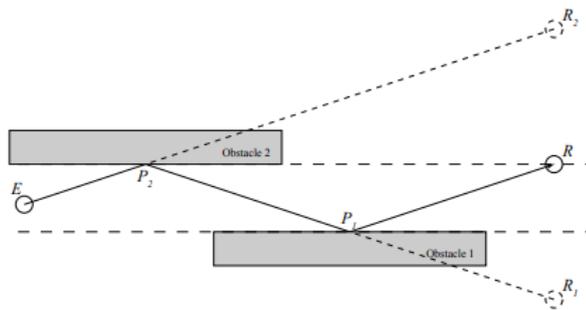


FIGURE 2.9 – Principe de l'optique géométrique

et du temps de calcul. Cet environnement contient beaucoup de réflecteurs qui sont essentiellement des machines de différentes dimensions, des poutres, des arêtes, des rails d'alimentations et éclairages ainsi que leurs supports et bien d'autres équipements. Les résultats de simulation peuvent ne pas être précis si tous les réflecteurs ne sont pris en compte dans la configuration du scénario. Certains d'entre eux ayant des dimensions supérieures à la longueur d'onde ne peuvent pas être traités correctement par les méthodes asymptotiques en fréquence. En ce qui concerne le temps de calcul, il est très élevé pour ce type d'environnement et augmente en fonction du nombre d'interactions paramétrées dans la simulation, ainsi que de la complexité du milieu considéré. Afin de rendre la modélisation plus efficace, des modèles hybrides ont été développés. Ces modèles combinent les avantages des modèles statistiques aux mesures réelles extraites des modèles déterministes afin de proposer une modélisation complète de l'environnement à étudier.

Il existe deux grandes familles des modèles de canaux sans fil hybrides, la première introduit des éléments spécifiques au milieu étudié dans un modèle statistique [47, 48]. L'autre propose d'associer deux modèles de simulation, dans le but de prendre en compte l'avantage de chacun [49]. Un modèle hybride a été proposé pour des canaux LOS et NLOS dans [50]. Son principe consiste à utiliser la simulation déterministe pour analyser des signaux simulés et en déduire une estimation précise et locale des paramètres des lois statistiques en tenant compte

de la spécificité de l'environnement de réception. Ainsi, les modèles statistiques sont caractérisés par des paramètres variables selon la zone de réception afin de générer des échantillons aléatoires corrects. Une étude des multi-trajets est réalisée et permet de dégager des règles conduisant à localiser les différents comportements du canal à modéliser. Pour des environnements industriels, peu de modèles hybrides sont établis. Dans [51] l'auteur propose un modèle hybride à base d'un modèle stochastique à cluster WINNER dont les données sont construites à partir des données de simulation déterministe et non de mesures. Le modèle est basé sur la complémentarité des deux modèles : déterministe et WINNER.

2.4 Bruit industriel

En plus des multi-trajets qui entraînent des atténuations et retards, un milieu de propagation sans fil est affecté par le bruit additif provenant de plusieurs sources présentes dans l'environnement. La composition et la complexité du milieu industriel engendre la présence de fortes interférences électromagnétiques EMI traduites en bruit industriel. Ceci est la cause principale de la dégradation des signaux reçus en environnement industriel sans fil nécessitant le déploiement d'un système de communication robuste et fiable face à ces perturbations. Ces interférences ou bruit proviennent de sources diverses tel les moteurs électriques, vibrations des machines, température élevées, sonorisation, tubes fluorescent et bien d'autres sources. Plusieurs travaux de recherches ont présenté les différentes sources de bruit en milieu industriel, et ainsi présenté un modèle mathématique caractérisant le bruit industriel [52]. Une capture et mesure des EMI pour un système de communication sans fil en milieu industriel ont démontré que ses interférences suivent le modèle de Middleton [53].

2.4.1 Le modèle de Middleton

L'intensité des EMI pour un système de communication sans fil en milieu industriel a été mesurée dans des travaux de recherches antérieurs, et ont ainsi démontré que la distribution de ces interférences suit le modèle de Middleton [54, 55]. Ce modèle définit les EMI telle une composition de deux bruits; bruit blanc Gaussien et bruit impulsionnel non-Gaussien. Ainsi, pour une transmission du signal dans un environnement industriel sans fil, le signal reçu est défini par :

$$r(t) = s(t) + w(t) + i(t) \quad (2.20)$$

avec $s(t)$ le signal émis, $w(t)$ correspond au bruit blanc Gaussien ayant une moyenne nulle et une variance σ_w^2 , et $i(t)$ est le bruit impulsionnel défini par :

$$i(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} A_i B_W \delta(t - b_i) \quad (2.21)$$

Où A_i est l'amplitude de l'impulsion i , considérée plate sur la bande de fréquence B_W , et b_i est le temps d'arrivée de la composante i .

La densité de puissance PDF des amplitudes d'un bruit impulsionnel suivant le modèle de

Middleton est une somme pondérée de distributions Gaussiennes décrite comme suit :

$$f_x(x) = \sum_{m=0}^{\infty} c_m g(x; 0; \sigma_m^2) \quad (2.22)$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} c_m \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma_m^2}\right)} \quad (2.23)$$

avec :

$$c_m = e^{-C} \cdot \frac{C^m}{m!} \quad (2.24)$$

et :

$$\sigma_m^2 = \frac{\frac{m}{C} + \Gamma}{1 + \Gamma} \quad (2.25)$$

ce dernier représente la variance du bruit qui augmente en fonction du facteur m . Quand $m = 0$, le bruit se résume à un bruit gaussien, donc absence d'impulsion. Quand $m \geq 1$ alors il y'a présence de l'impulsion. C et Γ sont deux paramètres qui spécifient les caractéristiques du bruit impulsionnel où $C \in [10^{-2}, 1]$ est l'indice de chevauchement (overlap index) qui dépend de la durée moyenne de l'impulsion. Cet indice représente la densité moyenne des impulsions selon un processus de Poisson tel que décrit par l'équation (2.24). Plus C est petit, plus le nombre des événements d'émission est petit et/ou plus leurs durées sont faibles. Ainsi, les formes d'ondes du bruit seront structurées avec une apparition impulsionnelle. Plus C est grand, moins le bruit est structuré ; c.-à-d. les statistiques des amplitudes approchent une distribution Gaussienne. Le paramètre Γ quant à lui est appelé le facteur Gaussien. C'est le rapport entre les puissances des composantes Gaussiennes et des composantes non- Gaussiennes du bruit. Typiquement, $\Gamma \in [10^{-6}, 1]$ et il est donné par :

$$\Gamma = \frac{\langle w^2 \rangle}{\langle i^2 \rangle} \quad (2.26)$$

2.4.2 Le modèle Alpha Stable Symétrique

Un autre modèle du bruit industriel a été développé en [56] qui représente ce bruit sous forme d'un processus α -stable symétrique (S α S). Cette distribution ne possède pas d'expression analytique de PDF à l'exception de deux cas spéciaux, notamment pour $\alpha = 1$ et pour $\alpha = 2$. Pour ce dernier cas, le processus S α S suit le cas particulier d'une distribution gaussienne :

$$P_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2}\right)} \quad (2.27)$$

Pour $\alpha = 1$ le processus suit la distribution de Cauchy dont la PDF est :

$$P_x(\gamma, \delta, x) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\gamma}{\gamma^2 + (x - \delta)^2} \quad (2.28)$$

La distribution S α S se comporte comme une gaussienne à l'origine, mais dont les queues de la distribution décroissent à un taux plus faible que les queues d'une gaussienne [57]. Les queues d'une distribution gaussienne décroissent exponentiellement alors que les queues d'une distribution S α S décroissent suivant une loi algébrique. Plus le facteur α est faible, plus la probabilité d'avoir des valeurs significatives (loin de l'origine) est élevée. Ceci signifie que les variables aléatoires qui suivent une loi S α S avec des faibles valeurs de α peuvent être considérées comme impulsionnelles. De ce fait, la distribution S α S permet de modéliser des bruits à différents degrés d'impulsivités tout simplement en manipulant la valeur de α .

2.4.3 Le modèle issu des chaînes de Markov

Dans [39] le bruit impulsionnel industriel est modélisé selon un processus du premier ordre de Markov à deux états ayant pour expression :

$$n(t) = w(t) + b(t).k(t) \text{ pour } t \in \{1, \dots, T\} \quad (2.29)$$

Avec $w(t)$ et $k(t)$ distribués selon une loi Gaussienne ayant une moyenne nulle. $b(t)$ est une variable aléatoire définie par $\{0, 1\}$ selon l'état du canal. Elle représente la loi de commutation du bruit qui varie d'un bruit gaussien à un bruit gaussien impulsif de forte amplitude. D'où la conclusion que le bruit $n(t)$ est une composition d'un bruit blanc gaussien et d'un bruit impulsionnel.

Quand le canal est stable et moins perturbé "état Bon", [$etat = B \leftrightarrow b(t) = 0$] donc : $n(t) = w(t)$, le signal est uniquement affecté par un bruit blanc gaussien ayant une moyenne nulle et une variance σ^2 . Sinon, si le canal est difficile "état Mauvais" [$etat = M \leftrightarrow b(t) = 1$] et donc $n(t) = w(t) + k(t)$. Le canal sera affecté en plus du bruit blanc gaussien d'un bruit impulsionnel. Les transitions des états pour le processus de Markov à deux états au premier ordre sont illustrées

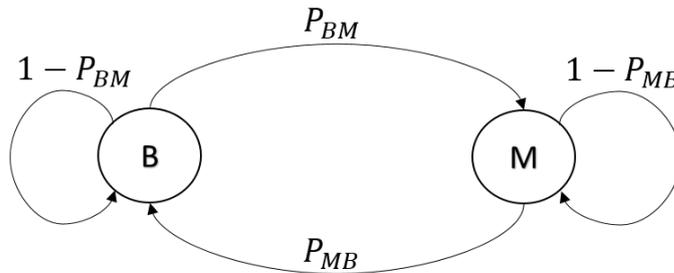


FIGURE 2.10 – Processus de Markov à deux états

à la figure (2.10). Ceci représente la transition entre les états du canal selon un modèle Markov-Gaussien. Pour ce modèle, P_B est la probabilité de l'état bon, tandis que P_M représente l'état mauvais. Le canal change d'état du mauvais au bon et du bon au mauvais avec P_{MB} et P_{BM} respectivement.

La fréquence des impulsions et leur impulsivité peut être contrôlée à l'aide des paramètres P_{MB} et P_{BM} . Des fortes valeurs de P_{BM} impliquent un nombre élevé de parution d'impulsions tandis que une faible valeur de P_{MB} représente une forte valeur de l'impulsion.

En d'autres termes, le bruit industriel sera modélisé selon une combinaison d'un bruit blanc gaussien et d'un bruit impulsionnel ayant une forte variance. Si ce bruit n'est pas pris correctement en compte, le signal transmis sera fortement dégradé, et la communication sera interrompue ou de mauvaise qualité.

2.4.4 Détection et suppression du bruit impulsionnel

Les systèmes de transmission conçus sous l'hypothèse d'un canal à bruit aditif blanc gaussien *BABG* souffrent d'une forte dégradation de performance lors de la présence d'un bruit impulsionnel [58]. Le choix du récepteur optimal selon le critère de la minimisation de l'erreur nécessite un traitement particulier afin de réduire les effets du bruit impulsionnel. Les distributions de puissance des modèles caractérisant ce bruit étant complexes, rend le développement et l'implémentation des récepteurs optimaux difficile à mettre en œuvre.

Des récepteurs optimaux et sous-optimaux sont proposés dans la littérature pour combattre les effets du bruit impulsionnel. Citons, le récepteur à maximum de vraisemblance de Middleton, le récepteur S&S et les récepteurs avec seuillage. D'autres techniques existent et consistent à estimer le bruit impulsionnel en premier lieu puis le soustraire de la totalité du signal reçu [59]. L'estimation et la soustraction du bruit impulsionnel se font dans la majorité des cas d'une manière itérative. Plus il y a d'itération mieux est l'estimation du bruit. Le choix des seuils influence directement la performance de ces récepteurs. Cependant, l'utilisation des itérations de détection/suppression rend ces techniques complexes et difficiles à utiliser [60, 61].

Les techniques à base de seuillage permettent d'avoir des récepteurs optimaux ou sous-optimaux ayant des meilleures performances tout en étant à faible complexité. Cette technique applique un bloc de pré-traitement pour donner aux impulsions une forme qui se rapproche de celle d'un bruit Gaussien [62]. Son principe de base est la détection de la présence du bruit impulsionnel en comparant le signal reçu à un certain seuil Sl . Si une impulsion est détectée, soit l'amplitude de l'impulsion en question est limitée au seuil prédéfini, soit elle est éliminée complètement en la réduisant à zéro. Une technique hybride qui combine la coupure de l'impulsion et sa suppression est possible :

$$\begin{cases} d_k & si & |d_k| \leq Sl_1 \\ sgn(d_k) \times Sl_1 & si & Sl_1 < |d_k| \leq Sl_2 \\ 0 & si & |d_k| > Sl_2 \end{cases} \quad (2.30)$$

avec Sl_1 et Sl_2 représentent le seuil de coupure et le seuil de suppression respectivement.

En revanche, le seuillage reste limité face aux variations du SNR ce qui peut engendrer un mauvais fonctionnement de cette technique. Pour un SNR élevé, cette technique risque de bloquer le signal même s'il n'est pas entaché de bruit impulsionnel. Aussi, pour des faibles valeurs de SNR, réduire le seuil à des valeurs inférieures ne permet pas d'améliorer les performances. En effet, si le signal utile est noyé même dans le bruit Gaussien, réduire le seuil à des valeurs encore plus faible entrainera le blocage de la majorité voire la totalité du signal reçu puisqu'il est déjà affecté par le *BABG*. De ce fait, il faut que le seuillage soit adaptatif en fonction du SNR [63, 64]. Un seuil élevé pour les faibles valeurs du SNR qui décroît d'une manière linéaire jusqu'à des valeurs élevés du SNR.

2.5 Modèle du canal industriel utilisé

La modélisation d'un canal sans fil se repose sur trois configurations tel que nous venons de voir : le modèle statistique offrant un temps de calcul très rapide mais peu précis, le modèle déterministe qui peut prendre en compte l'ensemble des paramètres de propagation d'un environnement mais au détriment de la complexité ainsi que le temps très étendu de calcul, et le modèle hybride à mi-chemin entre les deux précédents modèles. L'objectif de ce travail de thèse est de proposer un système de communication sans fil via des réseaux de capteurs IWSN (Industrial Wireless Sensor Network) basé sur la transformée en ondelettes en tenant compte d'un modèle de canal qui représente le plus précisément possible un canal industriel réel. Ce modèle de canal simulé, sera présenté telle une intégration des informations réelles issues de modèles déterministes à une bande de fréquences de 2.4 GHz et/ou 5 GHz dans un modèle statistique afin de s'approcher au mieux du cas réel.

L'environnement industriel dans lequel nous souhaitons utiliser notre architecture de communication est une usine de production à très faible mobilité (entre 0 et 1 Km/h). Ses dimensions

sont comprises entre 20 m à 100 m avec une hauteur ne dépassant pas 20 m. La distance maximale entre les différents capteurs est 100 m et la propagation se fait dans les deux configurations LOS et NLOS.

2.5.1 Génération des coefficients du canal à trajets multiples

La plupart des différentes campagnes de mesures présentées dans la littérature [39], ont montré que la réponse impulsionnelle d'un canal de propagation large bande en milieu industriel suit une loi exponentielle décroissante. Cette loi dépend des retards et de la puissance de chaque trajet tel le modèle établi par Saleh Valenzuela [34].

Dans [39], les paramètres n et χ pour établir l'atténuation de la puissance $P_L(d)$ en fonction de la distance ont été mesurés en LOS et NLOS pour une usine à moyenne échelle. Ces paramètres nous permettront de déterminer l'atténuation de la puissance dont l'expression est donnée par :

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + \chi \quad (2.31)$$

avec $P_L(d_0) = 20 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)$ où λ représente la longueur d'onde (fréquence).

De la même manière, la dispersion temporelle du canal est fournie en tenant compte la fréquence de transmission ainsi que la configuration LOS ou NLOS tel que présenté dans les travaux de recherches [35, 41]. Les valeurs de la dispersion des retards issues des modèles déterministes pour les fréquences 2.4 GHz et 5 GHz sont présentées dans le tableau (2.1).

| | $\tau_{rms}(ns)$ | |
|---------|------------------|----------|
| | LOS | NLOS |
| 2.4 GHz | 25 ~ 100 | 25 ~ 100 |
| 5 GHz | 28 ~ 38 | 34 ~ 51 |

TABLE 2.1 – Dispersion des retards τ_{rms} réelles

L'objectif de ce travail de thèse étant de valider notre système de communication dans un environnement de propagation industriel complexe. 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 telle que présentée à la figure (2.6). Ceci dans le but 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 suivie pour générer la réponse impulsionnelle du canal est comme suit :

- Fixer le nombre des trajets de la réponse impulsionnelle à 10 trajets maximum.
- Établir l'atténuation moyenne en fonction de la distance selon l'équation (2.30).
- Tirer d'une manière aléatoire selon une distribution exponentielle les retards τ_m de la réponse impulsionnelle pour chaque trajet m . Ceci en respectant que la dispersion des retards τ_{rms} ait une valeur comprise dans les intervalles définis au tableau (2.1).
- Calculer la puissance des trajets P_m en supposant que le profil en puissance (PDP) décroît en exponentiel selon l'équation suivante :

$$P_m = \exp \left(\frac{-\tau_m}{\tau_{rms}} \right) \quad (2.32)$$

A l'issue de cette démarche, un exemple des retards et puissances simulés pour constituer les canaux LOS et NLOS à 2.4 GHz et 5 GHz sont présentés à la table (2.2).

| 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 |

TABLE 2.2 – Retards et puissances simulés des canaux LOS et NLOS

Après avoir générer la distribution des retards et des puissances, nous procéderons à la génération des coefficients du canal.

2.5.2 La distribution de l'enveloppe du signal

Pour un signal émis $s(t)$, le signal reçu sera exprimé selon l'équation ci dessous :

$$r(t) = \sum_{m=1}^M \alpha_m(t) s(t - \tau_m(t)) \quad (2.33)$$

$$= \sum_{m=1}^M \rho_m e^{j\phi_m(t)} s(t - \tau_m(t)) \quad (2.34)$$

Les amplitudes $\alpha_m(t)$ sont complexes ayant ρ_m comme module et ϕ_m comme phase pour chaque trajets m . L'enveloppe du signal reçu s'exprimera par :

$$|r(t)| = \sqrt{r_I^2(t) + r_Q^2(t)} \quad (2.35)$$

où $r_I(t)$ et $r_Q(t)$ représentent respectivement les composantes en quadrature et phase du signal.

Les différents trajets suivent une même loi de distribution statistique pour représenter les phénomènes des évanouissements du canal. La distribution de puissance de chaque trajet sera modélisée selon la loi de Rice pour la configuration LOS et la loi de Rayleigh pour le NLOS, qui n'est autre que le modèle de Rice dont le facteur K tend vers 0 ($K = 0$).

Pour modéliser les évanouissements et ainsi, générer les coefficients complexes du canal selon la distribution spécifiée, l'enveloppe du signal reçu $|r(t)|$ suit une distribution de Rice ou de Rayleigh tel présenté à l'équation (2.12) en prenant :

$$\sigma^2 = P_m \cdot \frac{1}{K + 1} \quad (2.36)$$

P_m est la puissance de chaque trajet présentée à l'équation (2.32).

Dans le cas où les capteurs seront mobiles par rapport au nœud principal avec une vitesse de 1KM/h, un décalage Doppler équivalent à une fréquence variant entre 2.22Hz et 4.6Hz pour 2.4 GHz et 5 GHz respectivement illustre la mobilité. Étant donné la faible vitesse de déplacement des capteurs, et donc les petits décalages Doppler résultant, les variations temporelles du canal ne seront pas prises en compte lors de notre étude. Aussi, l'influence des angles d'arrivées et de départ par rapport à la formulation de la densité spectrale des puissances ne sera considérée.

En combinant ces différents paramètres, les résultats de simulations des réponses impulsionnelles obtenues sont illustrés sur les figures (2.11), (2.12), (2.13) et (2.14).

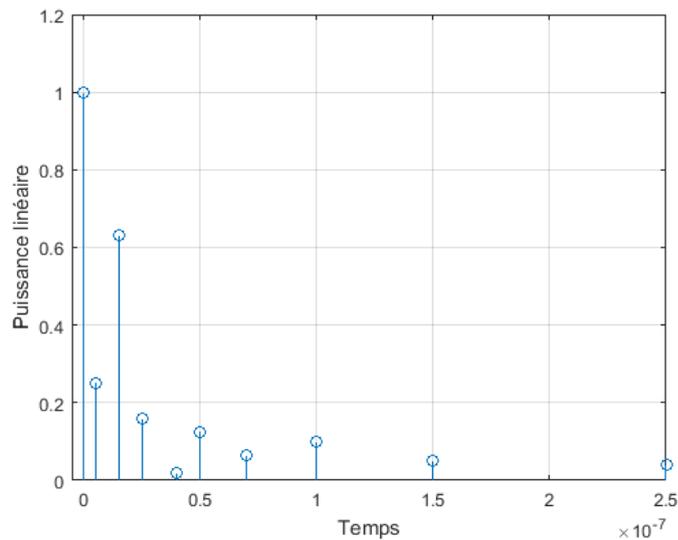


FIGURE 2.11 – La réponse impulsionnelle LOS à 2.4 GHz

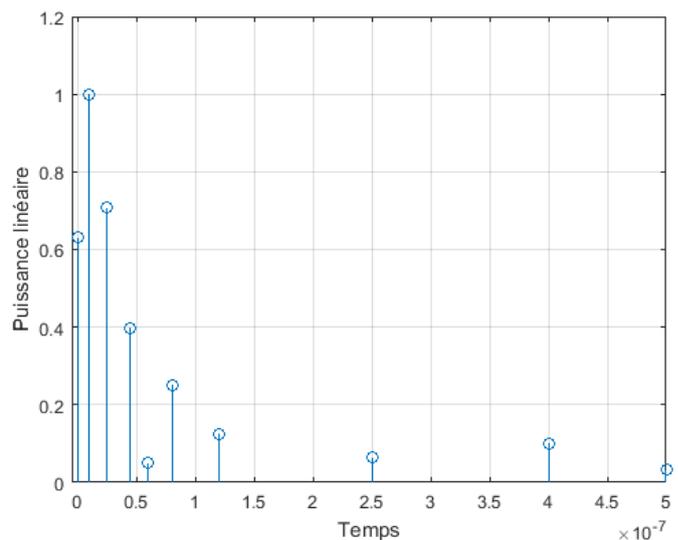


FIGURE 2.12 – La réponse impulsionnelle NLOS à 2.4 GHz

Ces réponses impulsionnelles seront utilisées pour étudier et simuler la robustesse de l'architecture de communications pour un canal à évanouissements. Un exemple d'enveloppe en dBm du canal LOS à 2.4GHz simulé est illustré sur la figure (2.15). A partir de ces réponses impulsionnelles les valeurs de la dispersion des retards pour les 4 configurations sont calculées et présentées au tableau (2.3).

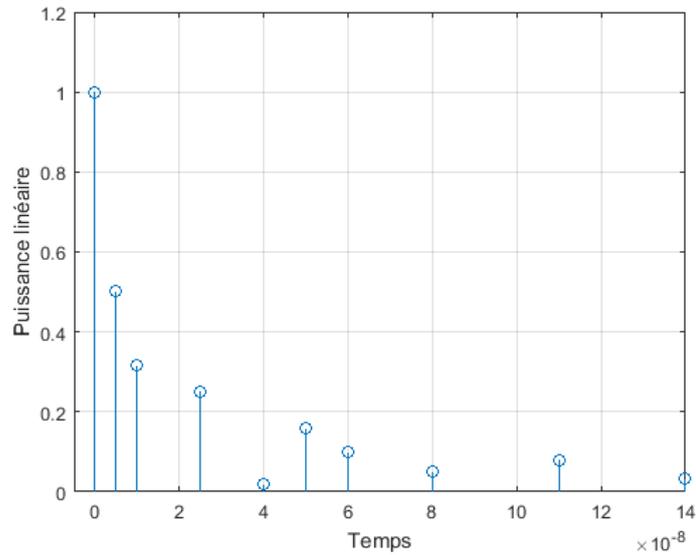


FIGURE 2.13 – La réponse impulsionnelle LOS à 5 GHz

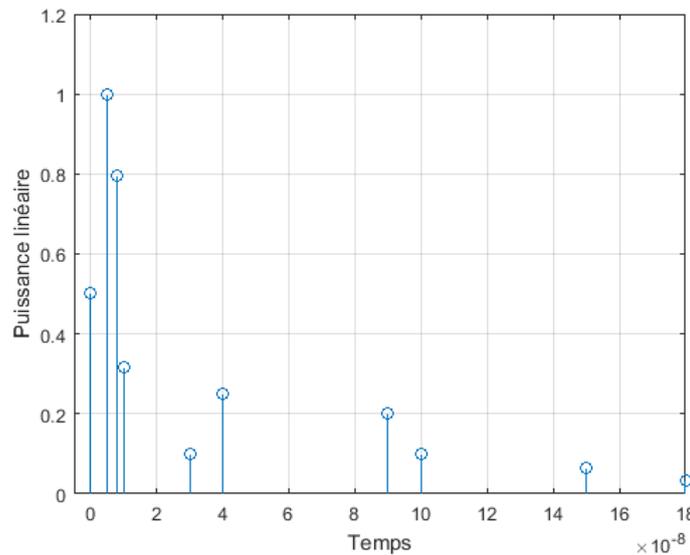


FIGURE 2.14 – La réponse impulsionnelle NLOS à 5 GHz

Ces valeurs vérifient bien les conditions des valeur de la dispersion temporelle déjà présentées au tableau (2.1).

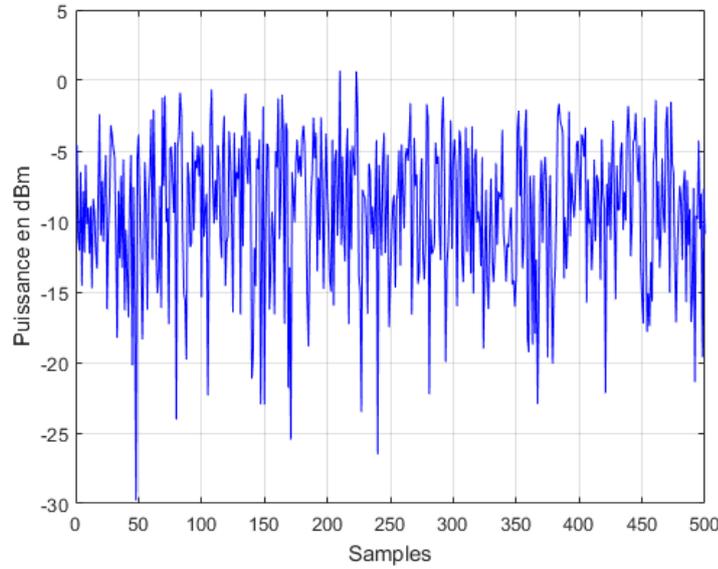


FIGURE 2.15 – L’enveloppe du canal à évanouissement LOS à 2.4GHz en dBm

| | $\tau_{rms}(ns)$ | |
|---------|------------------|-------|
| | LOS | NLOS |
| 2.4 GHz | 42.17 | 87.31 |
| 5 GHz | 29.1 | 35.25 |

TABLE 2.3 – Dispersion des retards τ_{rms} simulées

Maintenant que les réponses impulsionnelles du canal à évanouissements sont présentées, un modèle du bruit industriel sera présenté au paragraphe suivant afin de présenter un modèle de canal industriel complet.

2.5.3 Modèle du bruit industriel

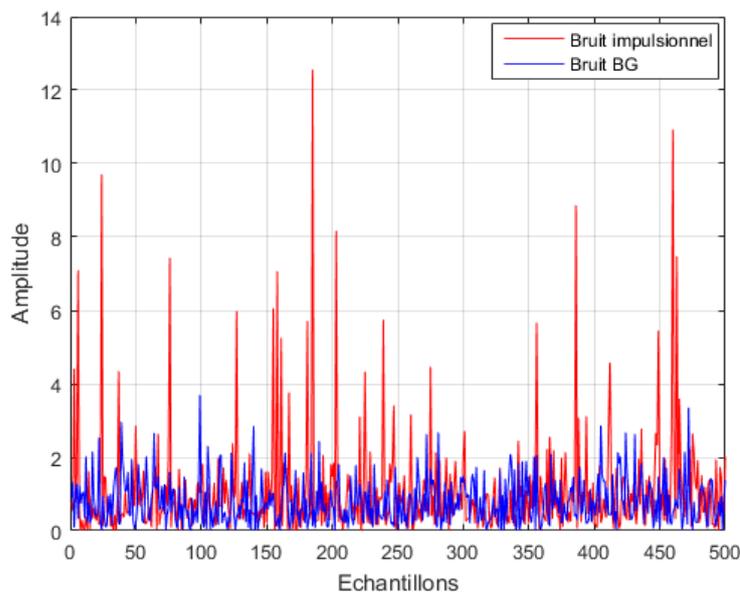
Habituellement, et pour une communication sans fil, le bruit qui s’ajoute au signal reçu est de type blanc gaussien *BABG*. Pour un milieu industriel, les signaux seront affectés par un bruit supplémentaire qui est le bruit impulsionnel provenant des moteurs, régulateurs, équipements électriques et autres...

Pour cette thèse, et du fait de sa simplicité d’utilisation, le bruit industriel $n(t)$ sera modélisé selon le modèle de Markov présenté au paragraphe (2.4.3) qui décrit la loi de commutation du bruit par un bruit blanc gaussien $w(t)$ et d’un bruit gaussien impulsionnel $k(t)$ ayant une variance très élevée tel que décrit dans l’équation (2.29).

Les deux composantes $w(t)$ et $k(t)$ sont des processus gaussiens de moyenne nulle dont les fonctions de densité de probabilité sont respectivement :

$$P[n(t) | etat = B] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{w(t)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.37)$$

$$P[n(t) | etat = M] = \frac{1}{\sqrt{2\pi R\sigma^2}} \exp\left[-\frac{k(t)^2}{2R\sigma^2}\right] \quad (2.38)$$

FIGURE 2.16 – Bruit blanc gaussien et bruit impulsionnel $R = 50$

avec $R \geq 1$ une constante de calibration de l'amplitude du bruit impulsionnel. Elle représente le ratio de la puissance du bruit pour les états "Bons" ou "Mauvais" du canal. Plus cette amplitude est grande, plus le bruit est important. Un exemple du bruit impulsionnel avec $R = 50$ est représenté à la figure (2.16). C'est cette valeur de R que nous garderons pour modéliser l'effet du bruit impulsionnel sur notre système de communication. Car elle illustre un cas de bruit modéré qui peut être assimilé au cas réel.

2.6 Conclusion

Lors de ce deuxième chapitre, une présentation des différentes caractéristiques des canaux de propagation sans fil ont été présentées. Plus particulièrement, les canaux de propagation sans fil en milieu industriel. La communication dans un tel milieu est différente comparée à celle dans un environnement résidentiel ou de bureau du fait de la dimension et de la disposition de l'environnement industriel. Les grandes dimensions du milieu, la présence de machines et matériel métallique, les matériaux constituant les murs et parois, le mouvement des humains et robots, font en sorte que l'environnement industriel soit l'un des environnements les plus difficiles et complexes. Une bonne connaissance du canal de propagation s'avère nécessaire pour acheminer l'information entre un transmetteur et récepteur avec moins de perturbation et plus de fiabilité.

Les performances d'un système de communication sans fil sont directement affectées par les conditions de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Pour développer de tels systèmes, il faut tenir en compte le canal afin de proposer une architecture de communication robuste et fiable. Un modèle de canal industriel hybride simulé a été présenté afin de tester les performances de l'architecture de communication. Ce canal caractérisé par les multi-trajets et affectés par le phénomènes des évanouissements des signaux ainsi que par le bruit industriel a été modélisé en se basant sur des configurations réelles. Ceci dans le but de tester la robustesse de notre système de communication dans une configuration qui s'approche le plus du cas réel.

Chapitre 3

La théorie des ondelettes

Le défi principal associé aux réseaux de capteurs déployés en milieu industriel est la rudesse de cet environnement nécessitant l'adaptation de leur couche physique. Étant donné les ressources limitées de ces réseaux, que ce soit en puissance de calcul, en consommation d'énergie, en taille, ou en connectivité avec l'environnement, des techniques de modulations numériques et de codage de l'information adaptées doivent être utilisées pour améliorer les communications via les réseaux de capteurs industriels sans fil. De très nombreuses couches physiques pour réseaux de capteur sans-fil ont été proposées pour répondre à leurs différentes contraintes [65, 66]. Pour les techniques de modulation, les premières à être utilisées sont des modulations à bande étroite avec porteuse sinusoïdale, qui dérivent des modulations analogiques. Ensuite, d'autres modulations à base d'étalement de spectre, ou multi-porteuses ou encore des modulations impulsionnelles ont été proposées. Ces dernières existent sous plusieurs formes dont nous citons la modulation d'impulsion en amplitude PAM (Pulse amplitude modulation), la modulation par position d'impulsion PPM (Pulse position modulation) ou modulation tout ou rien OOK (On-Off keying). Il existe aussi des modulations impulsionnelles à base de polynôme générateur tel que le polynôme de *Tchebychef* ou polynôme d'*Hermite* [67, 68]. Ces techniques impulsionnelles permettent l'augmentation du débit binaire transmis au détriment de la complexité de l'émetteur et du récepteur en fonction du nombre d'impulsions utilisées. Des dérivées de ces techniques basées sur un partage de bande passante tel ce qui est utilisé pour la modulation multi-porteuses orthogonales OFDM offrent l'avantage d'augmenter le débit sans pour autant augmenter la complexité. Une autre alternative à toutes ces techniques repose sur la modulation des impulsions par la transformée en ondelette orthogonale permettant d'augmenter le débit, mais surtout de bénéficier d'une simplicité lors de la conception du récepteur capable de détecter les différentes formes d'ondes reçues [69, 70].

Dans le cadre de cette thèse, c'est cette dernière technique qui sera utilisée pour moduler les signaux de notre réseau de capteurs sans fil. Avant de présenter l'architecture de communication multi utilisateur globale avec ces modes de fonctionnement, les éléments fondamentaux de la théorie des ondelettes orthogonales sera présentée dans ce chapitre. Ensuite une analyse multi-résolution à base des bancs de filtre sera présentée pour pouvoir expliquer le fonctionnement de l'émetteur et récepteur. L'utilité de la transformée en ondelette dans ce contexte consiste d'une part à générer plusieurs formes d'impulsions via leur synthèse et d'être en mesure de les affecter simplement à chaque utilisateur, et d'autre part la reconstitution de ces impulsions par le récepteur, en offrant une méthode d'analyse simple à mettre en œuvre et efficace. Ces techniques d'analyse et de synthèse constituent l'avantage majeur de la transformée en ondelettes pour les modulations impulsionnelles.

3.1 Introduction

La transformée de Fourier continue est considérée comme un outil universel en traitement du signal. Néanmoins, elle présente certaines limites essentiellement pour traiter les signaux non-stationnaires car elle ne considère pas l'information fournie par la structure temporelle du signal. Ce qui ne permet pas de localiser les discontinuités des signaux. Pour résoudre ce problème, d'autres méthodes ont été proposées comme la transformée de Fourier fenêtrée et la transformée en ondelettes continue [69].

La première solution consiste à utiliser une fenêtre temporelle glissante qui limite l'espace d'analyse à une fraction du signal. Elle présente une résolution temps fréquence fixe ce qui est mal adapté aux signaux présentant de fortes disparités fréquentielles. La solution qui assure un meilleur compromis entre les résolutions temporelle et fréquentielle de l'analyse du signal est la transformée en ondelettes continue qui introduit la notion d'échelle d'analyse. Elle permet d'analyser l'intégralité du signal à différentes échelles pour lequel la taille de la fenêtre d'analyse s'adapte automatiquement. Le développement des algorithmes performants à base de la transformée en ondelettes discrète et de l'analyse multirésolution a ouvert la voie à de nombreuses applications de traitement du signal. Cette transformée a été initialement utilisée par différentes technologies comme technique de débruitage ou encore comme générateur d'impulsions [70]. D'autres travaux ont porté sur l'étude d'une architecture mono-utilisateur [71, 72] mais sans aboutir à un choix technologique précis. Dans les travaux menés par [73], cette technique a servi comme élément fondamental pour les communications impulsionsnelles Ultra Large bande. Pour notre étude, la transformée en ondelette servira comme technique de modulation impulsionsnelle large bande et ultra large bande pour une architecture robuste dans un environnement industriel.

3.2 La transformée en ondelette continue et discrète

La transformée en ondelette existe sous deux variantes, transformée continue et discrète. Cette dernière est une réplique numérisée ou discrétisée de la transformée continue en temps-échelle [74]. Dans ce présent paragraphe nous présenterons, la théorie des ondelettes continue et discrète, mais pour notre projet, uniquement la transformée discrète sera utilisée.

3.2.1 La transformée en ondelette continue

Cette transformation consiste à faire une projection du signal sur un ensemble de fonctions appelées ondelettes. Soit une fonction Ψ de l'ensemble $L^2(R)$ caractérisée par une moyenne nulle et appelée ondelette mère. La famille de cette fonction notée $\Psi_{a,b}$ est obtenue par action conjointe de deux opérations : la dilatation, et la translation, ou décalage dans le temps :

$$\Psi(t) \rightarrow \Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.1)$$

où a est le facteur d'échelle et b le paramètre de translation. La variable a représente l'équivalent de l'inverse de la fréquence, c'est-à-dire que plus a est petit, moins l'ondelette créée est étendue dans le temps. L'élément $\frac{1}{\sqrt{a}}$ assure la conservation de l'énergie lors du changement d'échelle. L'équation qui suit montre cette conservation de l'énergie :

$$\|\Psi_{a,b}\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \right|^2 dt = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} a |\Psi|^2 dt = \|\Psi\|^2 \quad (3.2)$$

L'ensemble des fonctions d'analyse $\Psi_{a,b}$ définit un espace à deux dimensions appelé "plan temps-échelle" dans lequel l'information du signal est représentée.

Par définition, la transformée en ondelettes continue d'un signal $x(t)$ de $L^2(\mathbb{R})$ est définie comme étant l'intégrale du signal multiplié par le conjugué de l'ondelette mère :

$$x(t) \rightarrow T_{\Psi} x(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3.3)$$

En fonction de l'ondelette utilisée, la transformée en ondelettes peut être réversible et la fonction peut être reconstruite après analyse suivant l'équation suivante :

$$x(t) = \frac{1}{c_{\Psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} T_{\Psi} x(a, b) \Psi_{a,b} da db \quad (3.4)$$

avec c_{Ψ} un coefficient qui dépend de la fonction mère qui est donné par l'équation : $c_{\Psi} = \int_0^{+\infty} |\Psi(\gamma)|^2 \frac{d\gamma}{\gamma}$ et $\Psi(\gamma)$ la transformée de Fourier de $\Psi(t)$. Ce coefficient dépend de l'admissibilité de la fonction d'ondelette analysante et de la condition d'existence de ce coefficient. Cette condition impose que la transformée de Fourier de l'ondelette soit nulle pour la fréquence nulle : en d'autres termes, l'ondelette ne doit pas comporter de composante continue. Dans ce cadre, l'admissibilité est assurée via la transformée de Fourier de l'ondelette mère présentée dans l'équation suivante :

$$\int_0^{+\infty} |\Psi(\gamma)|^2 \frac{d\gamma}{\gamma} = c_{\Psi} < +\infty \quad (3.5)$$

avec : $\Psi(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 0$. Le choix de l'ondelette reste ouvert et dépend essentiellement de la robustesse souhaitée, ainsi que la vitesse de convergence de l'algorithme de reconstruction, ce qui amène à une reconnaissance complète.

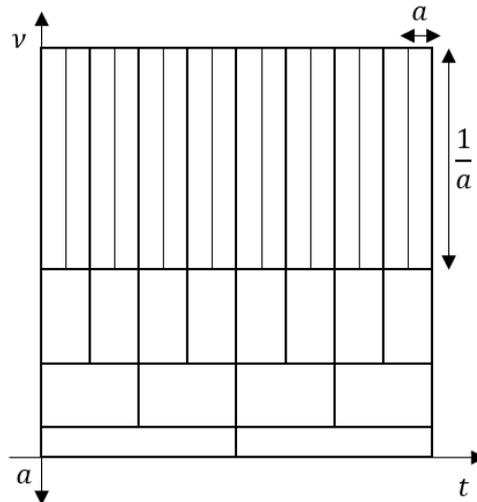


FIGURE 3.1 – Pavage du plan temps-échelle

Généralement, l'ondelette est caractérisée par le plan temps-fréquence, sa résolution est estimée par l'écart-type temporel ΔT_{Ψ_a} et l'écart-type fréquentiel ΔF_{Ψ_a} de l'ondelette analysante $\Psi_a = \Psi_{a,b}$ tel que :

$$(\Delta T_{\Psi_a})^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} t^2 |\Psi_a(t)|^2 .dt = \int_{-\infty}^{+\infty} t^2 \frac{1}{a} |\Psi_a(t/a)|^2 .dt = \int_{-\infty}^{+\infty} a^2 x^2 \frac{1}{a} |\Psi(x)|^2 .dx = a^2 (\Delta T_{\Psi})^2 \quad (3.6)$$

et

$$(\Delta F_{\Psi_a})^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \nu^2 |\Psi_a(\nu)|^2 .d\nu = \int_{-\infty}^{+\infty} \nu^2 \frac{1}{a} |\Psi_a(a\nu)|^2 .d\nu = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{a^2}{x^2} \frac{1}{a} |\Psi(x)|^2 \frac{dx}{a} = \frac{(\Delta F_{\Psi})^2}{a^2} \quad (3.7)$$

$\Psi_a(\nu)$ est la transformée de Fourier de $\Psi_a(t)$. Les cellules élémentaires qui couvrent le plan temps-échelle sont de surface constante dans la mesure où la résolution temporelle est proportionnelle à a et que la résolution fréquentielle est inversement proportionnelle à a comme le montre la figure (3.1).

3.2.2 La transformée en ondelette discrète

Par définition, la transformée en ondelettes discrète (DWT, Discrete Wavelet Transform) est obtenue après échantillonnage des coefficients d'échelle et de temps. La formule de construction des ondelettes est doublement continue, et les coefficients a et b , comme le montre l'équation (3.8), sont réels et l'intégrale est continue [69]. Cette transformation est donc fortement redondante. Néanmoins, un échantillonnage de la transformée continue permet d'obtenir une transformation non-redondante. Pour la transformée dyadique à l'échelle 2^j , on obtient :

$$DWT_{\Psi}x(j, k) = T_{\Psi}x(a = 2^j, b = k2^j) = 2^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\Psi(2^{-j}t - k).dt \quad (3.8)$$

Certaines de ces ondelettes peuvent être générées par l'analyse multirésolution. Dans le paragraphe qui suit, nous montrons comment les coefficients de la transformée en ondelettes discrète d'un signal peuvent être obtenus par analyse multirésolution.

3.3 Analyse multirésolution et banc de filtres

L'analyse multirésolution ou AMR (MRA, Multi Resolution Analysis) est une technique en traitement de signal qui permet la construction des bases orthonormées d'ondelettes. Cette technique a été développée par Mallat [75] pour le traitement d'image initialement et a été utilisée dans de nombreux travaux de recherche [71, 72] par la suite. Le principe de l'AMR consiste à décomposer le signal à analyser en deux séries de coefficients qui représentent l'approximation et les détails du signal, respectivement.

3.3.1 Définition des espaces d'approximation et de détails

L'AMR d'un espace $L^2(R)$ consiste en des séquences successives de sous-espaces d'approximation $\{V_j, j \in Z\}$ qui vérifient les propriétés suivantes :

- Les sous-espaces sont emboîtés sous la forme $\dots V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \dots$ (\subset représente l'opérateur de sous-ensemble).

- L'intersection des différents sous-espaces V_j est nulle : $\bigcap_{j=-\infty}^{j=+\infty} V_j = \{0\}$
- L'union des V_j est dense dans $L^2(R)$ soit $\bigcup_{j=-\infty}^{j=+\infty} V_j = \{L^2(R)\}$
- Un signal $x(t)$ est dans V_j si et seulement si sa version contractée par un facteur 2 est dans V_{j-1} tel que : $x(t) \in V_j \Leftrightarrow x(2t) \in V_{j-1} \Leftrightarrow x(2^j t) \in V_0$
- Si $x(t)$ est dans V_j , toutes ses versions translatées sont dans V_j :

$$x(t) \in V_j \Leftrightarrow x(t - n) \in V_j, n \in \mathbb{Z}$$

- Il existe une fonction $\psi(t)$ de V_0 telle que la famille $\{\psi(t - n), n \in \mathbb{Z}\}$ est une base orthonormée de V_0 .

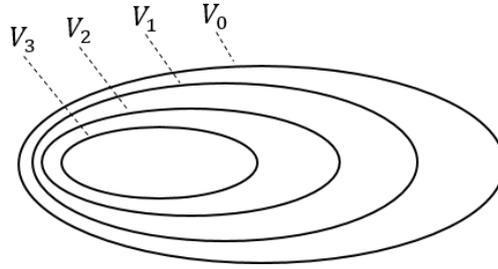


FIGURE 3.2 – Inclusion des sous espaces fermés V_i

Les espaces V_j forment des espaces d'approximation. La projection de la fonction $x(t)$ de $L^2(R)$ sur le sous-espace V_j forme ainsi une approximation de la fonction $x(t)$ à l'échelle 2^{-j} . La présentation temps-fréquence s'explique par le fait que lorsque l'on passe de V_j à V_{j+1} on dilate l'ondelette d'un facteur 2 et on divise ainsi la bande fréquentielle par 2 (figure 3.2).

La différence d'information qui existe entre un signal à une résolution donnée et son approximation, crée les coefficients de détails qui représentent l'information perdue par l'approximation. En d'autres termes, les coefficients d'approximation à une résolution donnée se retrouvent à partir de ceux d'approximation et de détails à la résolution suivante. Pour former des bases orthogonales dans l'espace $L^2(R)$, nous pouvons définir le sous-espace W_j qui illustre le complémentaire orthogonal à V_j dans V_{j-1} , d'une manière à ce que la somme des sous-espaces d'approximation et de détail à la résolution j forme le sous-espace d'approximation à la résolution $j - 1$:

$$V_{j-1} = V_j \oplus W_j \tag{3.9}$$

et

$$W_j \perp W_{j'}, (j \neq j') \tag{3.10}$$

Le symbole \oplus représente l'opérateur de sommation, et le symbole \perp représente l'opérateur d'orthogonalité figure (3.3).

De la même manière que pour V_j , W_j présente certaines conditions :

- L'intersection des différents sous-espaces W_j est nulle : $\bigcap_{j=-\infty}^{j=+\infty} W_j = \{0\}$.

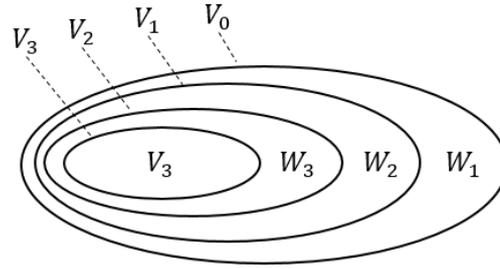


FIGURE 3.3 – Les sous espaces d'ondelettes

- L'union des V_j est dense dans $L^2(R)$ soit $\bigcap_{j=-\infty}^{j=+\infty} W_j = \{L^2(R)\}$
- $x(t) \in W_j \Leftrightarrow x(2t) \in W_{j-1}$, $x(t)$ est dans W_j
- $x(t) \in W_j \Leftrightarrow x(t-n) \in W_{j-1}$, $n \in Z$, si $x(t)$ dans W_j est vérifiée, ses translations entières sont dans W_j .

3.3.2 Transformée en ondelette orthogonale

Par définition l'AMR est représentée sous la forme suivante :

$$V_0 = V_1 \oplus W_1 = V_2 \oplus W_2 \oplus W_2 = V_3 \oplus W_1 \oplus W_2 \oplus W_2 = \dots$$

Autrement dit, un signal $x(t) \in V_0$, avec V_0 défini comme l'espace d'échelle zéro, peut être décomposé en deux parties : une qui contient les informations de détails correspondant à la projection de $x(t)$ dans W_1 et l'autre contenant les informations d'approximation correspondant à la projection de $x(t)$ dans V_1 . Les informations d'approximation dans V_1 peuvent elles-mêmes être à nouveau décomposées pour obtenir le niveau suivant de détails et d'approximation dans W_2 et dans V_2 respectivement. Ce processus de décomposition peut être répété jusqu'à ce que l'échelle visée j soit atteinte.

A. Fonction d'échelle

L'analyse multirésolution rend la fonction d'échelle plus intéressante en lui attribuant des propriétés mieux adaptées. Ainsi $V_0 \subset V_{-1}$ signifie que n'importe quelle fonction de V_0 peut s'écrire comme une combinaison linéaire des fonctions de V_{-1} . Considérons $\phi(t)$ dans V_0 et $\phi(2t-n)$ dans V_{-1} telle que :

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_n h_n \phi(2t-n) \tag{3.11}$$

Les coefficients h_n représentent les coordonnées de $\phi(t)$ dans la base $\{\phi(2t-n), n \in Z\}$. Pour une base orthonormée, ces coordonnées vérifient les relations suivantes :

$$h_n = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(2t-n) dt \tag{3.12}$$

avec $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} h_n^2 = 1$ et $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} h_n = \sqrt{2}$

B. Fonction ondelette

On peut caractériser l'ondelette $\Psi(t)$ dans $W_0 \subset V_{-1}$ en introduisant le filtre discret g tel que :

$$\Psi(t) = \sqrt{2} \sum_n g_n \phi(2t - n) \quad (3.13)$$

Les coefficients g_n représentent les coordonnées de $\Psi(t)$ dans la base $\phi(2t - n)$. Pour une base orthonormée, ces coordonnées vérifient les relations suivantes :

$$g_n = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(2t - n) dt \quad (3.14)$$

avec $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} g_n^2 = 1$ et $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} g_n = \sqrt{2}$

Les filtres g et h sont des filtres miroirs en quadrature et ils sont reliés par la relation suivante :

$$g_n = (-1)^n h_{1-n} \quad (3.15)$$

3.3.3 L'analyse multirésolution

La fonction $x_a^j(t)$ représente l'information d'approximation d'un niveau j après la projection du signal $x(t)$ sur l'espace V_j par :

$$x_a^j(t) = \sum_k a_{j,k} \phi_k(2^{-j}t) = \sum_k a_{j,k} \phi_{j,k}(t), \quad k \in Z \quad (3.16)$$

tel que :

$$a_{j,k} = \langle x(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \quad (3.17)$$

Où $a_{j,k}$, représente le coefficient d'approximation k à la résolution j . De la même manière, quand le signal $x(t)$ est projeté dans l'espace W_j , l'information de détail du niveau j est obtenue par :

$$x_d^j(t) = \sum_k d_{j,k} \psi_k(2^{-j}t) = \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad k \in Z \quad (3.18)$$

avec

$$d_{j,k} = \langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad (3.19)$$

où $d_{j,k}$ représente le coefficient de détail k à la résolution j . Néanmoins, quand un signal $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ est décomposé dans l'ensemble des sous-espaces d'approximation et de détail comme suit :

$$L^2(\mathbb{R}) = \sum_{j=-\infty}^j W_j \oplus V_j \quad (3.20)$$

nous obtiendrons :

$$x(t) = \sum_{j=-\infty}^j \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (3.21)$$

Si $j \rightarrow \infty$, l'équation précédente peut être simplifiée pour donner :

$$x(t) = \sum_{j=-\infty}^j \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (3.22)$$

Nous remarquons que les principes de la transformée en ondelettes orthogonale et de l'analyse multirésolution convergent. L'AMR constitue ainsi la base théorique de la transformée en ondelettes orthogonale.

3.3.4 Banc de filtres : algorithme d'analyse

L'analyse multirésolution permet de décomposer un signal en coefficients d'approximation et de détail en se basant sur une fonction d'échelle $\phi(t)$ et une ondelette $\psi(t)$ tel que présenté dans le paragraphe précédent. Les deux fonctions sont estimées à partir des paramètres h et g . En effet, l'analyse multirésolution peut être construite à partir des filtres numériques h et g . Les coefficients d'approximation et de détails à une échelle donnée j s'expriment tel un produit scalaire de la manière suivante :

$$\begin{cases} a_{j,k} = \langle x, \phi(t) \rangle \\ d_{j,k} = \langle x, \psi(t) \rangle \end{cases} \quad (3.23)$$

avec $\langle g, h \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)h(t)dt$. Les coefficients d'approximation $a_{j,k}$ à l'échelle j sont calculés d'une manière récursive :

$$\begin{aligned} a_{j,k} &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^{-j}t - k) dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)2^{-\frac{j}{2}} \left[\sqrt{2} \sum_n h_n \phi(2(2^{-j}t - k) - n) \right] dt \\ &= \sum_n h_n \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)2^{-\frac{(j-1)}{2}} \phi(2^{-(j-1)}t - (2k + n)) dt \\ &= \sum_n h_n a_{j-1, 2k+n} \\ &= \sum_n h_{n-2k} a_{j-1, n} \end{aligned}$$

On en déduit :

$$a_{j,k} = \sum_n \bar{h}_{2k-n} a_{j-1, n} \quad (3.24)$$

avec $\bar{h}_n = h_{-n}$ Pour réaliser une architecture de filtrage, les coefficients d'approximation à l'échelle j s'obtiennent donc à partir des coefficients d'approximation à l'échelle $j - 1$ par convolution puis par décimation d'un facteur 2. Les coefficients de détails, sont obtenus de la même manière par la relation suivante :

$$d_{j,k} = \sum_n \bar{g}_{2k-n} a_{j-1, n} \quad (3.25)$$

avec $\bar{g}_n = g_{-n}$

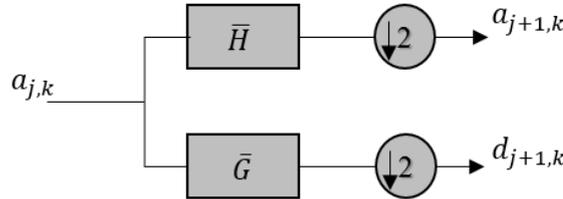


FIGURE 3.4 – Décomposition des bloque passe haut et passe bas

La figure (3.4) représente un exemple de décomposition par banc de filtres : les coefficients d'approximation et de détails à l'échelle $j - 1$ sont déterminés à partir des coefficients d'approximation à l'échelle j par convolution avec un filtre passe-bas \bar{h} et un filtre passe-haut \bar{g} suivi d'une décimation d'un facteur 2.

3.3.5 Banc de filtres : algorithme de reconstruction

Dans la phase de reconstruction ou ‘synthèse’, les coefficients d’approximation sont établis à partir des détails et de l’approximation de la résolution suivante. Si W_j est le complémentaire orthogonal de V_j dans V_{j-1} , nous pouvons en déduire que l’approximation $x_{j-1}(t)$ du signal $x(t)$ à la résolution $j-1$ est égale à la somme de l’approximation $x_j(t)$ à la résolution j et du signal de détail reconstruit à cette résolution :

$$x_{j-1}(t) = x_j(t) + \sum_{j=-\infty}^j \sum_{l=-\infty}^{+\infty} d_{j,l} \psi_{j,l}(t) \quad (3.26)$$

L’approximation $x_j(t)$ correspond à la projection de $x(t)$ sur les éléments de la base V_j et peut s’exprimer de la manière suivante :

$$x_j(t) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} a_{j,l} \phi_{j,l}(t) \quad (3.27)$$

On a donc :

$$\sum_{l=-\infty}^{+\infty} a_{j-1,l} \phi_{j-1,l}(t) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} a_{j,l} \phi_{j,l}(t) + \sum_{l=-\infty}^{+\infty} d_{j,l} \psi_{j,l}(t) \quad (3.28)$$

En effectuant le produit scalaire avec la fonction $\phi_{j-1,k}(t)$, nous obtenons :

$$a_{j-1,k} = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} a_{j,l} \langle \phi_{j,l}(t), \phi_{j-1,k}(t) \rangle + \sum_{l=-\infty}^{+\infty} d_{j,l} \langle \psi_{j,l}(t), \phi_{j-1,k}(t) \rangle \quad (3.29)$$

Ces produits scalaires peuvent être exprimés de la façon suivante :

$$\begin{cases} \langle \phi_{j,l}(t), \phi_{j-1,k}(t) \rangle = h_{k-2l} \\ \langle \psi_{j,l}(t), \phi_{j-1,k}(t) \rangle = g_{k-2l} \end{cases} \quad (3.30)$$

L’algorithme de synthèse sera déduit sous la forme suivante :

$$a_{j-1,k} = \sum_l a_{j,l} h_{k-2l} + \sum_l d_{j,l} g_{k-2l} \quad (3.31)$$

La figure (3.5) représente la synthèse ou reconstitution par le banc de filtres : les coefficients d’approximation à l’échelle j sont déterminés à partir des coefficients d’approximation à l’échelle $j+1$ par un sur-échantillonnage d’un facteur 2, suivi d’une convolution avec un filtre passe-bas h et un filtre passe-haut g .

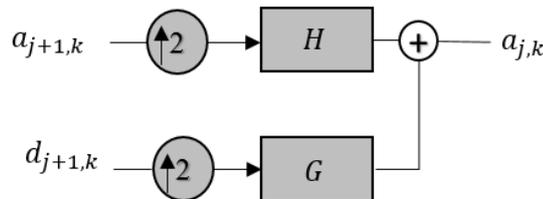


FIGURE 3.5 – Reconstruction à l’aide de filtres passe haut et passe bas

3.3.6 Structure globale du banc de filtres

A présent que les deux algorithmes d'analyse et de synthèse sont présentés, nous pouvons calculer la transformée en ondelettes discrète sur des bases orthonormées par des opérations de filtrage numérique suivies par un sous-échantillonnage présenté à la figure (3.4) pour l'analyse. De la même façon, la synthèse peut être assurée par un filtrage numérique précédé d'un sur-échantillonnage présenté à la figure (3.5).

La figure (3.6) ci-dessous, illustre la structure d'une analyse et d'une synthèse multirésolution complète jusqu'à l'échelle 3 [69]. Le signal d'entrée à analyser correspond aux coefficients d'approximation à l'échelle 0. La structure d'analyse génère des coefficients d'approximation ainsi que des coefficients de détails jusqu'à l'échelle 3. En ce qui concerne la synthèse, la reconstitution du signal d'origine à partir du signal d'approximation et des coefficients de détails se fait en itérant l'architecture présentée ci-dessous.

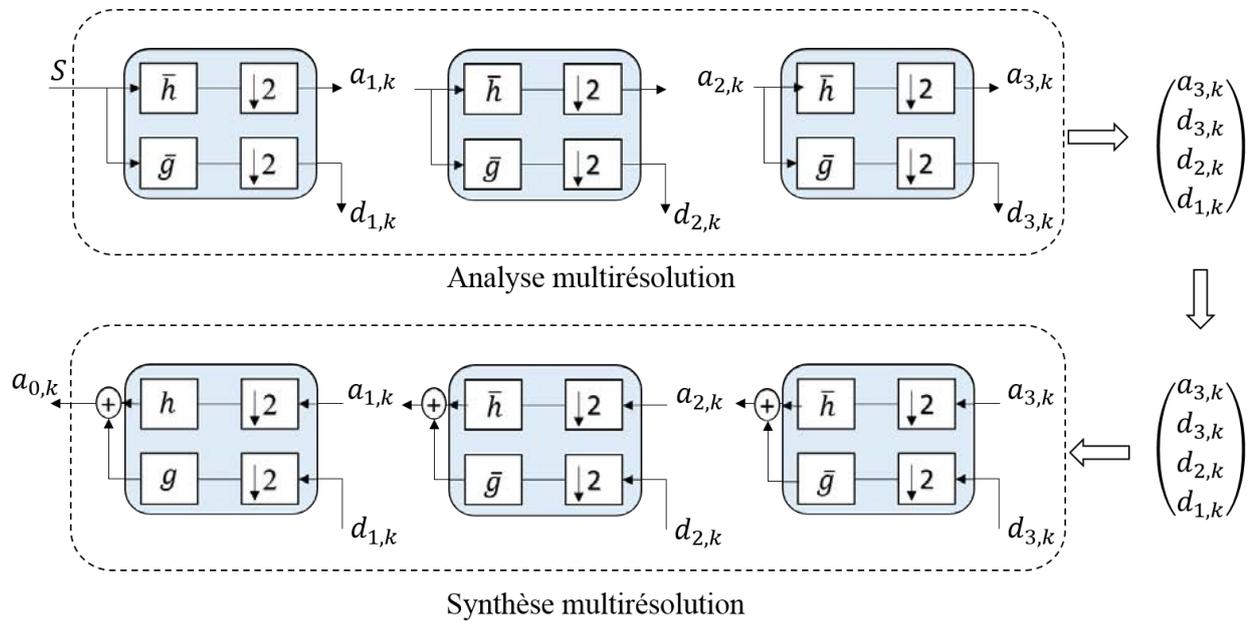


FIGURE 3.6 – Analyse et synthèse multirésolution à l'échelle 3

3.4 Transformée par paquets d'ondelettes

L'analyse multirésolution dans l'espace $L_2(\mathbb{R})$ des fonctions continues d'une variable réelle et de carré intégrable, peut être étendue à des sous-espaces de celui-ci. C'est-à-dire que les mêmes algorithmes vus précédemment peuvent être appliqués aux sous-espaces W_j . La figure (3.7) illustre le principe de la décomposition en paquets d'ondelettes. Ceci en faisant une décomposition en paquets d'ondelettes par l'analyse de tous les sous-espaces engendrés.

Le principe de la décomposition par la transformée en ondelettes discrète est représenté à la figure (3.8). L'algorithme d'analyse appliqué à la transformée par paquets d'ondelettes permet une décomposition en sous-bandes de fréquences du signal d'entrée. Cet algorithme d'analyse peut être appliqué soit généralement par les mêmes fonctions d'échelle et d'ondelette, soit par des fonctions différentes. Ainsi, il est possible de changer les fonctions de base à chaque échelle.

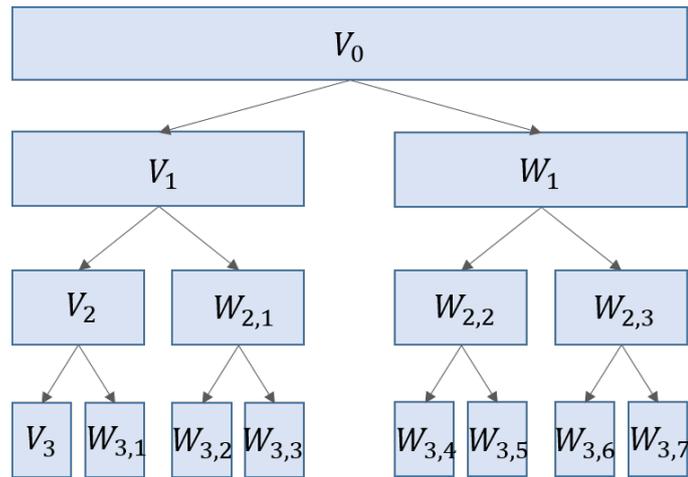


FIGURE 3.7 – Analyse par paquets d'ondelette

La reconstruction parfaite des signaux est assurée par la réutilisation lors de la synthèse, et pour une résolution précise, des fonctions conjuguées à celles utilisées lors de l'analyse à cette même résolution. De là, l'analyse par paquets d'ondelette est générée en analysant les sous-espaces de détails du signal en plus des sous-espaces d'approximation.

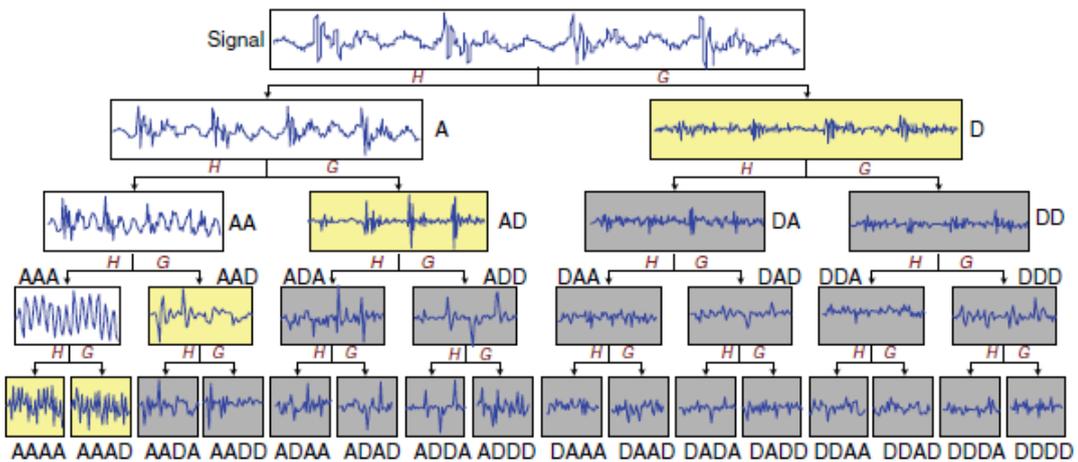


FIGURE 3.8 – Arbre de décomposition en paquets d'ondelette

Cette transformée a pour avantage d'être une structure symétrique qui se traduit par des fréquences d'échantillonnage identiques sur toutes les entrées du banc de filtres de synthèse, et sur toutes les sorties du banc de filtres d'analyse. Ce qui facilitera la génération des impulsions si une architecture à base de la transformée par paquets d'ondelette discrète est bien implémenter. Ainsi, notre choix d'architecture sera justifié afin de garantir une meilleure reconstitution des signaux émis au niveaux des différents récepteurs.

3.4.1 Le concept de la transformée par paquets d'ondelettes

Par définition et tel que vu précédemment, l'analyse multirésolution d'un espace d'approximation V_j se décompose en deux espaces de résolution V_{j+1} et W_{j+1} . Par conséquent, cette division est obtenue par transformation de la base $\{\phi_j(2^j t - k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ de V_j en deux bases orthogonales : $\{\phi_{j+1}(2^{j+1} t - k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ de V_{j+1} et $\{\psi_{j+1}(2^{j+1} t - k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ de W_{j+1} . D'où l'intérêt principal de la décomposition en paquets d'ondelettes qui permet d'étendre la construction d'une nouvelle base à partir de tous les sous-espaces engendrés.

Sa particularité est la création de bases orthogonales obtenues non seulement par projection des espaces d'approximation, mais également des espaces de détails W_{j+1} décomposables en sous-espaces d'approximation et de détails. Ceci simplifie par la suite la gestion des échantillons fournis en entrée des bancs de filtres, ainsi que leur synchronisation dans une structure symétrique.

La décomposition par paquets d'ondelette est réalisée par une structure en arbre comme le montre la figure (3.9). Elle assure une analyse spectrale uniforme qui consiste à la décomposition du signal en des sous-bandes de fréquences de largeur identique. Il en découle que l'étape de la synthèse consiste à préciser le type des données pour chaque sous-bande. Cependant, l'augmentation de la profondeur de synthèse conduit à une grande complexité des impulsions générées. Notons P l'arbre dans lequel chaque nœud correspond à un sous-espace P_j^n qui admet une base orthogonale $\{P_j^n(t - k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$. Pour un niveau de résolution j on aura :

$$P_j^n = P_{j+1}^{2n} \oplus P_{j+1}^{2n+1} \quad (3.32)$$

Les fonctions obtenues sont des paquets d'ondelettes déterminés d'une manière récursive par :

$$P_{j+1}^{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) P_{j+1}^{2n}(2t - k) \quad (3.33)$$

$$P_{j+1}^{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) P_{j+1}^{2n}(2t - k) \quad (3.34)$$

Il faut noter que :

- P_0^0 représente la fonction d'échelle et P_1^0 l'ondelette associée via l'analyse multi-résolution et notées respectivement ϕ et ψ .
- Les filtres h_n et g_n sont respectivement les filtres passe-bas et passe-haut représentés par des filtres miroirs en quadrature, et liés par l'équation suivante :

$$G(n) = (-1)^n h(1 - n) \quad (3.35)$$

- La réponse impulsionnelle des filtres satisfait les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \sum_n h(n - 2k) h(n - 2l) &= \delta_{kl} \text{ et } \sum_n h(n) = \sqrt{2} \\ \sum_n g(n - 2k) g(n - 2l) &= \delta_{kl} \text{ et } \sum_n g(n) = 0 \end{aligned}$$

Pour conclure, les filtres de la décomposition ne sont d'autres que les conjugués des filtres utilisés dans la reconstruction des signaux.

3.4.2 Décomposition et reconstruction

Toute fonction $f(t)$ de l'espace $L^2(\mathbb{R})$ peut être décomposée sur la base de fonctions

$\{P_{j,k}^n(t), (j, k) \in Z \times Z\}$ de la manière suivante :

$$f(t) = \sum_{n,k} a_{j,k}^n p_{j,k}^n(t) \quad (3.36)$$

avec j la profondeur de la décomposition, k l'indice du temps, et n l'indice fréquentiel équivalent au numéro de l'ondelette.

Les coefficients $a_{j,k}^n$ à une échelle donnée j s'expriment comme un produit scalaire du signal à analyser et de la fonction analysante :

$$a_{j,k}^n = \langle f, p_{j,k}^n \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) p_{j,k}^n(t) dt \quad (3.37)$$

Sur la figure (3.9), un exemple de la décomposition en paquet d'ondelettes dont l'analyse de la fonction f est effectuée avec une profondeur de 4.

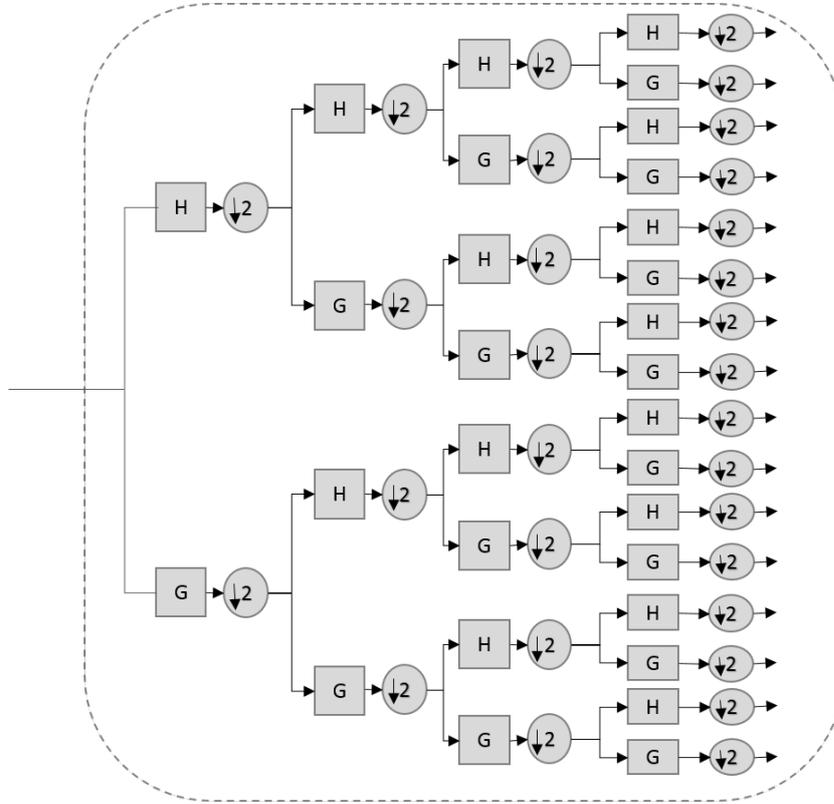


FIGURE 3.9 – Décomposition par paquets d'ondelette

L'ensemble des coefficients $a_{j,k}^n$ forme la transformée par paquets d'ondelettes discrète (DWPT, Discrete Wavelet Packet Transform) de $f(t)$ et sa transformée inverse (IDWPT, Inverse Discrete Wavelet Packet Transform) est donnée par :

$$a_{j,k}^n = \sum_{i \in Z} h_{k-2i} a_{j,k}^{2n} + \sum_{i \in Z} g_{k-2i} a_{j,k}^{2n+1} \quad (3.38)$$

Donc, la transformée par paquets d'ondelettes est assimilée à un filtrage du signal à l'aide d'un filtre passe-bas h_n et d'un filtre passe-haut g_n . Concernant la synthèse, il s'agit de reconstituer

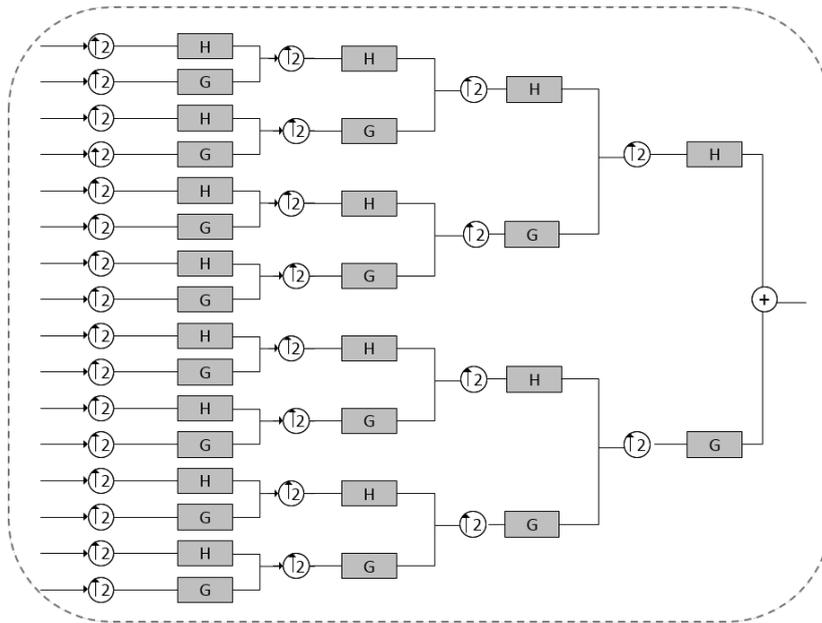


FIGURE 3.10 – Reconstruction par paquets d'ondelette

les signaux en un seul signal qui représente le signal déjà analysé. Ces deux démarches donnent naissance aux bancs de filtres qui vérifient les conditions suivantes :

$$\bar{h}_n = h_{-n} \text{ et } \bar{g}_n = g_{-n} \quad (3.39)$$

L'analyse en paquets d'ondelettes conduit à une décomposition en sous-bandes de fréquences du signal, ajustable par le choix des composantes. Elle offre une grande souplesse pour l'utilisateur. Et permet d'avoir une architecture facile à utiliser qui se base sur l'attribution de plusieurs formes d'impulsions à chaque entrée du banc de filtres et dont le décodage se fait d'une manière symétrique à l'émetteur.

A titre d'exemple et comme illustré sur les figures (3.9) et (3.10) précédentes, le fait d'avoir 16 entrées permet d'avoir 16 signaux différents en sélectionnant des formes différentes d'ondelettes par l'activation ou non de l'entrée correspondante. Une entrée peut contenir un seul bit de données ou une trame binaire de données, dépendamment du mode de communication souhaité. De la même manière à la réception, chacune des 16 sorties peut correspondre soit un bit ou une trame binaire qui correspondent à un utilisateur unique. Le mode de fonctionnement de l'architecture sera détaillé au chapitre suivant.

3.4.3 Ondelette de Haar

L'ondelette Haar est définie par :

$$\begin{cases} 1 & 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.40)$$

La propriété de symétrie de l'ondelette de Haar montre que sa phase est linéaire, ce qui signifie que lorsqu'un filtrage par ondelette de Haar est appliqué sur un signal, il n'y aura aucune

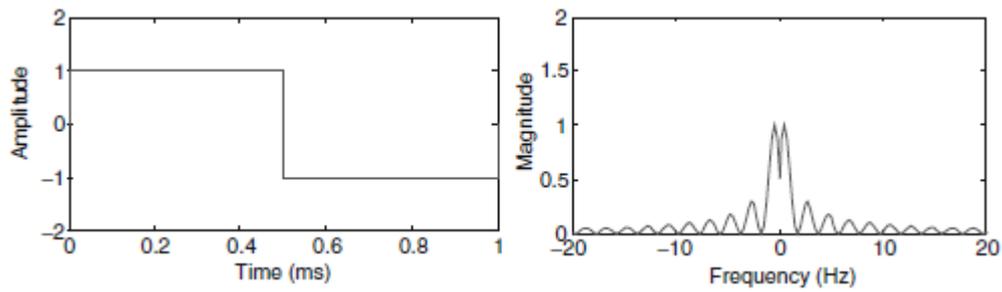


FIGURE 3.11 – Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Haar [69]

distorsion de phase dans le signal filtré. En plus de l'orthogonalité, cette caractéristique de linéarité de phase est très importante pour la conception des filtres. La forme rectangulaire de l'ondelette Haar détermine son spectre avec des caractéristiques de décomposition lentes, menant à une résolution de filtrage passe-bas. La forme de l'ondelette ainsi que son spectre sont présentés dans la figure (3.11).

3.4.4 Ondelette de Daubechies

La famille des ondelettes de Daubechies est aussi caractérisée par leur orthogonalité et leur symétrie, mais contrairement à l'ondelette Haar, elles présentent une large distorsion de phase. Ce qui signifie que ce type d'ondelettes ne peut pas être utilisé dans des applications où les informations de synchronisation ou de phase d'un signal doivent être conservées.

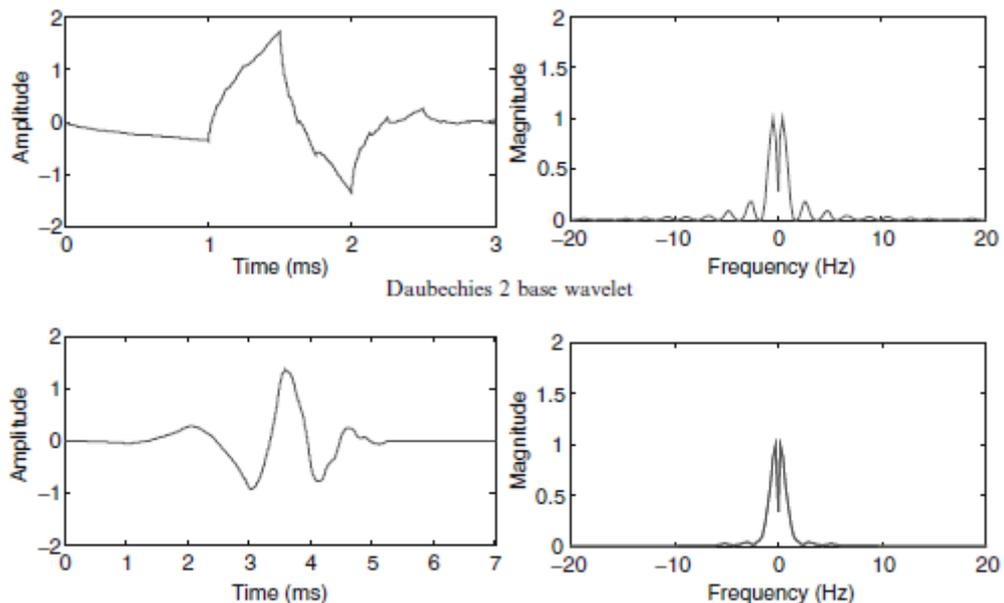


FIGURE 3.12 – Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Daubechies (2 et 4) [69]

C'est une ondelette compacte présentée avec une largeur de $2N - 1$ où N est l'ordre de

l'ondelette (théoriquement N peut être infini). Dans les domaines d'applications des ondelettes, les ondelettes de Daubechies sont exploitées jusqu'à l'ordre 20. Généralement, elles n'ont pas d'expression explicite sauf pour $N = 1$ qui correspond à l'ondelette de Haar. La figure (3.12) montre les ondelettes de Daubechies d'ordres 2 et 4.

3.4.5 Ondelette de Symlet

La famille des Symlets est également caractérisée par leur orthogonalité et leur pseudo symétrie mais avec une distorsion de phase moins importante comparée avec les ondelettes de Daubechies. La Symlet d'ordre N possède N moments nuls pour une largeur $2N - 1$. Elles sont très proches des ondelettes de Daubechies mais possèdent une meilleure symétrie. La figure (3.13) montre la forme ainsi que le spectre des Symlets d'ordres 2 et 4.

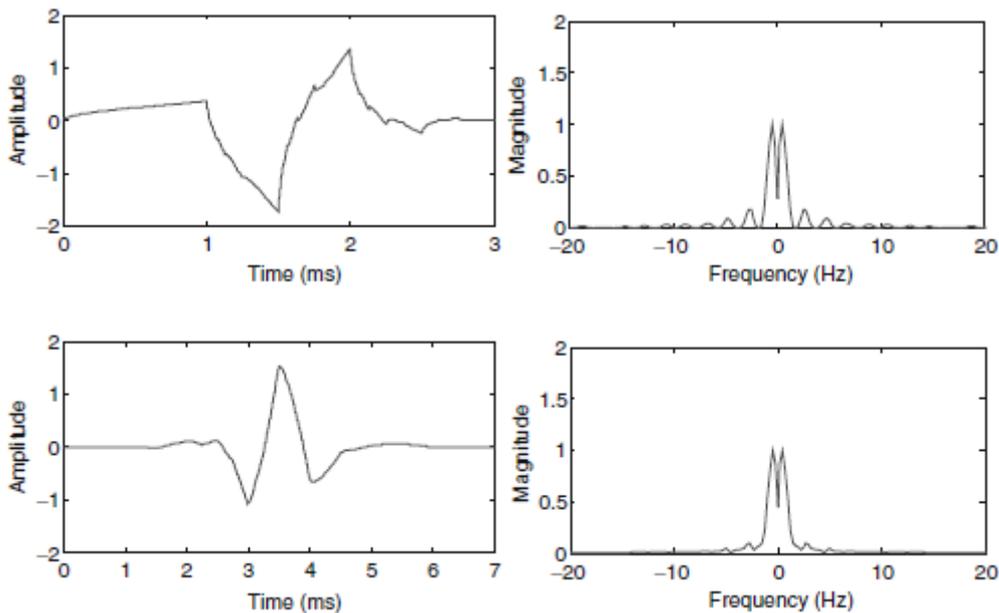


FIGURE 3.13 – Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Symlet (2 et 4) [69]

3.4.6 Ondelette de Coiflets

La famille des ondelettes Coiflets est caractérisée par leur orthogonalité, et leur pseudo symétrie. Cette propriété permet la linéarité de phase de ces ondelettes. Elles sont conçues afin d'avoir le nombre le plus haut de moments nuls ($2N$) tant pour l'ondelette d'ordre N que pour la fonction d'échelle pour une largeur de l'ordre de $6N - 1$. La figure (3.14) montre la forme ainsi que le spectre des Coiflets d'ordres 2 et 4.

3.4.7 Ondelette Biorthogonale

Les ondelettes biorthogonales ont la caractéristique d'être orthogonales deux à deux, mais elles ne sont pas orthogonales en elles-mêmes. Leur symétrie est caractérisée par une phase linéaire. Les ondelettes biorthogonales peuvent notamment être construites par la méthode des splines. La figure (3.15) montre la forme d'une ondelette biorthogonale 2.4 en temps et en fréquence.

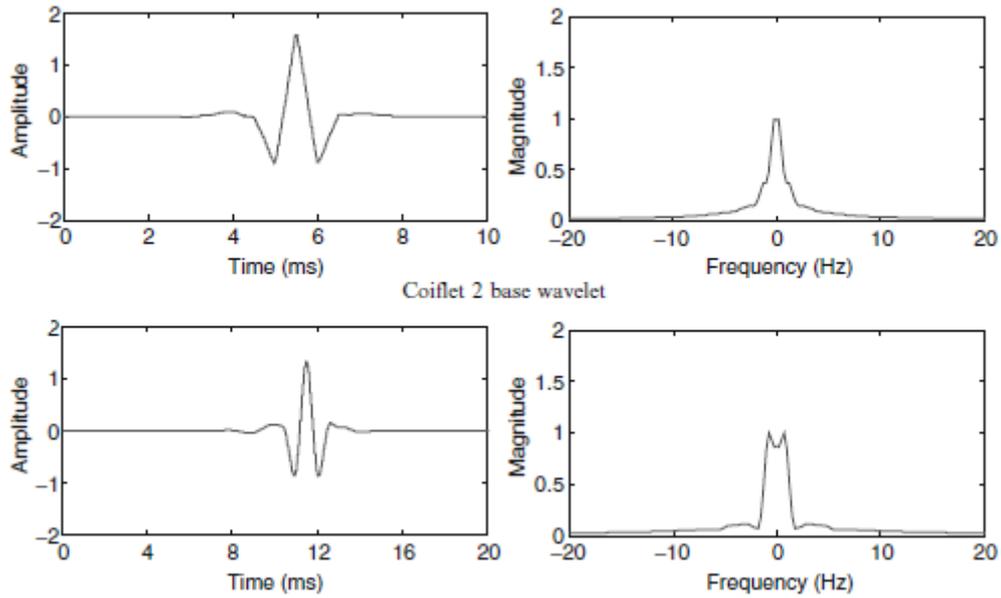


FIGURE 3.14 – Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Coiflets (2 et 4) [69]

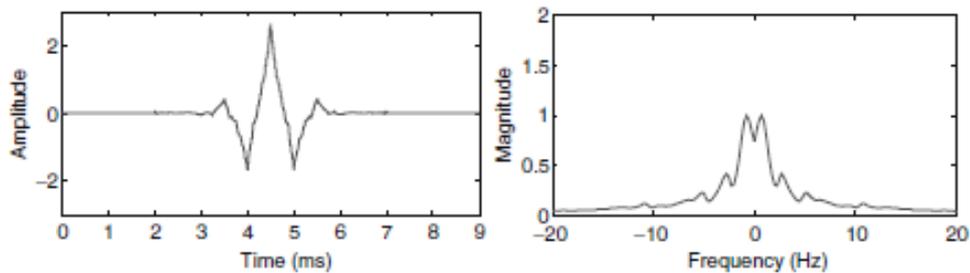


FIGURE 3.15 – Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Biorthogonale 2.4 [69]

Ces différentes formes d'ondelette permettront de générer les coefficients des filtres passe-bas et passe-haut composant les bancs de filtres d'analyse et de synthèse. Le tableau (3.1) présente les différents coefficients de ses ondelettes.

Pour résumer ce chapitre, et à présent que la transformée par paquets d'ondelettes a été présentée et expliquée, elle servira comme base de modulation pour notre architecture impulsionnelle. Cette dernière est illustrée sur la figure (3.16) ayant une profondeur 3 permettant ainsi d'avoir 8 entrées de données différentes $[x_0, \dots, x_7]$ qui seront modulées par IDWPT. Ces données seront récupérées et démodulées au niveau du récepteur par une transformation DWPT afin de reconstituer les données $[y_0, \dots, y_7]$.

| Ondelettes | Coefficients DWT | | Coefficients IDWT | |
|------------------|------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | passé-haut | passé-bas | passé-haut | passé-bas |
| Haar | -0.7071 | 0.7071 | 0.7071 | 0.7071 |
| | 0.7071 | 0.7071 | -0.7071 | 0.7071 |
| Symlet 2 | -0.4830 | -0.1294 | -0.1294 | 0.4830 |
| | 0.8365 | 0.2241 | -0.2241 | 0.8365 |
| | -0.2241 | 0.8365 | 0.8365 | 0.2241 |
| | -0.1294 | 0.4830 | -0.4830 | -0.1294 |
| Daubechies 2 | -0.4830 | -0.1294 | -0.1294 | 0.4830 |
| | 0.8365 | 0.2241 | -0.2241 | 0.8365 |
| | -0.2241 | 0.8365 | 0.8365 | 0.2241 |
| | -0.1294 | 0.4830 | -0.4830 | -0.1294 |
| Biorthogonal 2.2 | 0.1768 | 0 | 0 | -0.1768 |
| | 0.3536 | 0 | 0 | 0.3536 |
| | -1.0607 | 0.3536 | 0.3536 | 1.0607 |
| | 0.3536 | 0.7071 | -0.7071 | 0.3536 |
| | 0.1768 | 0.3536 | 0.3536 | -0.1768 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 |

TABLE 3.1 – Coefficients DWT et IDWT de quelques ondelettes

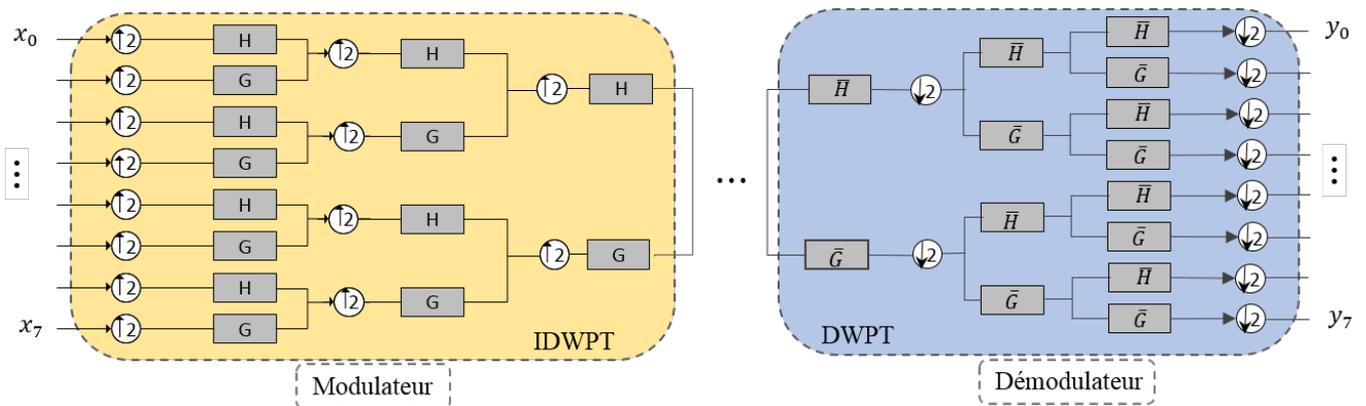


FIGURE 3.16 – Architecture globale de l'émetteur et récepteur à l'échelle 3

3.5 Conclusion

Un système de communication basé sur la transformée en ondelettes offre l'avantage de générer plusieurs formes d'ondes et de les adapter au mode de transmission. L'application de la théorie des ondelettes en utilisant la décomposition par paquets d'ondelettes pour les réseaux de capteurs, offre une multitude de choix de fonctions ondelettes. Pour notre étude, la décomposition est assurée par une structure de bancs de filtres dont le choix des coefficients permettra de sélectionner l'ondelette utilisée. Ainsi, le banc de filtre permettra de séparer les différents utilisateurs par une forme d'onde spécifique. Pour une ondelette donnée, il existe plusieurs formes de signaux possibles obtenues par combinaison, dilatation ou décalage de l'ondelette choisie.

Notre architecture aura pour modulateur/démodulateur la transformée IDWPT/DWPT. Afin de l'utiliser dans le cas multi-utilisateurs, il est essentiel de faire une étude sur les techniques d'accès multiples qui existent pour des applications en milieu industriel. L'accès au canal se fait au niveau de la couche MAC (Medium Access Control) et la modulation se fait au niveau de la couche physique. Ces deux couches, bien différentes, utilisent la plupart du temps des protocoles complexes et des fois, inadaptés aux réseaux de capteurs sans fil. D'où l'intérêt de faire un survol des travaux de recherches précédents afin de positionner au mieux notre architecture de communication.

Pour présenter les modes d'exploitation de notre architecture et d'en étudier la robustesse, une présentation des techniques d'accès multiples utilisées en réseaux industriels sera faite au début du prochain chapitre. Par la suite, le fonctionnement de l'architecture en mode multi-utilisateurs ainsi que le partage du canal seront expliqués.

Chapitre 4

Modes d'exploitation de l'architecture basée sur la transformée en ondelettes

4.1 Introduction

Pour un système de communication en milieu industriel, le choix de la modulation appropriée est essentiel, comme pour toute autre application. De plus, si nous considérons l'échange multi-utilisateurs, ce système de communication en émission est contraint à adapter aussi les techniques d'accès multiple au canal. Ceci est dû au fait que plusieurs utilisateurs doivent partager et utiliser le même canal de transmission.

Dans le modèle OSI présenté au paragraphe (1.3.1), le contrôle d'accès au médium MAC (Medium Access Control) fait partie de la couche liaison de données. C'est la première couche au dessus de la couche physique qui contient les techniques de modulation. Le contrôle d'accès au médium est utilisé pour autoriser plusieurs utilisateurs à partager simultanément le même milieu de communication. Il permet de maximiser l'utilisation du canal avec un minimum d'interférences et de collisions. La couche MAC détermine le temps où un nœud atteint le médium pour tenter d'émettre, de contrôler ou de ré-émettre un paquet vers un autre nœud ou à un ensemble de nœuds.

Il existe plusieurs techniques d'accès au médium qui sont développées pour les communications sans fil. La plupart d'entre elles traitent la problématique du débit du réseau, sa stabilité, ou encore sa latence. Elles se basent en général sur le multiplexage temporel, fréquentiel ou par code et sont notées xDMA pour (x Division Multiple Access). Ces techniques dépendent principalement du support de communication utilisé par la couche physique ainsi que de la technologie déployée. Plusieurs classifications des protocoles ont été présentées dans la littérature. Elles classent ces méthodes en méthodes d'accès statiques, aléatoires ou déterministes [76]. Dans ce chapitre, les techniques d'accès au canal en milieu sans fil industriel seront présentées. Ceci afin d'introduire par la suite les modes de fonctionnement ou d'exploitation de notre architecture multi-utilisateurs.

4.2 Les techniques d'accès multiple

Les techniques d'accès multiple statiques autorisent le partage du milieu de transmission entre l'ensemble des utilisateurs ou dispositifs communicants connectés en réseau. Elles sont mises en œuvre au niveau de la couche supérieure nommée couche MAC. Nombreux travaux ont été présentés dans la littérature pour exploiter au mieux la capacité du canal de transmission. Ces

méthodes d'accès multiples se basent essentiellement sur le partage du temps de transmission, de la fréquence ou le partage de la capacité par encodage de l'information.

4.2.1 Méthodes statiques

Technique TDMA

Pour la technique TDMA (Time Division Multiple Access), c'est une technique d'accès statique qui est utilisée dans la plupart des systèmes de communication numériques, notamment dans les systèmes GSM (Global System for Mobile communications) et dans de nombreux réseaux de capteurs sans fils [77]. Cette méthode d'accès appelée aussi multiplexage temporel, se base sur la répartition des ressources dans le temps. Les utilisateurs émettent sur le même canal chacun à son tour, les uns après les autres afin d'éviter les collisions.

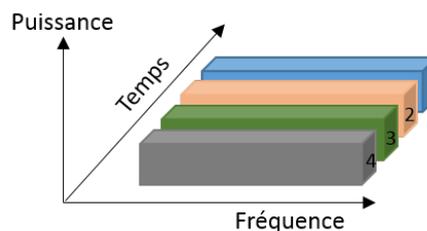


FIGURE 4.1 – Accès par TDMA

Autrement dit, l'utilisateur maître alloue cycliquement un temps de parole fixe à chaque utilisateur du réseau. Cette méthode s'utilise généralement avec un maître fixe. Elle permet donc de connaître avec certitude le temps de transfert d'un message. Par contre, elle peut conduire à un gaspillage des ressources dans le cas où les utilisateurs n'utilisent pas nécessairement leur temps de parole à chaque cycle.

Technique FDMA

Appelée aussi multiplexage fréquentiel, cette technique permet de différencier les utilisateurs par une simple différenciation de fréquence. La bande de fréquences du réseau est subdivisée en sous-canaux et chaque utilisateur n'a le droit d'émettre que sur un seul sous-canal qui lui est réservé.

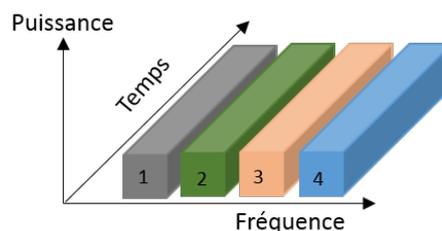


FIGURE 4.2 – Accès par FDMA

C'est la technique la plus utilisée en communications radiofréquences [78]. Dans ce type de

méthode, l'utilisation d'un filtre passe-bas à l'émission est indispensable pour que le message à transmettre ait une bande passante bien définie.

Technique CDMA

Le mode CDMA (Code Division Multiple Access) est une technique d'accès multiple basée sur l'étalement de spectre développée principalement pour les systèmes de téléphonie de troisième génération. Les utilisateurs partagent la même bande de fréquence et transmettent sur le même intervalle temporel [79].

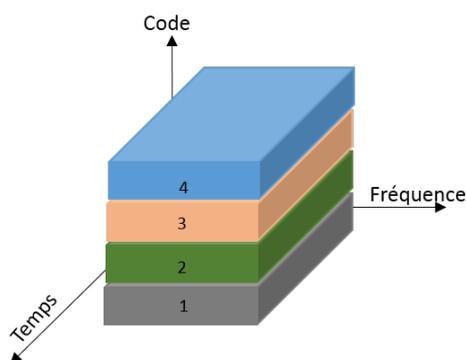


FIGURE 4.3 – Accès par CDMA

Le principe de ce mode est d'affecter à chaque utilisateur émetteur un code unique lui garantissant le transfert des données sans interférence avec les autres utilisateurs.

Le choix des codes se fait d'une manière à ce qu'ils soient orthogonaux les uns aux autres. Les mêmes codes sont utilisés à la réception pour reconstituer les signal émis.

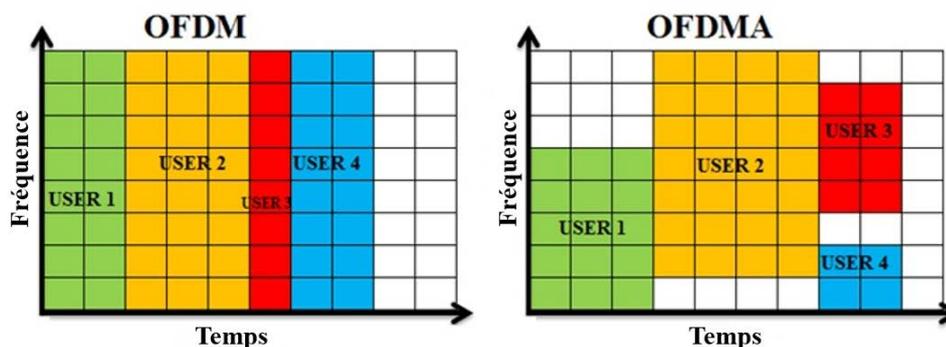


FIGURE 4.4 – Différence entre OFDM et OFDMA

Technique OFDMA

L'OFDMA (ou orthogonal frequency-division multiple access) est une technique de multiplexage et de codage des données utilisée essentiellement dans les réseaux de téléphonie mobile de 4e génération. C'est une alternative à la technique CDMA. Cette technique de codage associe

les multiplexages en fréquence FDMA et temporel TDMA contrairement à l'OFDM qui effectue uniquement un multiplexage temporel.

L'accès par OFDMA consiste en un codage et une modulation numérique d'un ou plusieurs signaux binaires. Son principe est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses les données numériques que l'on veut transmettre, ce qui réduit pour un débit global donné, le débit binaire pour chaque utilisateur.

4.2.2 Méthodes aléatoires

En plus des techniques d'accès statiques que nous venons de présenter, des techniques d'accès aléatoires sont aussi utilisées pour les systèmes de communication. Elles se basent principalement sur l'écoute du canal. Les plus utilisées en milieu industriel sont les CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect) et CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) [80].

Technique CSMA/CD

La méthode d'accès multiple avec écoute de porteuse/détection de collision, permet à la station qui veut émettre de vérifier qu'une autre station n'utilise déjà le réseau au même instant. Les données ne seront émises que si la voie semble libre à la station. Ensuite, elle vérifie que l'envoi effectué n'est pas perturbé par un autre dispositif, qui lui aussi pensant que le canal est inutilisée, aurait commencé d'y envoyer des données. Dans ce cas, il y'a détection de collision et chacune des stations en cause, attend pour un délai aléatoire avant d'émettre une seconde fois. C'est la méthode la plus utilisée dans les réseaux locaux d'entreprise en bus et les réseaux radioélectriques.

Technique CSMA/CA

Pour un milieu de propagation sans fil, la méthode CSMA/CD n'est pas parfaitement adaptée, dans la mesure où deux dispositifs voulant communiquer avec un récepteur commun peuvent être situés à l'opposé l'un de l'autre et ne sont pas en visibilité directe. Pour cette raison, la norme 802.11 a proposé une méthode similaire appelée CSMA/CA (accès multiple avec écoute de porteuse/évitement de collision). Pour éviter les collisions, cette méthode utilise un principe de négociation préalable et d'accusés de réception réciproques entre l'émetteur et le récepteur : Pour émettre, la station écoute le réseau. S'il est occupé, la transmission est différée, sinon et si le milieu est libre, la transmission peut avoir lieu. À réception de toutes les données émises par la station, le récepteur envoie un accusé de réception.

4.2.3 Techniques d'accès déterministes

En réseaux locaux industriels, l'accès multiple déterministe se fait majoritairement par deux modes : le mode Maître/Esclave (*Polling*) et le mode anneau à jeton (*Token ring*) [81].

Mode Maître/Esclave

Pour ce premier mode, le maître envoie une demande à un esclave et attend sa réponse. Il peut diffuser un message à tous les esclaves présents sur le réseau. Aucun esclave ne peut envoyer un message sans une demande préalable du maître. La communication entre les esclaves

est impossible. Cette méthode est principalement utilisée avec un maître fixe dans les topologies étoiles ou BUS.

Accès par anneau à jeton

La méthode d'accès par anneau à jeton a été initiée par le standard 802.5. Le jeton est une trame unique qui circule sur le réseau, le sens de parcours du réseau est déterminé ce qui évite les conflits.

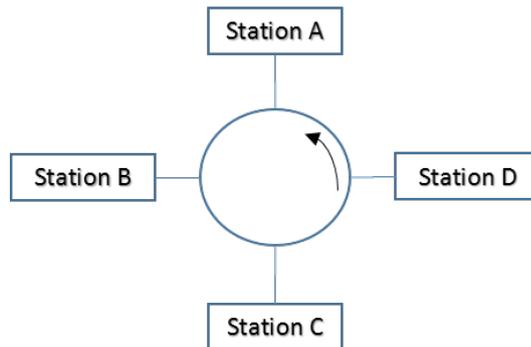


FIGURE 4.5 – Mode d'anneau à jeton 'Token Ring'

La technique est basée sur le principe de la communication à tour de rôle. C'est un jeton qui est un paquet de données, circulant en boucle d'une station à l'autre qui détermine quelle station peut émettre des informations. La station qui possède le jeton peut émettre durant un temps déterminé après lequel il renvoie le jeton à la station suivante. En effet, la station qui libère le jeton doit simplement le transmettre à la station adjacente sans rien connaître de cette dernière.

Les contraintes en termes matérielles et énergétiques imposent d'adapter les protocoles d'accès multiple au médium pour les réseaux de capteurs sans fil. Ainsi, pour leur permettre de conserver leur ressource énergétique (qui est très souvent limitée), la principale technique utilisée dans la littérature est de garder le dispositif radio éteint le plus souvent possible. Ceci est réalisé en alternant les périodes d'activité (composant radio allumé) et de sommeil (composant éteint pour économiser de l'énergie). Trois grandes familles de protocoles MAC dédiés aux réseaux de capteurs dans la littérature sont utilisées : les protocoles à séquençement temporel basés sur le TDMA, les protocoles à contention basés sur le CSMA, et les protocoles hybrides qui combinent les deux techniques précédentes. Pour les réseaux de capteurs sans fil en milieu industriel, les standards de communication sans fil déployés tel le ZigBee, le Bluetooth ou le WiFi utilisent le plus souvent soit le mode CSMA/CA soit les techniques d'accès déterministes tel le mode Maître/Esclave.

4.2.4 Conclusion

L'objectif principal de ce travail de thèse étant de proposer une architecture de communication multi-utilisateur en milieu industriel. Donc les réseaux de capteurs utilisés doivent être capables de faire des transmissions multiples des messages, ainsi que d'en faire une diffusion type 'broadcasting'. Ceci nécessite une consommation d'énergie plus importante, surtout si les capteurs sont distants les uns par rapport aux autres. Pour limiter cette consommation, il est important que le nœud capteur transmette quand il le souhaite et sans faire une vérification du canal. Ce qui implique que les échecs de transmissions doivent être rares pour en minimiser les

tentatives. D'où l'idée principale d'utiliser une modulation impulsionnelle, qui consiste à affecter à chaque nœud capteur une impulsion différente. Ceci en utilisant une architecture à base de la transformée par paquet d'ondelettes.

4.3 Architecture DWPT et ses modes de fonctionnement

Tel que présenté dans le chapitre précédent, l'architecture de communication à base de la transformée par paquets d'ondelettes constitue une solution intéressante pour une modulation impulsionnelle. De plus, en tenant compte de la caractéristique d'orthogonalité entre les impulsions, cette architecture offre une meilleure robustesse contre les phénomènes de propagation. L'utilisation de l'IDWPT en émission et de la DWPT en réception a été proposée par [69, 71] pour une communication mono-utilisateur. Le principe de base de ces travaux cités consistait à étudier le fonctionnement de l'émission et de la réception sans les lier à des techniques de communication numériques ni à une technologie particulière.

4.3.1 Fonctionnement à l'émission

L'adaptation de la transformée IDWPT pour un cas multi-utilisateur a incité d'exploiter l'accès au canal et de le simplifier par différenciation de choix d'impulsion au préalable pour chaque utilisateur. De cette manière, les canaux de communication sont séparés initialement pour chaque utilisateur. Ce qui élimine la couche MAC pour notre architecture et permet ainsi de réduire considérablement la consommation d'énergie des capteurs. Des illustrations d'une architecture avec 4 entrées correspondant à 4 utilisateurs sont présentées sur les figures (4.6), (4.7), (4.8) et (4.9). Pour cette architecture, une seule entrée est activée pour chaque utilisateur, les autres sont à zéro. Chaque utilisateur occupera une bande de fréquences ayant la même largeur que les autres et la bande passante globale est la somme des bandes passantes occupées par tous les utilisateurs.

L'utilisation de la transformée en paquets d'ondelette à l'émission engendre ainsi une analyse multi-résolution qui est traduite par la génération d'un signal global provenant de plusieurs sous porteuses. Le spectre global des différents signaux émis montre bien que les bandes de fréquences sont allouées séparément pour chaque signal d'entrée, donc pour chaque utilisateur. Ceci ne peut que renforcer l'architecture contre les évanouissements du canal de propagation. La figure (4.10) illustre la séparation des bandes de fréquences pour une architecture à 10 utilisateurs.

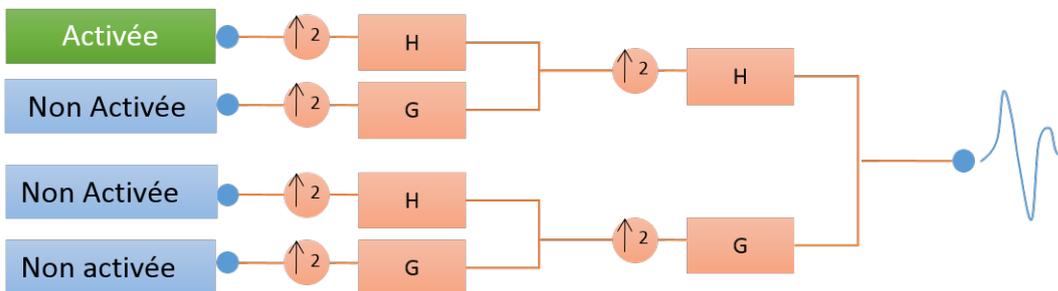


FIGURE 4.6 – Architecture à 4 utilisateurs avec entrée 1 activée

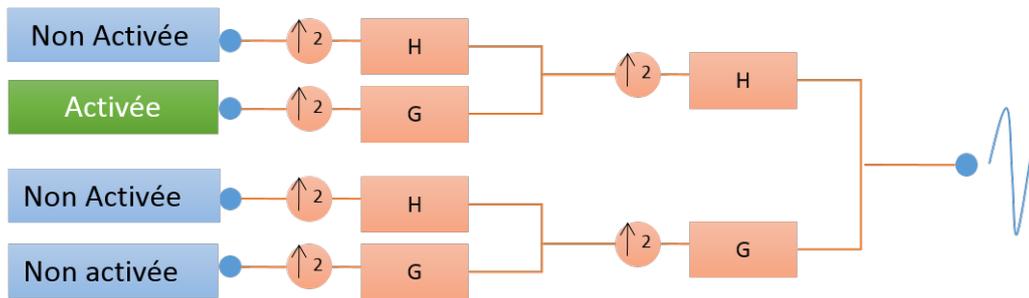


FIGURE 4.7 – Architecture à 4 utilisateurs avec entrée 2 activée

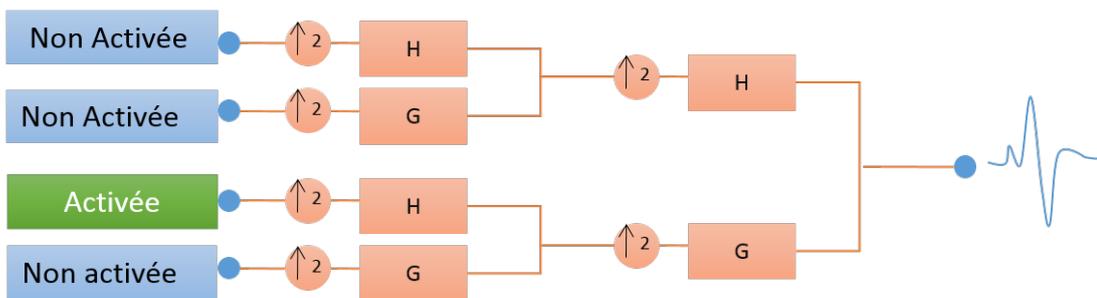


FIGURE 4.8 – Architecture à 4 utilisateurs avec entrée 3 activée

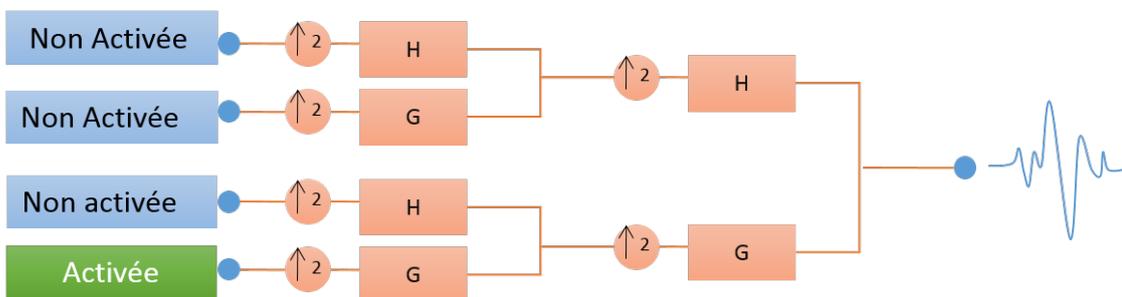


FIGURE 4.9 – Architecture à 4 utilisateurs avec entrée 4 activée

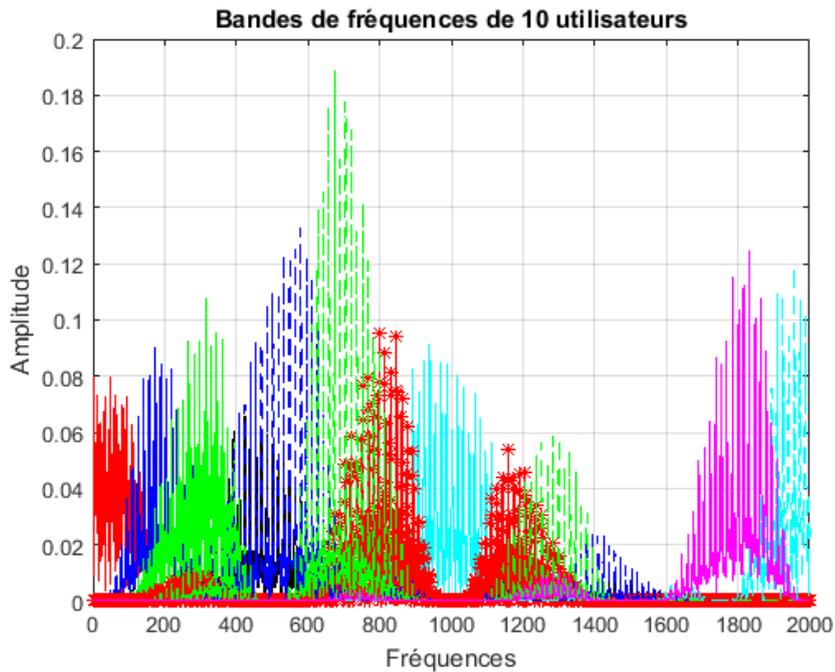


FIGURE 4.10 – Bandes de fréquences pour 10 utilisateurs

4.3.2 Exploitation de l'architecture en milieu industriel

L'architecture de communication proposée est basée sur la transformée par paquets d'ondelettes pour des réseaux de capteurs industriels sans fil. Les contraintes liées au milieu de propagation sont nombreuses et diverses. D'où la nécessité de valider la robustesse des différents aspects architecturaux qui dépendent des applications envisagées. Peu importe le mode de fonctionnement, l'échelle d'analyse donne une information sur le nombre d'utilisateurs possibles. L'activation ou non de l'une ou plusieurs entrées génère une forme d'onde, orthogonale à toutes les autres provenant des entrées différentes.

L'entrée de chaque filtre à l'émission contient soit un bit soit une trame binaire permettant ainsi l'activation ou non des entrées. Ces données binaires peuvent être différentes d'une entrée à l'autre et seront modulés par des modulations impulsionnelles. Une étude sur les différents types de modulations binaires et/ou impulsionnelles a été présentée dans [73] et a permis de faire un choix adéquat du type d'impulsion à utiliser pour une architecture multi-résolution.

Tel que déjà présenté au chapitre 1, les exigences en termes de communications et réseaux en milieu industriel sont classés selon la pyramide CIM. Les dispositifs de communication des différents niveaux de cette pyramides interagissent entre eux selon une topologie Point à Point ou Maître/Esclave classiques en milieu industriel. Pour une communication Point to Point ou *Machine to Machine*, deux dispositifs du même niveau de la pyramide CIM ou des niveaux différents sont en communication mono-utilisateur. Pour le cas multi utilisateur, un maître peut transmettre vers plusieurs esclaves selon un mode d'exploitation *One to Many*. Et plusieurs esclaves peuvent émettre vers le même maître selon le mode *Many to One*. Ces deux configurations sont illustrées sur la figure (4.11).

Le fonctionnement de ces différents modes d'exploitation de l'architecture sera présenté en

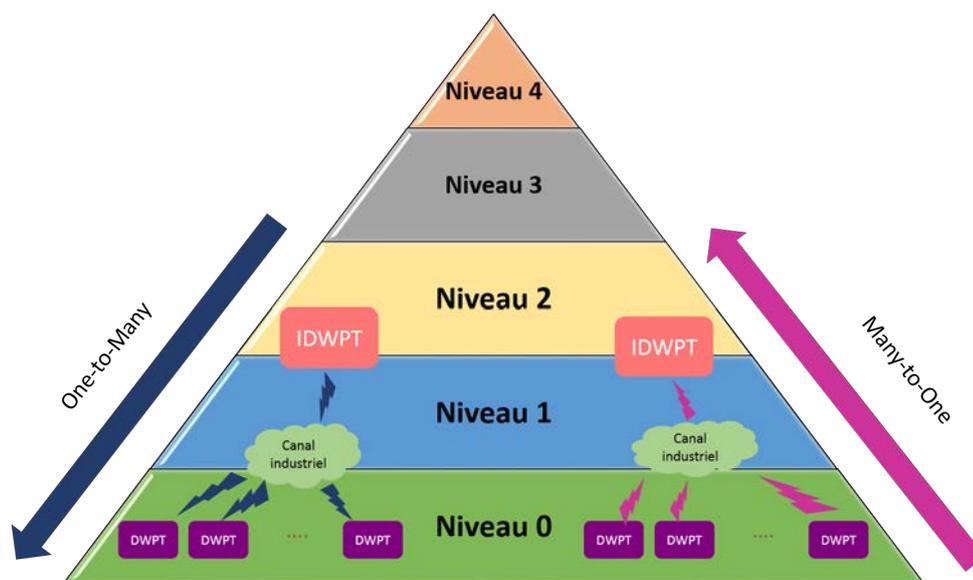


FIGURE 4.11 – Illustration des modes de communications en milieu industriel

détail ci après et uniquement les modes de communication multi-capteurs seront retenus et testés, car ils répondent au mieux à nos objectifs.

4.4 Mode de transmission *Point To Point*

Pour une transmission *Point To Point* (PTP), l'architecture est fonctionnelle en mode mono-utilisateur. Ce type de communication donne lieu à une gestion particulièrement simple des échanges de données qui se limitent, en fait, à un ensemble de communications bilatérales. Pour un cas plus complexe, il est possible de conférer aux capteurs nœuds des possibilités de ré-émission de messages vers d'autres nœuds. On obtient ainsi un réseau à très grande disponibilité puisqu'il existe plusieurs chemins possibles d'un nœud vers un autre.

Pour notre application, un seul capteur (ou nœud capteur) est activé durant une période donnée permettant ainsi l'activation de toutes les entrées du banc de filtres. Par exemple, pour une architecture IDWPT à l'échelle 2, le nombre d'entrées possible est $2^2 = 4$ tel que présenté à la figure (4.12). Pour une architecture à l'échelle 4, 16 entrées possibles sont disponibles pour l'utilisateur. Soit on affecte 1 seul bit par entrée du banc de filtre, ce qui correspondra à une trame de données de 16 bits. Soit, chaque entrée du banc de filtre contiendra une trame binaire de plus d'un bit, ce qui favorisera une augmentation du débit transmis par utilisateur. L'ondelette générée à la sortie de la cascade de filtres de synthèse, est un signal impulsionnel qui correspond à la trame d'entrée.

Pour ce mode de transmission point à point, le bloc IDWPT est utilisé par une seule trame binaire provenant d'un seul utilisateur. Le nombre de bits à l'entrée du banc de filtres dépend de l'échelle d'analyse. Plus la profondeur de la transformée en ondelette est grande plus est le nombre de bits transmis, donc le débit binaire émis ceci bien sûr au détriment de la complexité architecturale. La réception se fait via un bloc DWPT ayant la même profondeur qu'à l'émission permettant de récupérer la trame binaire envoyée. Sur chaque sortie (i) des filtres, un bit ou une trame binaire correspondant à l'entrée (i) seront récupérés après une prise de décision et

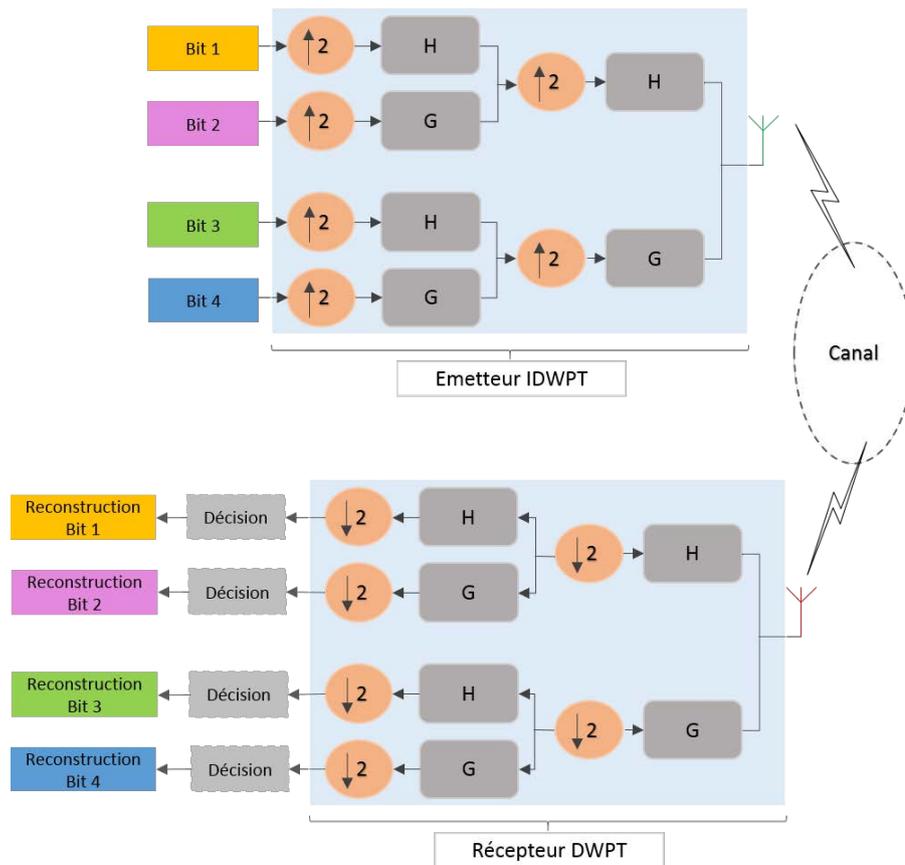


FIGURE 4.12 – Mode de transmission *Point To Point*

reconstitution des données.

4.5 Mode de transmission *Many To One*

L'architecture en mode *Many To One* MTO correspond à une communication multi capteurs ayant plusieurs émetteurs (ou utilisateurs) et un seul récepteur comme présenté à la figure (4.13). Chaque utilisateur en émission est muni d'un bloc IDWPT qui assure l'activation d'une seule et unique entrée pour cet utilisateur et permettra ainsi d'identifier le capteur équivalent. Autrement dit, à chaque entrée du bloc IDWPT à l'émission correspond une seule sortie du bloc DWPT à la réception comme illustré à la figure (4.14). Ce mode de communication correspond à une liaison montante ou une communication du niveau 0 et 1 vers le niveau 2 de la pyramide CIM présentée à la figure (4.11). Les informations qui proviennent de plusieurs capteurs ou nœuds à un faible débit sont transmises au même instant vers un même récepteur. C'est un mode très approprié pour l'échange d'information et données en milieu industriel tenant compte du faible débit transmis par chaque capteur vers un récepteur principal dans un milieu contenant un nombre important de nœuds communicants.

Dans ce mode de transmission, l'activation de l'une des entrées engendre l'activation d'un utilisateur. La figure (4.15) illustre une architecture à 16 entrées correspondant à 16 capteurs potentiels (échelle 4). Chacun utilise une seule et unique entrée différentes des autres entrées.

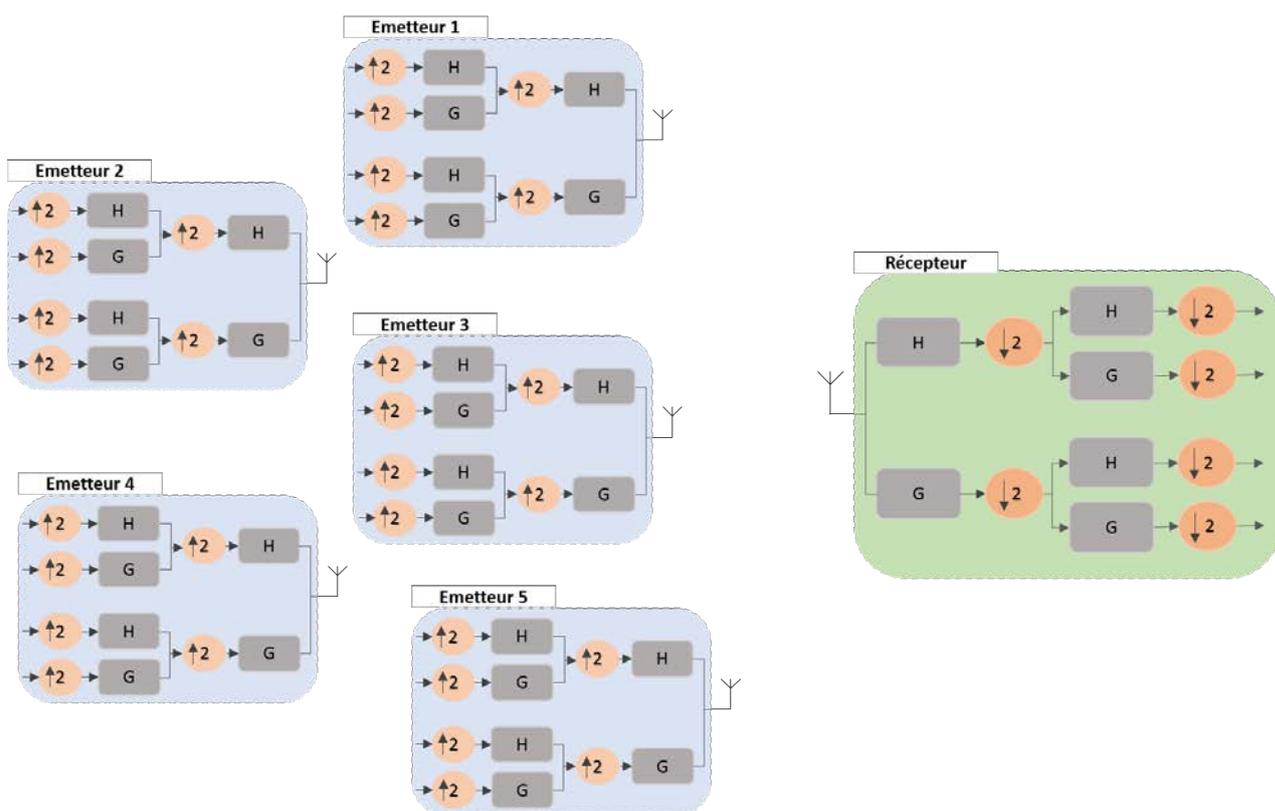


FIGURE 4.13 – Mode de transmission *Many To One*

Pour cet exemple, c'est l'entrée numéro 7 (capteur 7) qui est activée et toutes les autres sont mises à zéros. La forme d'onde sur chaque entrée activée est différentes des formes d'onde des autres entrées restantes. Les entrées non activées seront mises à zéros.

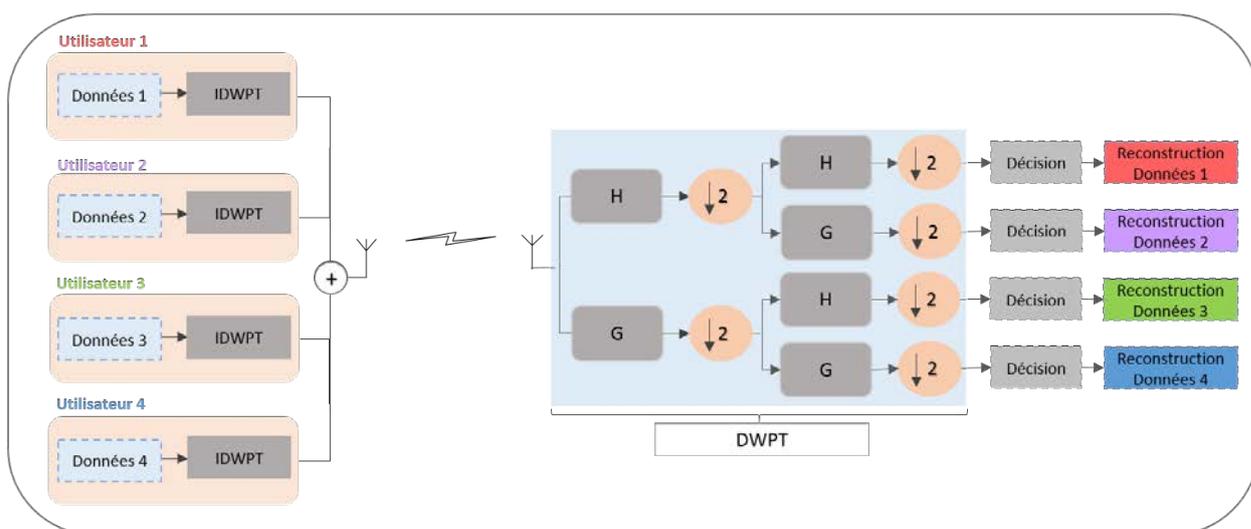


FIGURE 4.14 – Mode de transmission pour une liaison *Many to One*

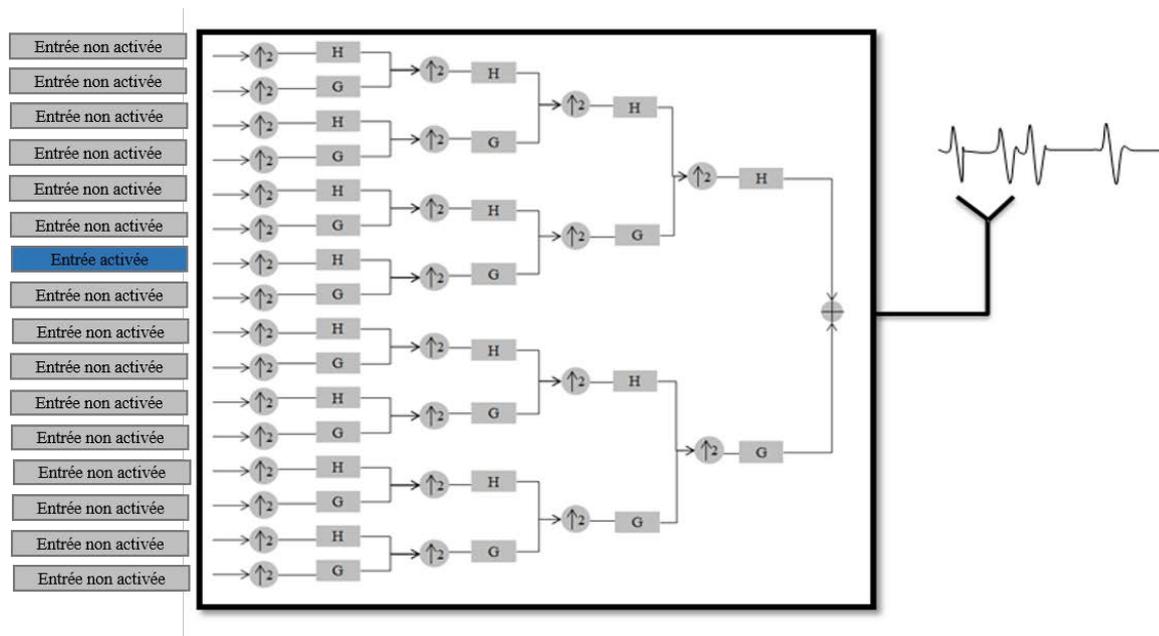


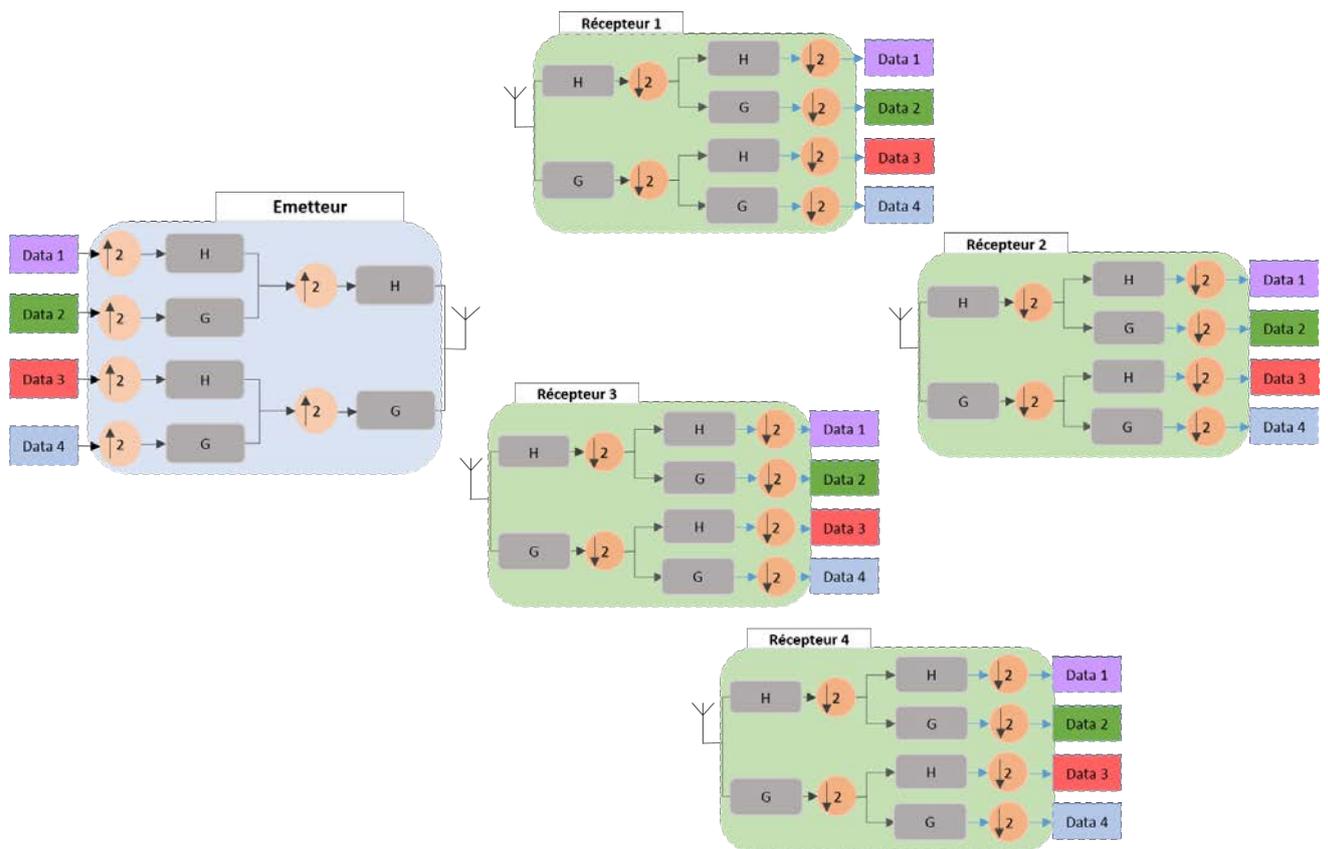
FIGURE 4.15 – Architecture de l'émetteur pour un utilisateur en mode MTO

Le récepteur DWPT reçoit le flux des données provenant de l'ensemble des capteurs du réseau : chaque capteur est identifié par une seule sortie du filtre à la réception. La donnée reçue doit être détectée et attribuée au capteur émetteur correspondant. Ce mode présente une occupation de bande plus importante que pour le mode PTP car chaque utilisateur (entrée activée) occupera une sous-bande à part. Chose qui amènera à une sélectivité en fréquence du canal due aux interférences entre les utilisateurs dont il faudra palier afin de protéger au mieux les données transmises. Néanmoins, elle permettra une communication synchrone de plusieurs capteurs vers le même récepteur.

4.6 Mode de transmission *One To Many*

Pour le mode *One To Many* OTM, un émetteur IDWPT à n entrées peut transmettre l'information à m récepteurs DWPT ayant chacun n sorties. L'information envoyée de l'entrée (i) est récupérée à la sortie (i). C'est le mode inverse du mode MTO où les équipements du niveau 1 et 2 de la pyramide CIM (figure 4.11) envoient la même information vers les capteurs des niveaux inférieurs 1 et 0. Ce qui est équivalent au mode Maître Esclave dans une architecture de réseaux industriels conventionnels. Certes le débit transmis peut être faible, mais le fait de recevoir de l'information sur plusieurs capteurs crée une diversité spatiale qui permet de récupérer la donnée envoyée par au moins l'un des capteurs. Sur la figure (4.16), est illustrée une transmission à un seul émetteur et 4 récepteurs.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous focalisons sur une communication multi-utilisateurs reliant plusieurs capteurs à un nœud central ou inversement. D'où l'intérêt de proposer une architecture IWSN robuste en mode MTO et OTM pour un environnement industriel très bruité.

FIGURE 4.16 – Mode de transmission *One To Many*

4.7 Conclusion

Le choix de l'architecture à base de la transformée par paquet d'ondelettes constitue un système de communication multi-utilisateur efficace pour les applications en milieu industriel. Elle permet une flexibilité par rapport à l'échelle d'analyse, donc au nombre d'utilisateurs (ou capteurs). Aussi, une flexibilité quant au choix des impulsions et type d'ondelettes à utiliser pour moduler les signaux.

De plus, elle permet d'alléger l'accès au canal pour un déploiement multi-utilisateur. Cet accès au médium se fait au préalable en choisissant une impulsion différente pour chaque utilisateur. Et donc, de lui allouer une bande de fréquences différente des autres utilisateurs. Ceci implique l'élimination de la couche MAC pour notre système de communication. Donc, une réduction considérable en termes de consommation d'énergie exigée par cette couche. L'architecture de communication est déployée en mode mono-utilisateur selon une communication *Point to Point* et en mode multi-utilisateur selon le mode *Many to One* et *One to Many*.

Maintenant que la couche physique contenant la modulation et la couche liaison qui régit les différents modes de fonctionnement sont présentées, nous présenterons dans le chapitre suivant les résultats de simulation. Les modes d'exploitation de l'architecture impulsionnelle seront testés et simulés pour une transmission sans fil sur un canal industriel complexe. Aussi la validation de l'architecture par comparaison avec un système de communication sans fil standard.

Chapitre 5

Simulations et validation de l'architecture de communication proposée en milieu industriel

5.1 Introduction

L'architecture basée sur la transformée par paquet d'ondelettes, a été initialement proposée comme un système de communication ultra large bande qui répond aux exigences de cette technologie. Elle permet un partage de la bande de fréquence allant de 3.1GHz à 10.6GHz par les utilisateurs [73]. Les performances d'un tel système dépendront du mode de communication, de l'échelle d'analyse, de la forme d'ondelette utilisée et de l'environnement de propagation. Donc une combinaison adéquate entre le choix de modulation de la couche physique et les modes d'exploitation pour accéder au canal.

Ce présent travail de thèse consiste à étudier la robustesse de cette architecture de communication sans fil avec ces deux modes dans un milieu industriel fortement bruité. Le modèle de canal industriel simulé a été présenté au chapitre 2 pour étudier les performances et le fonctionnement de l'architecture IDWPT/DWPT. Afin d'améliorer la robustesse de notre système, un codage correcteur d'erreur du canal sera utilisé, ainsi qu'un seuillage du bruit industriel à la réception. Aussi, une comparaison avec un système à modulation multi-porteuses orthogonales OFDM sera effectuée en fin de ce chapitre. Ceci en guise de comparer le fonctionnement et la robustesse de notre architecture avec d'autres techniques multi-porteuses pour des applications dans le milieu industriel

L'environnement de l'étude est assimilé à une usine de production à moyenne échelle tel que présenté dans le paragraphe (2.5) du chapitre 2. Notre système de communication est modélisé sous MATLAB, et toutes les simulations sont faites sur ce logiciel. Le modèle du canal industriel utilisé pour faire l'étude des performances des architectures multi-utilisateurs est issu des simulations en se basant sur des caractéristiques provenant des modèles déterministes.

5.2 Le fonctionnement du mode *Many To One* en milieu industriel

Avant d'étudier les performances de l'architecture IDWPT/DWPT en mode MTO pour un canal industriel bruité, il faudrait au préalable faire le choix de la forme d'ondelette la plus

optimale en termes de réception à faible erreur. Pour ce faire, nous allons tester notre système MTO pour 4 différentes formes d'ondelette pour un canal à Bruit Additif Blanc Gaussien *BABG* (communément appelé Additive White Gaussian Noise *AWGN*). L'architecture est testée avec 16 capteurs en émissions et 1 seul capteur à la réception comme présenté à la figure (5.1).

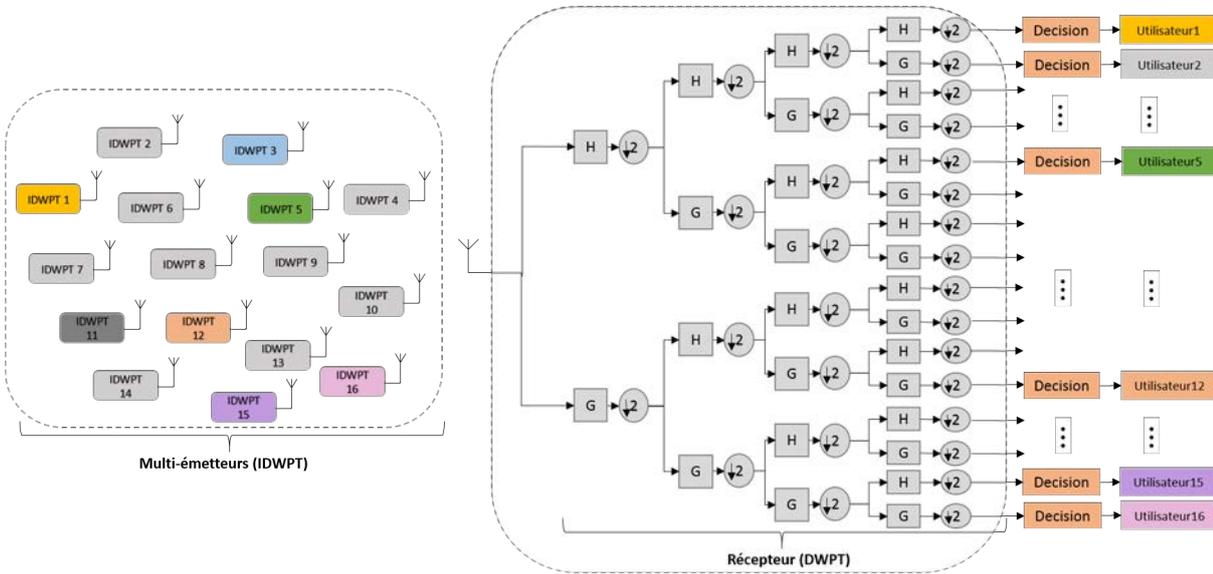


FIGURE 5.1 – Mode de communication MTO à 16 capteurs émetteurs

5.2.1 La forme des signaux en émission et réception

Tel que présenté au paragraphe (4.5), le mode MTO consiste à ce que plusieurs capteurs transmettent différentes informations vers un même capteur à la réception. L'information transmise sera comparée à celle reçue après la DWPT et une prise de décision qui constitue l'étape la plus importante du récepteur.

Pour un système multi-capteurs, les données binaires sont modulées selon la même modulation impulsionnelle et chaque transmetteur (capteur) est identifié par un signal unique. La figure (5.2) illustre les signaux provenant de 4 différents capteurs (1,5,12 et 16) d'une architecture ayant 16 capteurs émetteurs. Le choix des capteurs ici est fait de manière à donner un simple exemple pour illustrer les signaux. Les 16 signaux sont différents les uns des autres car les données binaires à l'entrée de chaque filtre sont différentes.

Les signaux transmis empruntent des trajets multiples caractérisés par une atténuation et un retard en plus d'un bruit additif. Au niveau du récepteur, tous les signaux émis sont additionnés afin de ne former qu'un seul signal où toutes les informations des différents capteurs sont mélangées. Après un traitement par DWPT, un seuillage est effectué sur tous les signaux d'information reçus en se basant sur le niveau d'énergie transmise. Ensuite une prise de décision est effectuée pour fournir un signal binaire correspondant à celui transmis. La figure (5.3) représente les signaux provenant du capteur numéro 2 à l'émission, à la réception après DWPT et le signal après prise de décision.

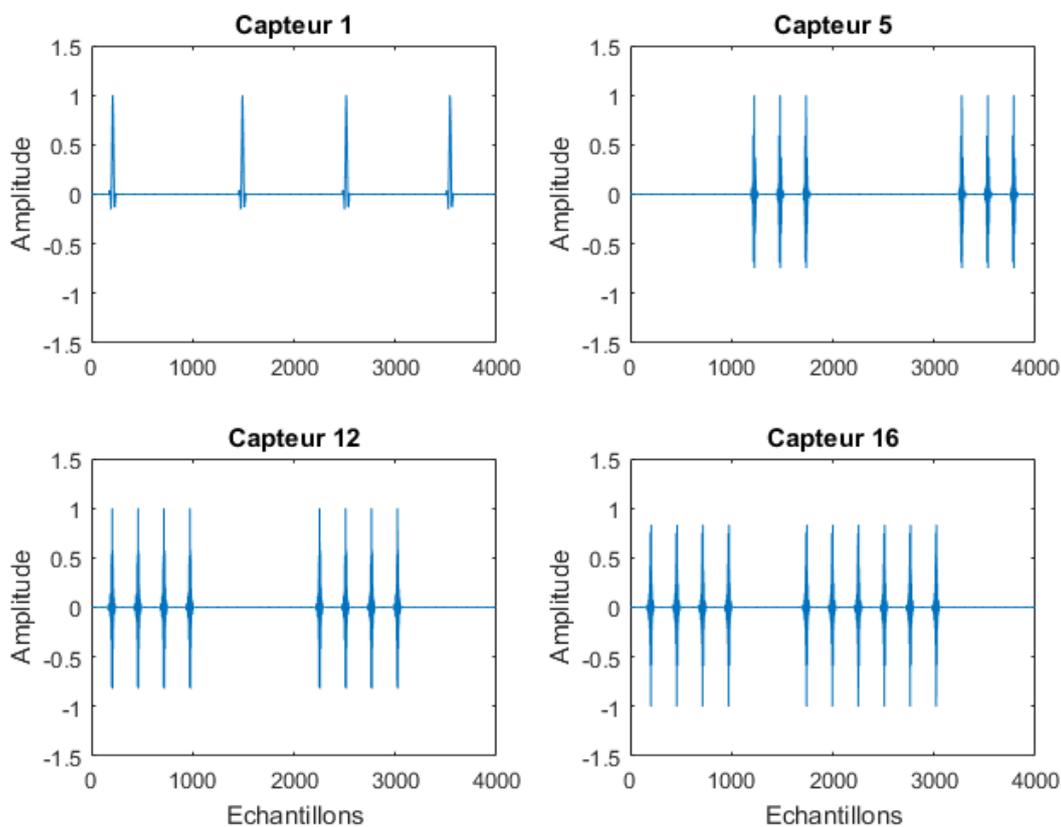


FIGURE 5.2 – Signaux à l'émission après IDWPT

Puisque la propagation se fait en milieu hostile, les signaux reçus seront très affectés par des données erronées qui nécessiteront une prise en charge particulière afin de détecter au mieux toutes les données envoyées.

5.2.2 L'impact de la forme d'ondelette

Pour valider l'architecture dans un canal sans fil complexe, il faudrait opter pour une forme d'ondelette qui fait converger le récepteur assez rapidement et qui fournit un meilleur taux d'erreur binaire BER pour un rapport signal sur bruit SNR donné. Le tableau (5.1) présente les différents paramètres utilisés pour les simulations et tests.

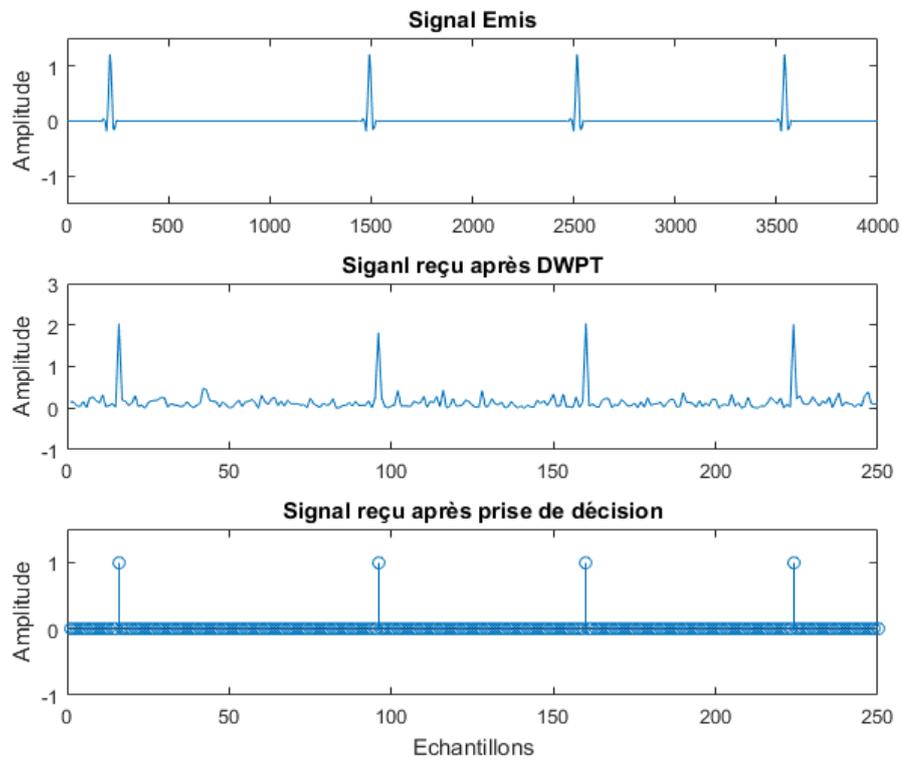


FIGURE 5.3 – Signal reçu après DWPT identifié au capteur 2

| Paramètres | Descriptions |
|--------------------------------|--|
| Communication | Multi-Utilisateurs MTO et OTM |
| Applications | Large Bande et Ultra Large bande |
| Fréquences | 2.4GHz, 5GHz |
| Nombre de capteurs | 4 (OTM), 16 (MTO) |
| Modulation | Impulsionnelle |
| Transmission | IDWPT |
| Réception | DWPT |
| Formes d'ondelette | Symlet, Daubechies, Coiflets, Biorthogonal |
| Données | Binaires |
| Bande de fréquence | Multi-Bandes |
| Configurations de transmission | LOS et NLOS |
| Nombre de trajets (max) | 10 |

TABLE 5.1 – Paramètres de l'architecture

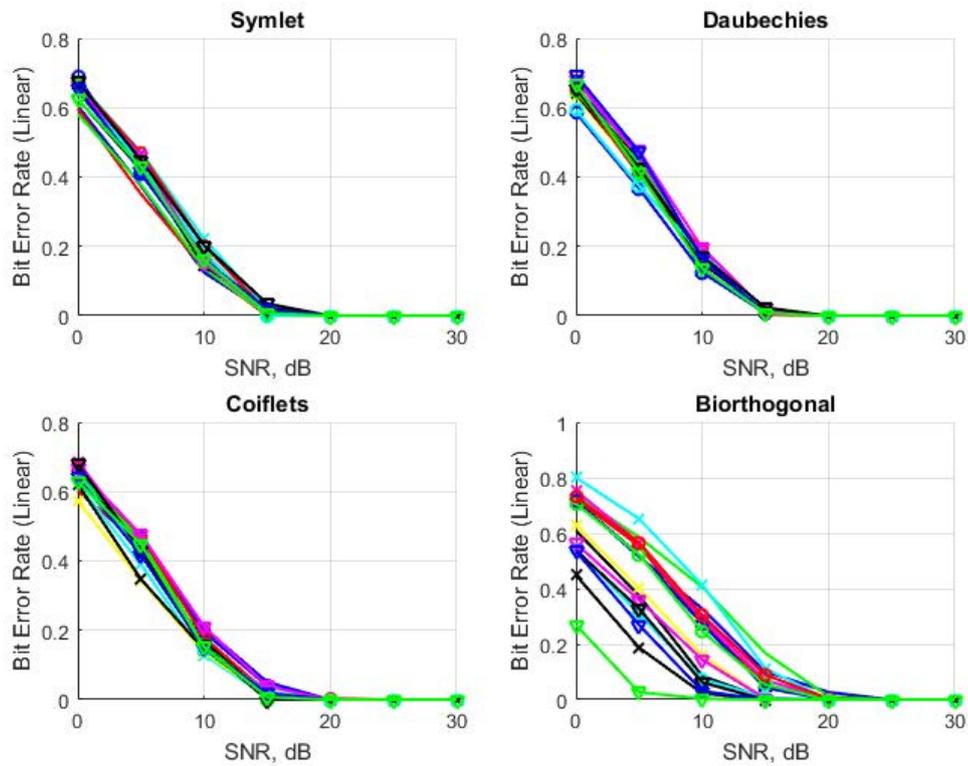


FIGURE 5.4 – BER pour différentes ondelettes dans un canal BABG

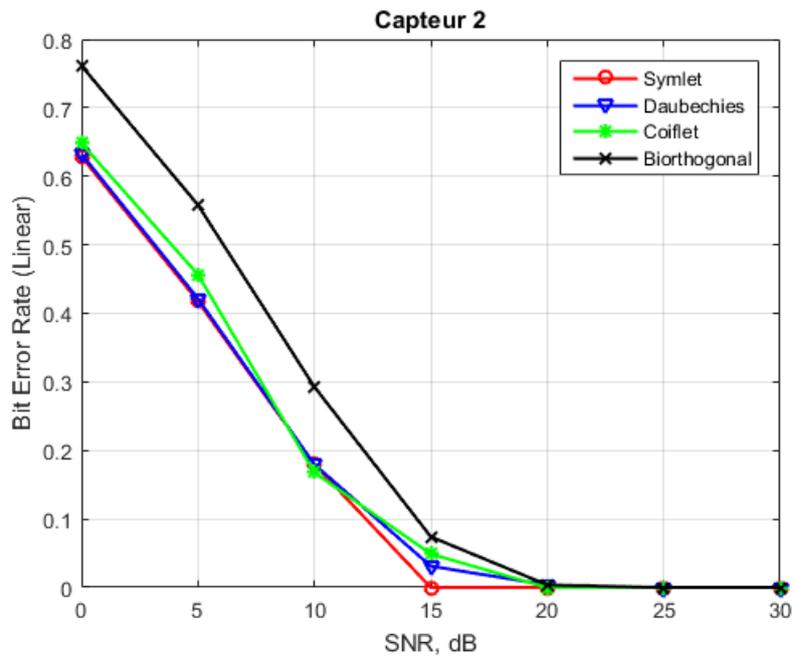


FIGURE 5.5 – BER pour un canal BABG avec différentes Ondelettes

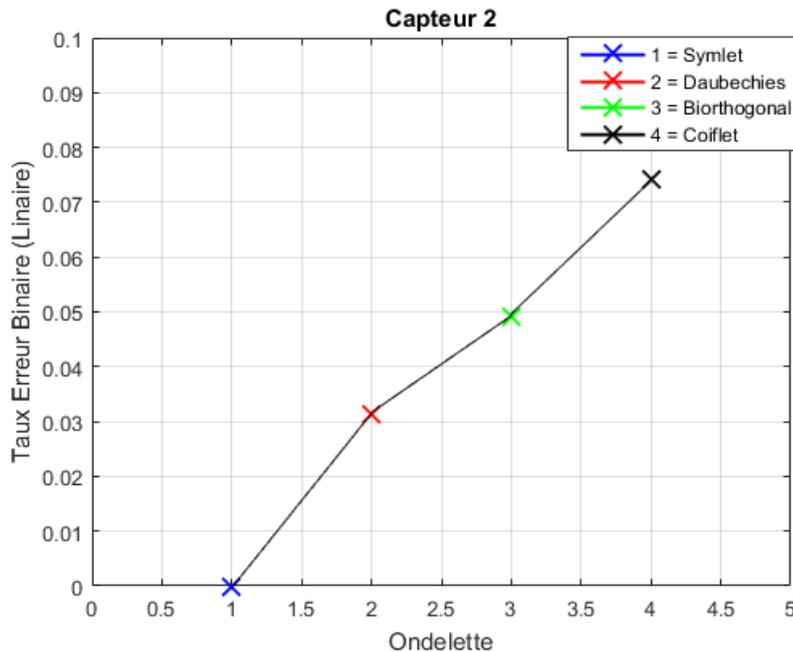


FIGURE 5.6 – BER pour un SNR = 15 dB

Pour un canal *BABG* avec la DWPT à la réception, les signaux provenant des différents utilisateurs sont détectés et reconnus. La figure (5.4) représente les taux d'erreur binaire des signaux reçus pour une architecture MTO à 16 capteurs en émission avec différentes formes d'ondelette. Les courbes montrent que la robustesse de l'architecture IDWPT/DWPT dépend bel et bien de la forme d'onde choisie en émission [82] tel qu'illustré sur la figure (5.5). Pour décider de cette forme d'onde nous présenterons le BER linéaire pour un SNR fixé à 15dB du capteur 2. Le choix du capteur ou d'utilisateur importe peu, car ils convergent tous de la même manière.

D'après les résultats de simulations, le choix optimal de la forme d'ondelette est 'Symlet' car elle présente le plus bas taux d'erreur binaire comparativement aux autres ondelettes. A 15dB avec 'Symlet' le signal reçu est récupéré avec aucune erreur pour un canal *BABG* comme illustré sur la figure (5.6). Les ondelettes 'Daubechies' et 'Coiflets' convergent aussi bien et peuvent être utilisées comme alternative pour ce type de communication. Par contre l'ondelette 'Biorthogonal' représente un BER élevé pour un même SNR comparée aux trois autres formes d'ondelettes. Les utilisateurs ne convergent pas tous de la même manière.

De là, c'est l'ondelette 'Symlet' qui sera retenue pour faire les tests de l'architecture en mode MTO sur le canal industriel.

5.2.3 Transmission dans un canal industriel

Le canal industriel utilisé sera modélisé tel un canal multi-trajets dont la loi de distribution des trajets suivra le modèle de Rice et Rayleigh pour les deux configurations LOS et NLOS respectivement comme présenté dans le paragraphe (2.5) du chapitre 2. En plus des effets des trajets multiples, nous allons étudier l'effet du bruit présent dans le milieu de propagation sur la robustesse du récepteur à base de la DWPT. Des résultats de simulations seront présentés dans les parties suivantes selon les différentes configurations de transmission dont les paramètres sont

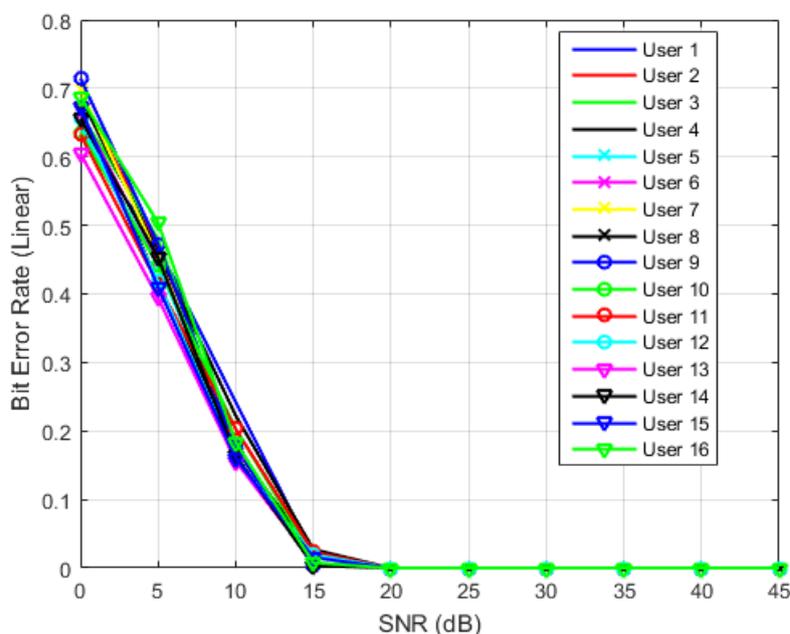


FIGURE 5.7 – BER pour un système MTO 16 sur un canal BABG

exposés au tableau (5.1).

A. Performances pour un canal à évanouissements

Afin de réaliser les simulations de l'architecture MTO, deux configurations de transmission LOS et NLOS sont établies à 2.4 GHz et 5 GHz. Pour un canal *BABG* sans évanouissement, les résultats du BER linéaire en fonction du SNR montrent que les signaux reçus sont tous détectés correctement comme illustré sur la figure (5.7). La qualité du signal reçu est meilleure pour un SNR supérieur à 15dB pour l'ensemble des capteurs. Au delà de 20dB, tous les signaux sont détectés sans erreur.

En considérant maintenant l'effet des évanouissements du canal dus à la dispersion temporelle en plus du bruit *BABG* pour les configurations LOS et NLOS, notre architecture impulsionnelle permet toujours la détection des signaux à la réception (figure 5.8 et 5.9). Il est clair que l'effet des multi-trajets perturbe les signaux des différents utilisateurs et cause ainsi des interférences entre eux [83].

A un SNR inférieur à 5dB, le BER linéaire à la réception est supérieur à 0.5 pour la configuration LOS aux deux fréquences 2.4 GHz et 5 GHz. Tandis que pour un canal *BABG* au même SNR, ce taux se situe autour de 0.4. La convergence du récepteur est plus lente mais la détection se fait à faible erreur quand le SNR est au delà de 20dB. A la fréquence 5 GHz et au delà de 20dB, l'architecture permet une réception et séparation des utilisateurs mieux que pour le canal LOS à 2.4 GHz. La communication pour les canaux NLOS à 2.4 GHz et 5 GHz permet la détection et reconstitution de la totalité des signaux émis. Néanmoins, ces derniers restent plus sensibles aux évanouissements car le premier trajet constituant la réponse impulsionnelle est à faible puissance.

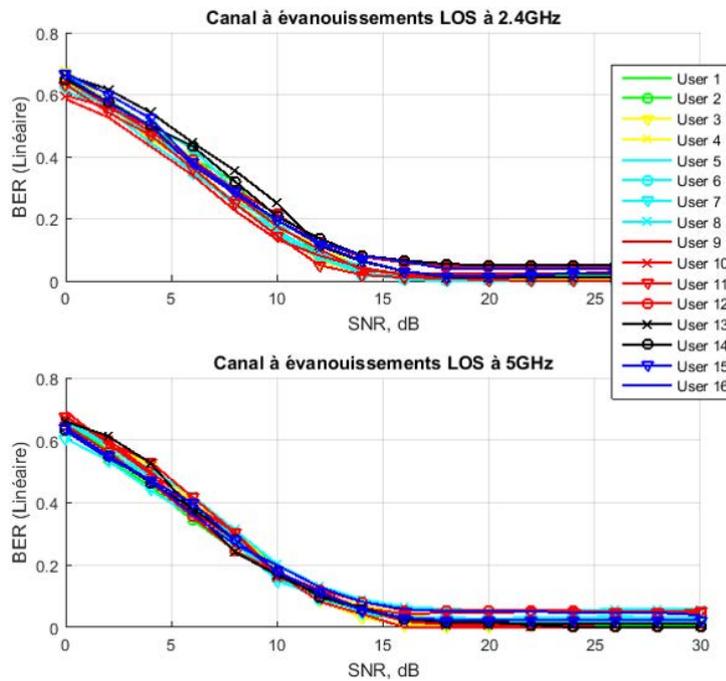


FIGURE 5.8 – BER pour un canal LOS à évanouissement

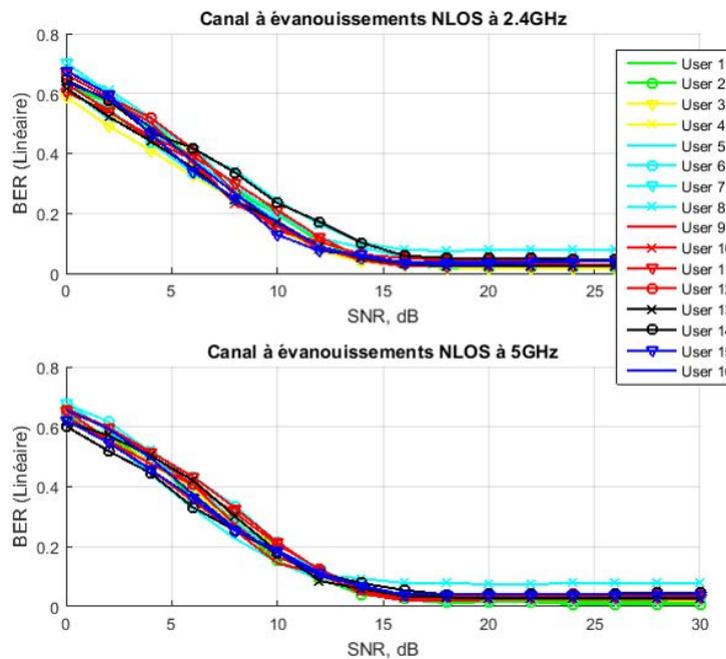


FIGURE 5.9 – BER pour un canal NLOS à évanouissement

Pour corriger ces erreurs et augmenter la robustesse, il va falloir utiliser un codage correcteur d'erreur qui renforcera le signal contre les effets des multi-trajets. L'apport des codes correcteurs d'erreur sera présenté à la prochaine section.

B. Performances pour un canal à évanouissements en présence du bruit industriel

En plus des évanouissements, et en rajoutant le bruit industriel composé d'un bruit gaussien et d'un bruit impulsionnel (figure 2.13), le taux d'erreur binaire est présenté à la figure (5.10) pour un canal à 2.4GHz et sur la figure (5.11) pour 5GHz. Notre architecture de communication converge plus lentement et les performances décroissent, néanmoins elle permet de détecter entièrement l'information à partir d'un SNR qui dépasse 35dB. L'écart des taux d'erreur est très considérable dépendamment du canal de propagation (figure 5.12). En présence du bruit industriel, l'information risque d'être complètement noyée est donc perdue, si les effets du canal ne sont pas pris correctement en compte [84].

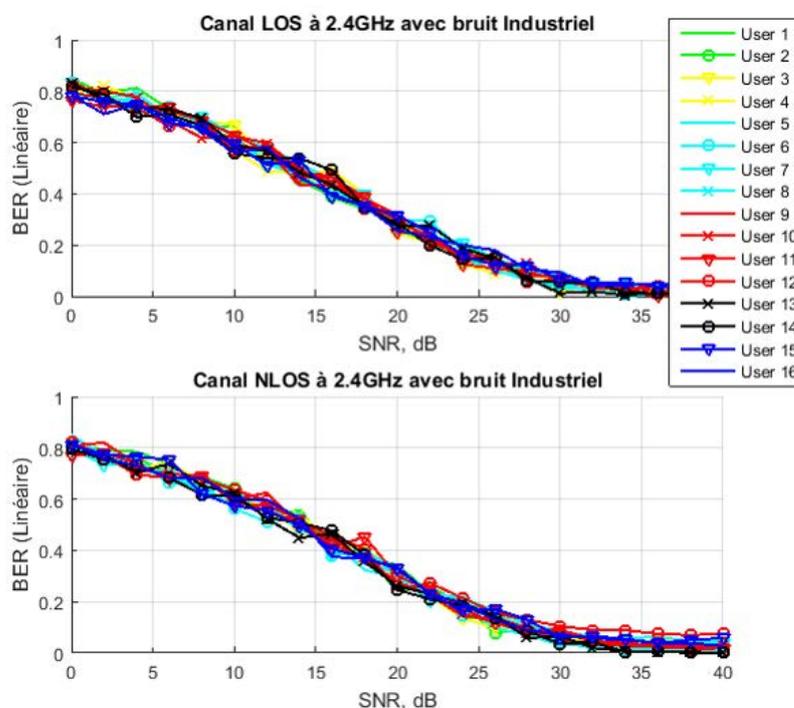


FIGURE 5.10 – BER pour un canal à évanouissement à 2.4GHz en présence du bruit industriel

Tel que présenté au chapitre 2, plusieurs techniques de suppression de bruit impulsionnel sont proposées dans la littérature pour justement corriger et redresser l'information. Les techniques basées sur le seuillage seront utilisées dans ce présent travail afin d'augmenter la robustesse de l'architecture de transmission.

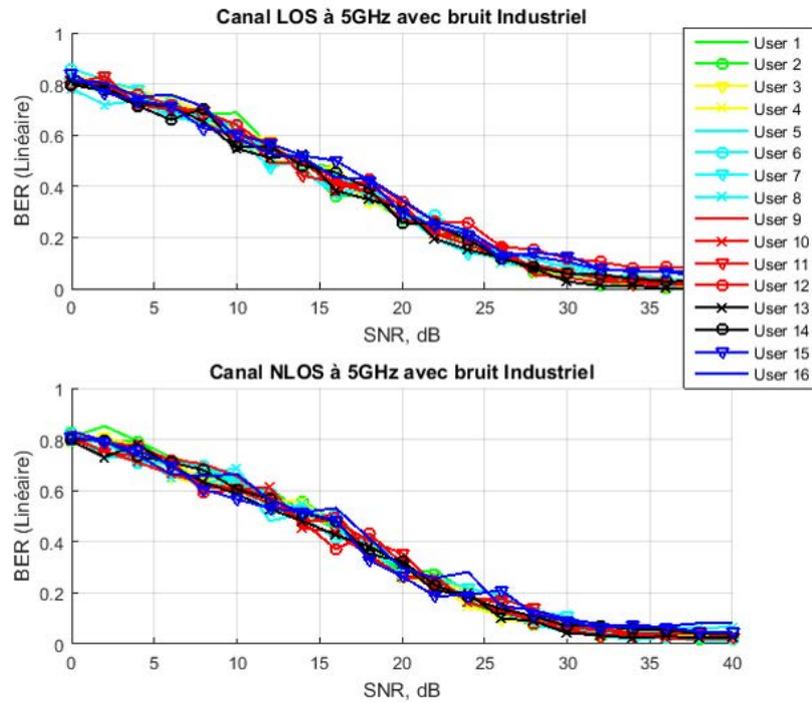


FIGURE 5.11 – BER pour un canal à évanouissement à 5GHz en présence du bruit industriel

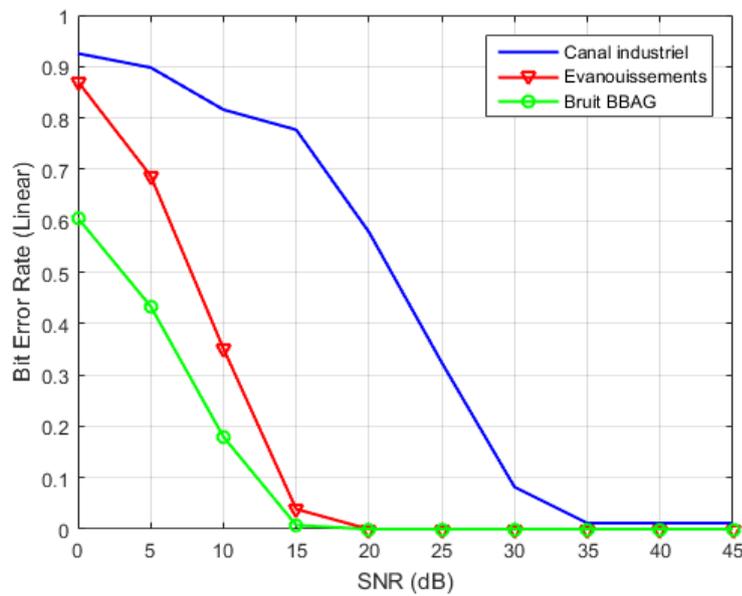


FIGURE 5.12 – BER pour différents canaux (*Capteur 15*)

5.3 Amélioration de la robustesse de l'architecture

Maintenant que l'architecture MTO est testée pour différentes configurations de propagation ce qui montre que la robustesse du système est influencée par le canal de transmission. Dans le paragraphe suivant, nous procéderons à l'étude de l'amélioration de la robustesse de l'architecture multi-capteurs en optant pour deux techniques. Un codage correcteur du canal pour renforcer l'information contre les effets de propagation. Et un récepteur optimal à base d'un seuillage à la réception pour minimiser ou éliminer l'effet du bruit impulsif.

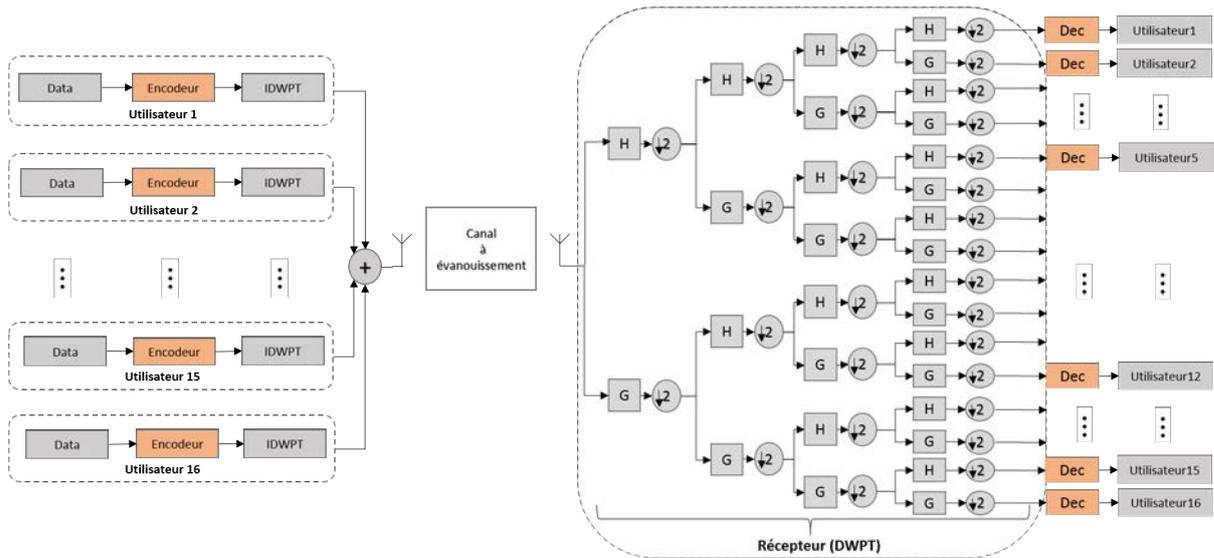


FIGURE 5.13 – Architecture MTO avec codage correcteur d'erreur

5.3.1 Apport des codes correcteurs d'erreur

Pour combattre les effets des perturbations du canal, un codage du canal à l'émission est nécessaire. Telle la majorité des systèmes de transmission sans fil, le codage correcteur d'erreur permet de corriger une ou plusieurs erreurs dans un mot de code en ajoutant aux informations des symboles redondants qui sont des symboles de contrôle (figure (5.13)).

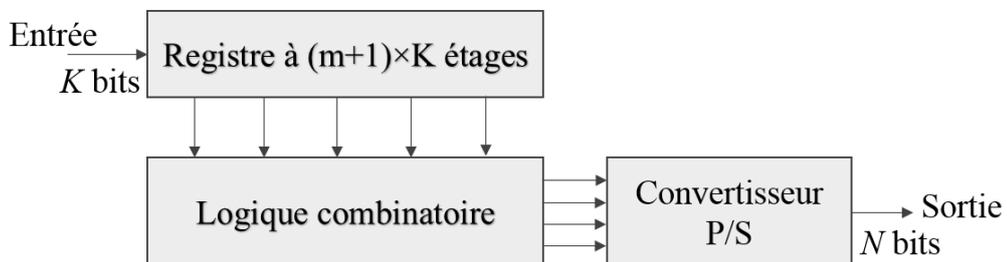


FIGURE 5.14 – Exemple d'un générateur de code convolutif

Différentes techniques de codage existent, leur utilisation est un compromis entre efficacité et

complexité d'algorithme de codage et décodage. Parmi les techniques de codage les plus utilisées nous citons les code en bloc, les codes convolutifs, les Turbo codes et les codes par contrôle de parité LDPC. Certains travaux ont présenté des techniques de codage du canal pour les réseaux de capteurs à base des turbo codes ou des LDPC [85, 86]. Mais ces techniques ne sont pas toujours adaptées à ces réseaux par le fait de leur consommation excessive de l'énergie pendant le processus d'encodage et décodage. Dans [87, 88] il a été démontré que les codes convolutifs sont les mieux adaptés pour les réseaux de capteurs sans fil. Ce sont ces codes qui seront utilisés pour améliorer la robustesse de notre architecture face aux perturbations du milieu industriel.

Le principe du codage convolutif tel que représenté sur la figure (5.14) consiste à calculer la redondance à partir du bloc d'information de taille K et des m blocs précédents. Les bits de sortie N sont calculés par une combinaison linéaire reliant les K bits en entrée et les m blocs précédents. $N * K$ polynômes générateurs spécifient les codeurs convolutifs à K entrées et N sorties et le codeur contient K registres à décalage qui correspondent chacun à une entrée.

La longueur de contrainte du codeur K_c qui spécifie le nombre maximum de bits associés à une sortie pouvant être affectés par un bit quelconque à l'entrée est : $K_c = m + 1$ et le rendement du code s'exprime par $R = \frac{K}{N}$.

Pour décoder les informations issues d'un encodeur convolutif, l'algorithme de Viterbi [89] est le mieux adapté. Il trace toutes les combinaisons de symboles possibles et leur probabilité comparée à la séquence de bits reçus. La séquence retenues est celle qui est la plus probable. La contrainte majeure de cet algorithme est que le nombre de combinaisons possibles est égal à 2^{K_c} . Ce qui limite en pratique la longueur de contrainte à 7 ou 9 bits.

| Taux | g0 | g1 | g2 | g3 |
|------|-----|-----|-----|-----|
| 1/2 | 171 | 133 | | |
| 1/3 | 133 | 165 | 171 | |
| 1/4 | 121 | 133 | 165 | 171 |

TABLE 5.2 – Codes convolutifs utilisés

Pour réaliser les simulations, nous avons opté pour les codes convolutifs présentés sur le tableau (5.2) ayant tous une longueur de contrainte de 7. Ce sont les encodeurs optimaux les plus utilisés par les standards de communications numériques et ayant affiché un meilleur compromis entre performances et complexité. L'architecture de communication avec le bloc du codage correcteur d'erreur est présentée sur la figure (5.13).

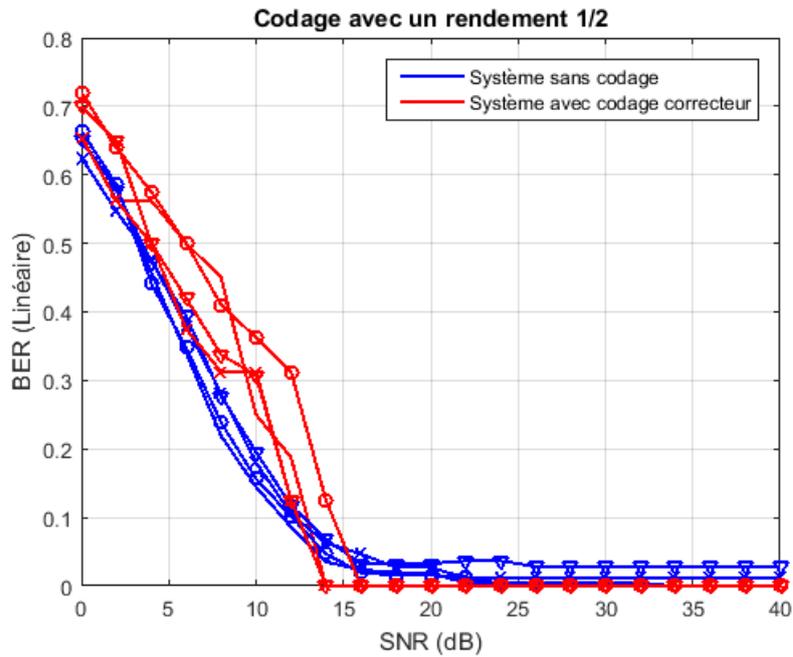


FIGURE 5.15 – BER pour un code correcteur d'un rendement 1/2 pour 4 capteurs

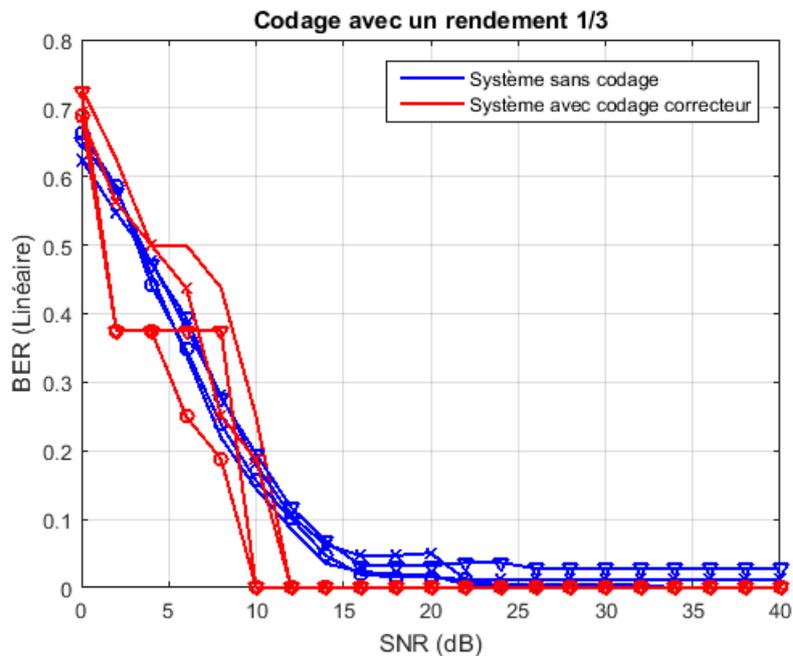


FIGURE 5.16 – BER pour un code correcteur d'un rendement 1/3 pour 4 capteurs

Tel que illustré sur les figures (5.15), (5.16) et (5.17) pour un choix de 4 capteurs (1, 6, 12 et 16), le gain rapporté par le codage du canal varie en fonction des différents taux de codage. Pour un canal à évanouissement les erreurs de détection sont éliminées à partir de 8dB pour un

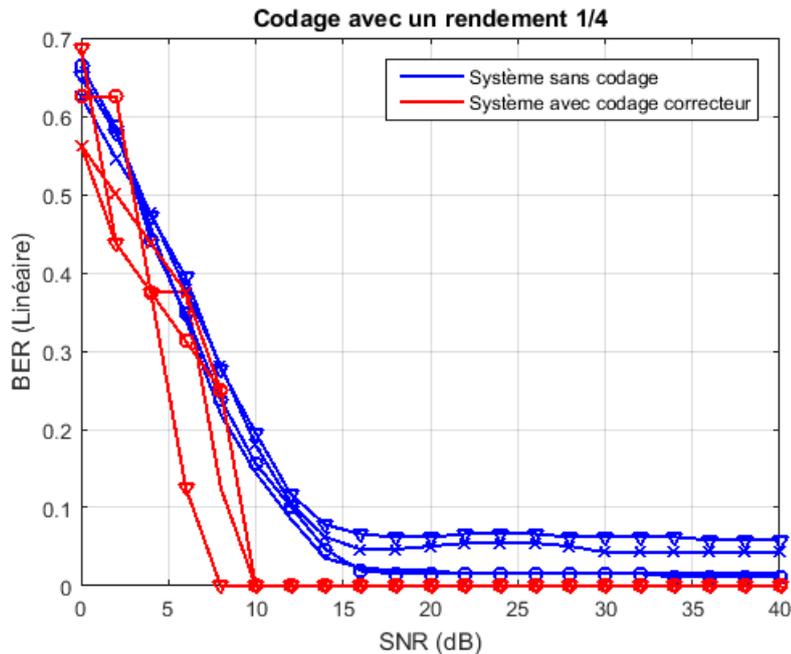


FIGURE 5.17 – BER pour un code correcteur d'un rendement 1/4 pour 4 capteurs

taux de codage de 1/4. A 10dB pour un taux de 1/3 et à partir de 14dB pour un taux de 1/2. Pour un BER fixé à 0.1, le gain du codage est autour de 6dB à un taux de 1/4 pour un canal à évanouissement.

Comparé à un canal *BABG* pour le quel les erreurs sont éliminées à partir de 20dB (figure 5.7), le gain en robustesse rapporté par le codage du canal est autour de 12dB.

5.3.2 Récepteur optimal pour minimiser les bruits impulsionnels

La majorité des récepteurs optimaux implémentés pour combattre les effets des bruits impulsionnels sont basés sur le seuillage des amplitudes à l'entrée du récepteur. Cette technique sera retenue pour améliorer la robustesse de notre système de communication face au bruit industriel. Nous choisirons un seuillage adaptatif à l'entrée pour le quel les seuils de détection sont adaptés aux différentes valeurs du SNR.

Après détection des impulsions, la suppression ou réduction (cas échéant) de ces dernières sera faite en se basant sur les niveaux de puissances et SNR du système. Sur la figure (5.18) les courbes représentant le BER en fonction du SNR pour les 4 capteurs (1, 6, 12 et 16) qui affichent un gain supérieur à 10 dB par rapport à l'architecture initiale dans un canal fortement bruité. Pour un canal industriel complexe, en utilisant un récepteur à seuillage adaptatif, l'erreur est complètement éliminée à partir d'un SNR de 24dB. L'avantage majeure de ce récepteur optimal c'est qu'il est simple à réaliser et est très bien adapté aux réseaux de capteurs sans fil.

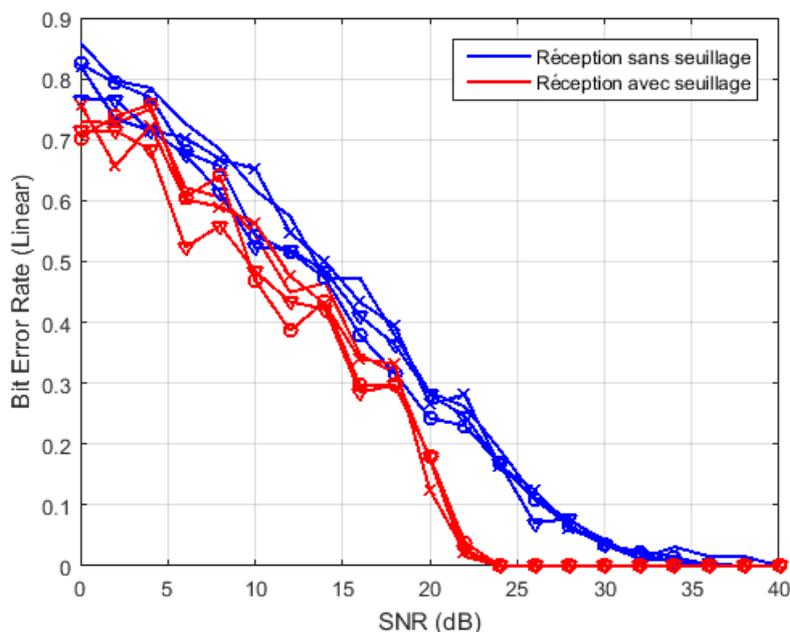


FIGURE 5.18 – Seuillage du bruit impulsif à la réception

5.4 Le fonctionnement du mode *One To Many* en milieu industriel

Pour le mode OTM, un seul émetteur à base de l'IDWPT ayant n entrées envoie les données vers m récepteurs à base de la DWPT à n sorties chacun. Le principe de cette transmission consiste à activer une seule entrée (i) de l'émetteur et forcer les autres à zéros (figure 5.19). À la réception, la donnée sera détectée à la sortie (i) pour chaque récepteur (figure 5.20). Toutes les données binaires sont modulées par une modulation impulsifonnelle.

Le mode OTM favorise la diversité spatiale à la réception, où le même signal transmis sera capté par m récepteurs différents. Chaque récepteur applique une DWPT sur les signaux reçus, et uniquement la sortie correspondante à l'entrée activée contiendra la donnée utile. Le système de communication étudié ici, sera basé sur un capteur émetteur et 4 capteurs à la réception. L'entrée numéro 2 de l'émetteur sera activée et toutes les autres seront forcées à zéro. Le nombre de récepteur importe peu, car à la réception c'est une technique de diffusion (*Broadcast*) qui est utilisée.

5.4.1 La forme des signaux à la réception

L'objectif d'utiliser ce mode est que les équipements du niveau 1 ou 2 de la pyramide CIM (4.11) puissent envoyer la même donnée aux niveaux inférieurs. Seuls les capteurs ou actionneurs qui ont besoin de cette donnée peuvent la récupérer et la traiter. D'où la diversité du nombre de récepteurs. Le seul paramètre qui peut influencer la qualité du signal reçu est la distance entre l'émetteur et récepteurs. Mais comme notre environnement de simulation considère la communication à l'intérieur d'une usine, la distance maximale entre les différents capteurs ne dépasse pas 100m.

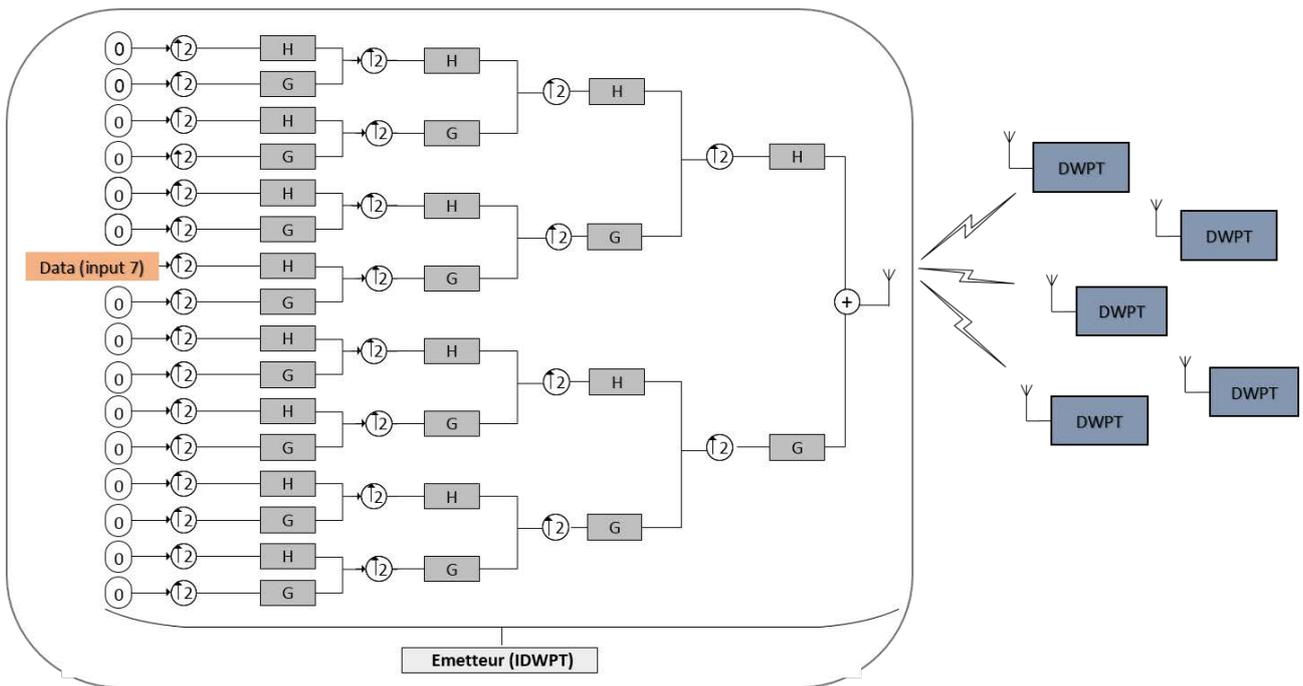


FIGURE 5.19 – Mode de transmission OTM avec un émetteur et 5 récepteurs (entrée 7 activée)

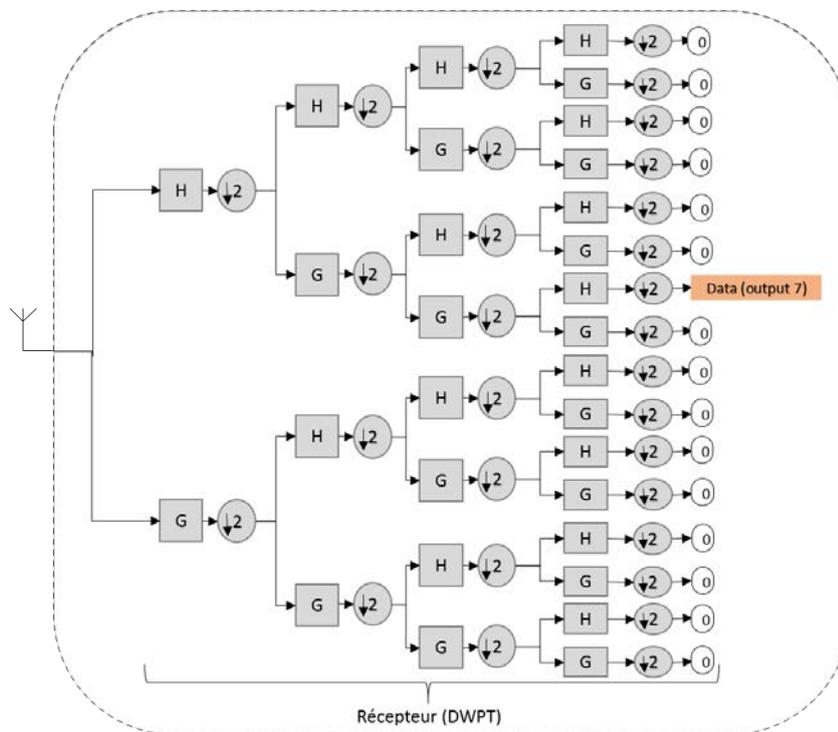


FIGURE 5.20 – Récepteur DWPT pour chaque utilisateur (Signal récupéré à la sortie 7)

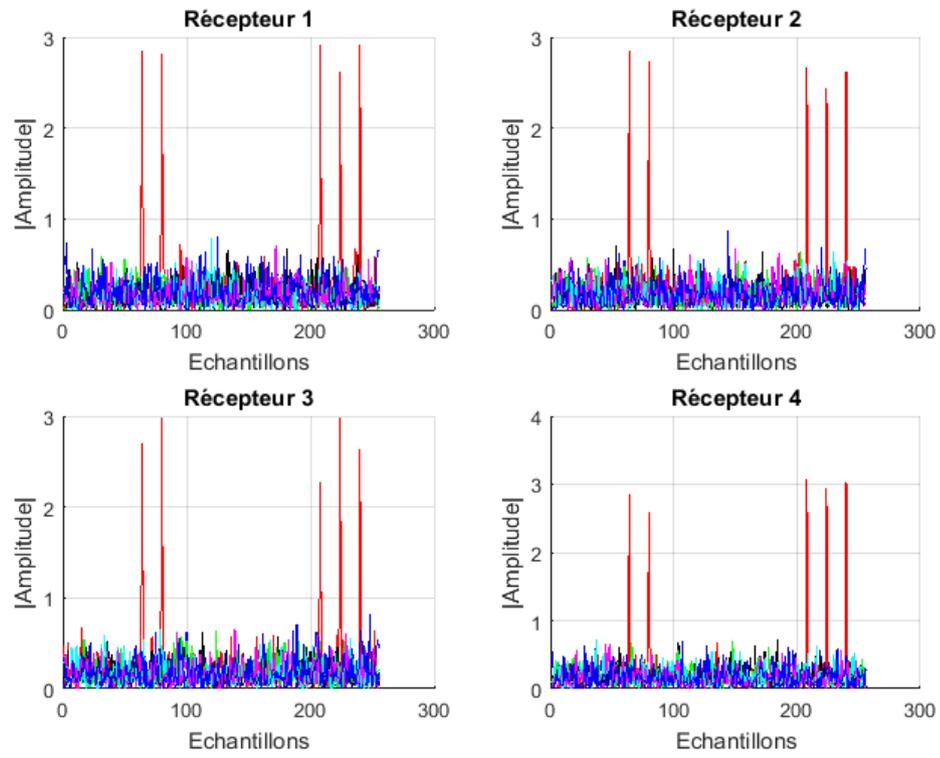


FIGURE 5.21 – Signal détecté à la sortie 2 (en rouge), les autres sorties sont nulles

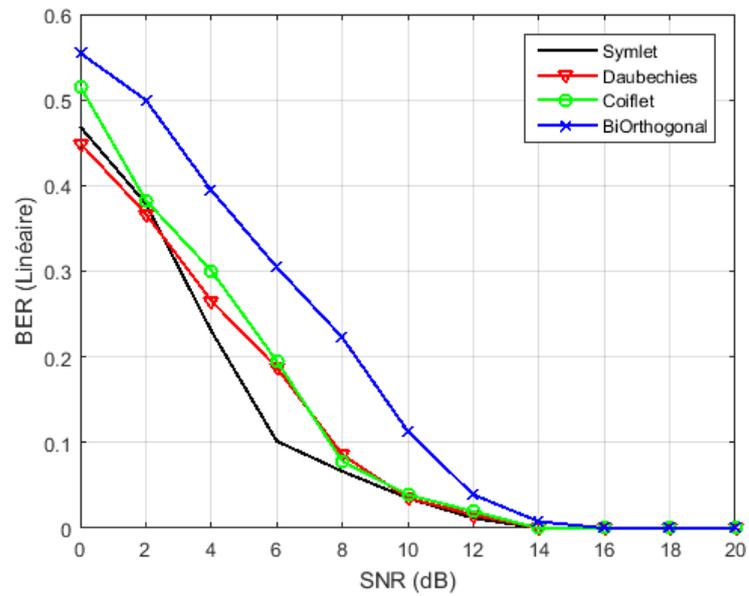


FIGURE 5.22 – BER pour différentes ondelettes dans un canal BABG

Pour une transmission sur un canal à bruit blanc *BABG* à un SNR de 20dB, les signaux reçus sur les 4 différents capteurs sont illustrés sur la figure (5.21). La donnée est acheminée vers tous les capteurs, et uniquement la deuxième sortie de chaque bloc DWPT contient cette donnée. Les autres sorties contiennent un signal de bruit.

Certainement le canal reliant l'émetteur à chaque récepteur, sera différents 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 les 4 capteurs.

5.4.2 L'impact de la forme d'ondelette

Pour un canal *BABG*, le signal transmis est détecté et reconnu par tous les capteurs récepteurs. Pareil qu'au paragraphe (5.2.2), la forme des ondelettes en émission et réception sera testée pour voir son influence sur la robustesse du mode de transmission. La figure (5.22) représente le BER d'une architecture OTM à 4 capteurs récepteurs avec différentes formes d'ondelette.

Les simulations montrent que la robustesse de l'architecture IDWPT/DWPT dépend de la forme d'ondelette choisie en émission. Pour un canal *BABG* avec 4 récepteurs, le BER avec l'ondelette 'Symlet' est l'optimum comparé aux autres formes d'ondelettes. La figure (5.23) représente le BER pour une transmission d'un seul capteur vers 4 récepteurs. De ce fait, les simulations du mode OTM sur le canal industriel seront effectués uniquement avec celle-ci.

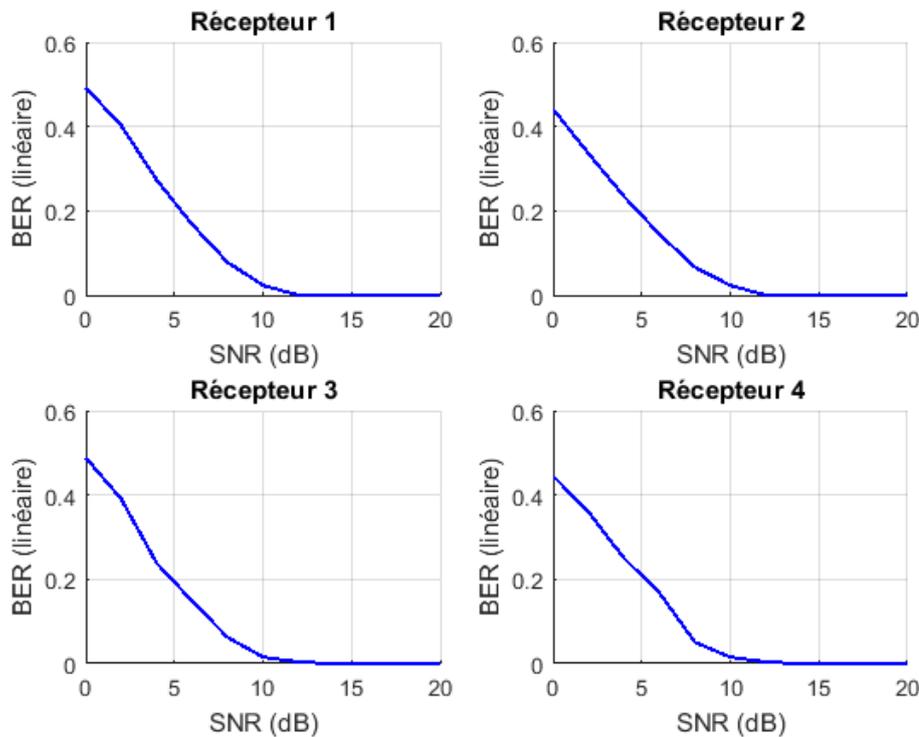


FIGURE 5.23 – BER pour un canal BABG avec 4 récepteurs

5.4.3 Transmission dans un canal industriel

Le canal industriel est le même que celui utilisé pour le mode MTO. Il est caractérisé par des multi-trajets qui suivent une loi exponentielle décroissante. Et l'enveloppe des trajets suit la loi de Rice et Rayleigh en fonction de la configuration. Rice pour le mode LOS et Rayleigh pour le NLOS. Le bruit, est un bruit impulsionnel combiné au bruit *BABG*. Dans les paragraphes qui suivent, les performances de la transmission OTM seront présentées et discutées.

A. Performances pour un canal à évanouissements

En considérant maintenant l'effet des évanouissements du canal dus à la dispersion temporelle en plus du bruit *BABG* pour les configurations LOS et NLOS, notre architecture impulsionnelle permet toujours la détection des signaux à la réception.

D'après les simulations présentées sur les figures (5.24) et (5.25), le signal transmis est détecté au niveau de tous les capteurs récepteurs pour les canaux LOS et NLOS à 2.4GHz et 5GHz. La détection se fait quasiment sans erreur au delà de 20dB. Quelques différences entre les configurations LOS et NLOS sont détectées à partir d'un SNR de 14dB. Ceci est dû principalement aux effets des évanouissement et de la dispersion des canaux qu'il faudrait corriger en utilisant un encodage du canal à l'émission.

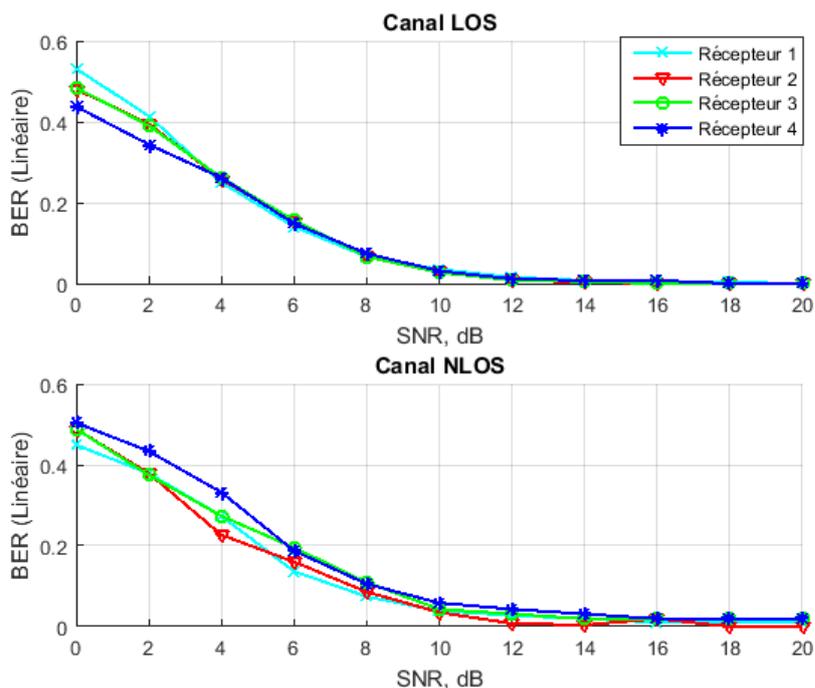


FIGURE 5.24 – BER pour un canal LOS et NLOS à 2.4GHz

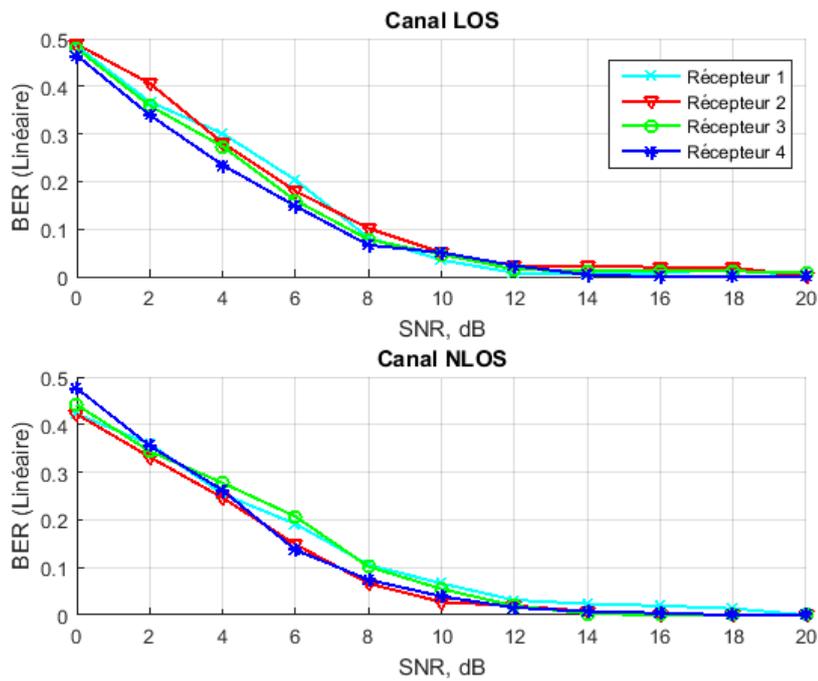


FIGURE 5.25 – BER pour un canal LOS et NLOS à 5GHz

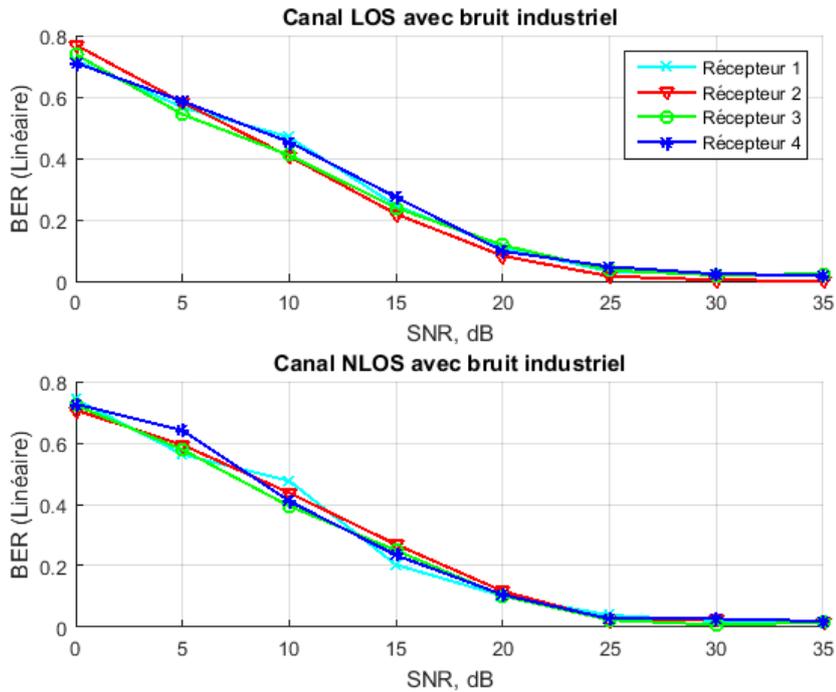


FIGURE 5.26 – BER pour un canal à évanouissement en présence du bruit industriel

B. Performances pour un canal à évanouissements en présence du bruit industriel

En considérant maintenant l'effet du bruit industriel, notre architecture de communication permet de détecter entièrement l'information à partir d'un SNR de 30dB tel que illustré sur la figure (5.26).

L'écart des taux d'erreur est très considérable et dépend du canal de propagation. En présence du bruit industriel, l'information risque d'être complètement perdue, si les effets du canal ne sont pas pris correctement en compte.

5.5 Amélioration de la robustesse de l'architecture

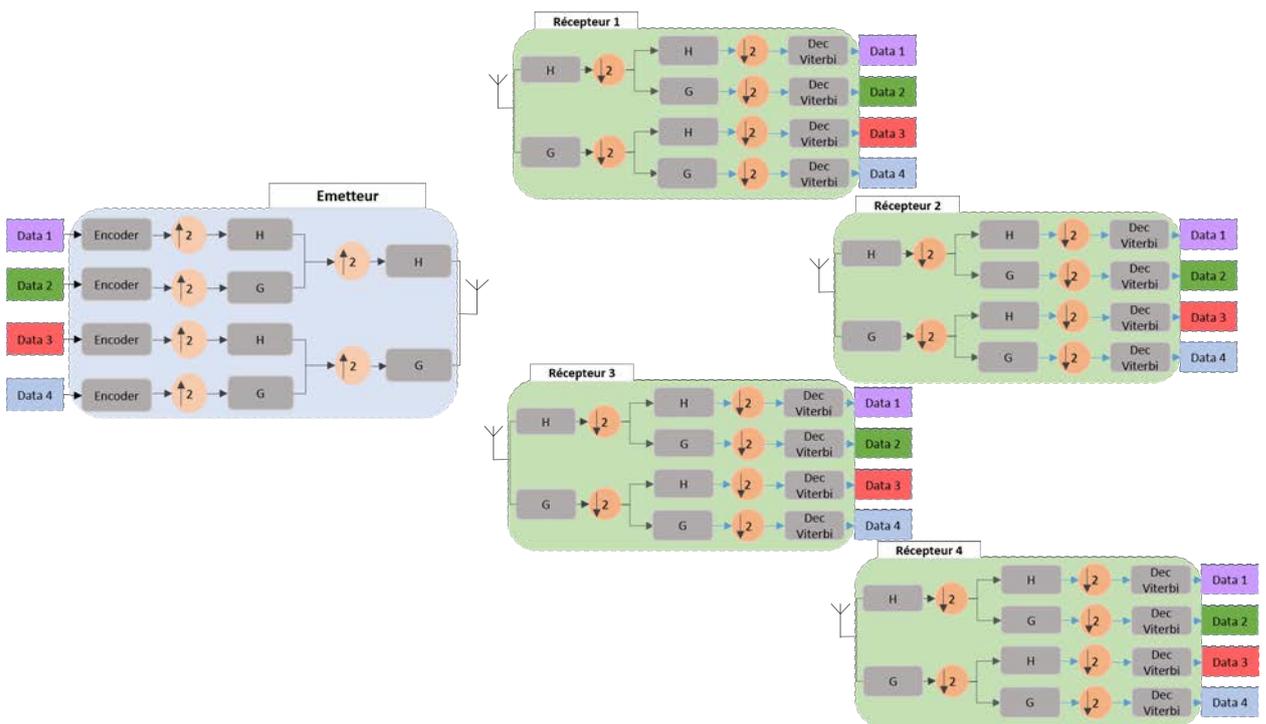


FIGURE 5.27 – Architecture OTM avec codage correcteur d'erreur

5.5.1 Codage du canal

Combattre les effets du canal à évanouissement nécessite l'utilisation d'un bloc d'encodage du canal à l'émission (figure 5.27). Ceci permettra d'améliorer la robustesse du système de communication et ainsi rendre la qualité des signaux reçus plus fiable.

Pour un code de rendement 1/2 la détection des signaux se fait sans aucune erreur à un SNR de 8dB pour un canal à évanouissement tel que présenté sur la figure(5.28). Et pour un codage avec un taux de 1/4 les erreurs sont éliminées à partir de 6dB comme illustré à la figure(5.29). Un gain significatif qui dépasse 10dB est obtenu avec un code de rendement 1/4 pour un canal BABG. Et dépassant 6dB pour un canal à évanouissements.

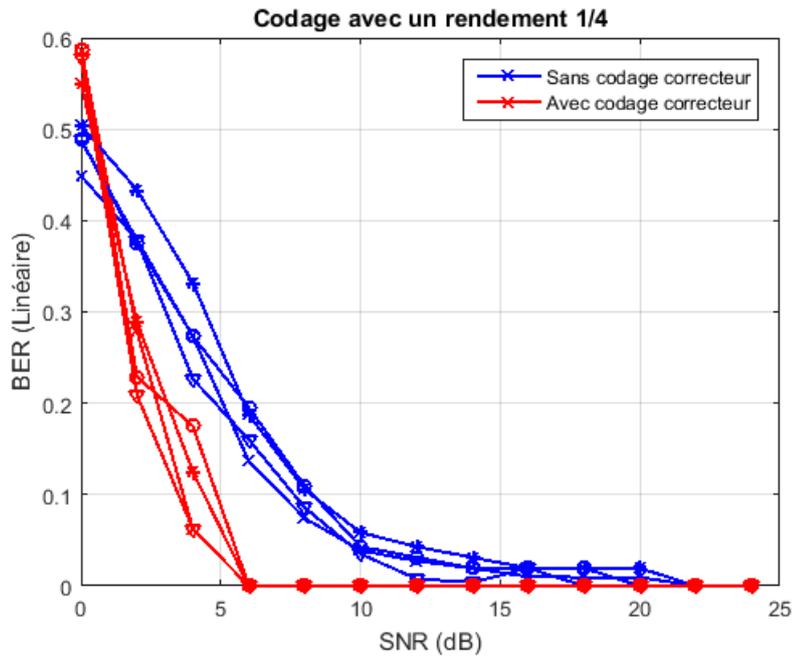


FIGURE 5.28 – BER pour un canal à évanouissement avec code correcteur

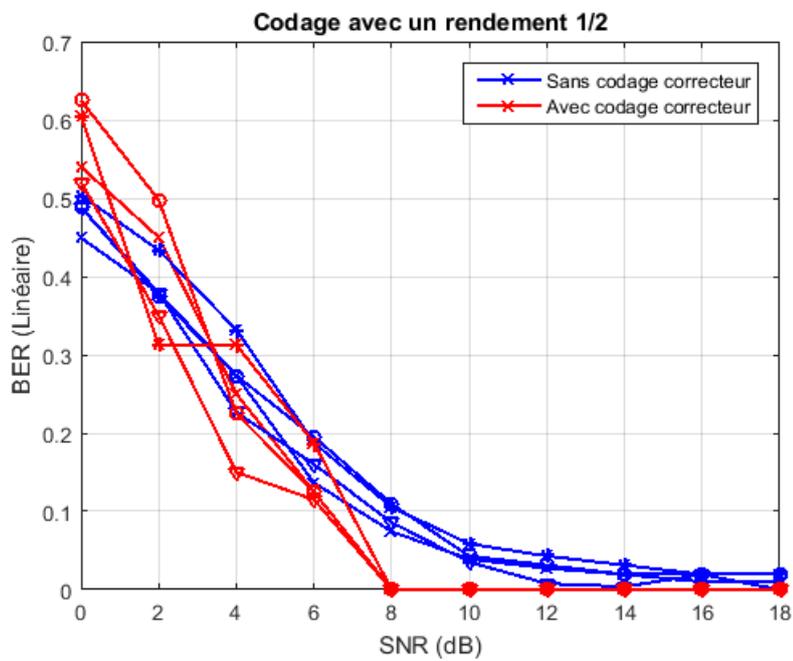


FIGURE 5.29 – BER pour un canal à évanouissement avec code correcteur

5.5.2 Seuillage du bruit industriel

Un récepteur optimal basé sur le seuillage d'amplitude est utilisé ici pour réduire le bruit industriel. Comme pour le mode MTO, un seuillage adaptatif en fonction du SNR et de l'amplitude du bruit est appliqué dès la réception des signaux. Les impulsions seront détectées et réduites ou éliminées.

La technique du seuillage améliore nettement la qualité des signaux reçus tel illustré sur la figure (5.30). Le BER obtenu à 20db pour le récepteur avec seuillage est atteint au delà de 25dB si le bruit industriel n'est pas pris en compte à la réception. Un gain de 5dB est obtenu pour des faibles valeurs du SNR en utilisant un seuillage du bruit à la réception.

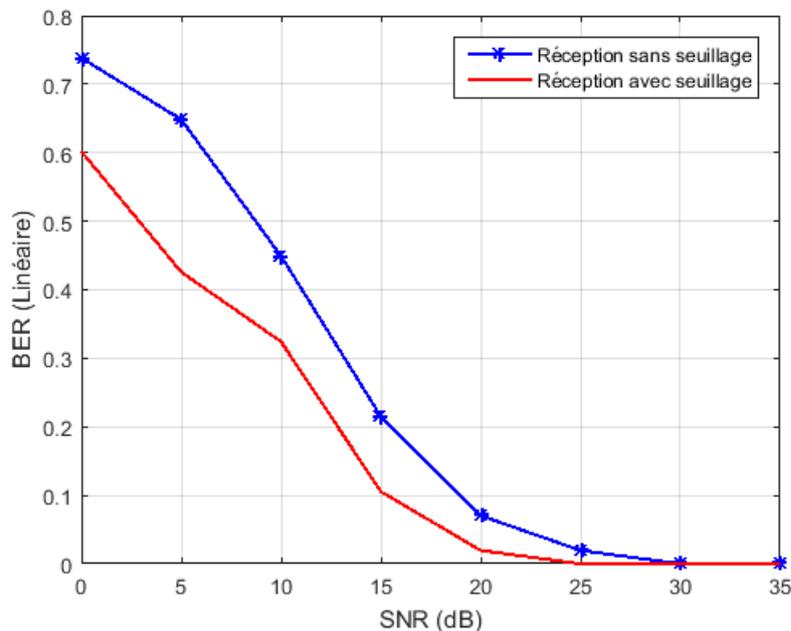


FIGURE 5.30 – BER au niveau du récepteur 2 avec seuillage

5.5.3 Conclusion

Le réseau de capteur sans fil utilisant l'architecture impulsionnelle avec ses deux modes de communication MTO et OTM, présente des meilleurs résultats en termes de réception de données pour un milieu industriel fortement bruité. La robustesse de l'architecture peut être améliorée en utilisant le codage du canal ou le seuillage du bruit industriel à la réception. Un récapitulatif présentant les différents BER obtenus pour un SNR de 15dB est présenté au tableau (5.3).

Afin de valider ce choix d'architecture, une comparaison avec une architecture à modulation multi-porteuse sera présentée dans le paragraphe suivant. Cette architecture a été choisie en se basant sur la conception des réseaux de capteurs sans fil existants.

| | Architecture MTO | | Architecture OTM | |
|---|------------------|------|------------------|-------|
| Canal BABG | 0.0022 | | 0 | |
| Configurations | LOS | NLOS | LOS | NLOS |
| Canal à évanouissement | 0.09 | 0.1 | 0.0012 | 0.025 |
| Canal à évanouissement avec bruit industriel | 0.6 | 0.67 | 0.22 | 0.25 |
| Canal à évanouissement avec codage correcteur | 0 | | 0 | |
| Récepteur optimal à base de seuillage | 0.35 | | 0.1 | |

TABLE 5.3 – BER pour différents mode de communication à 15dB

5.6 Comparaison avec un système à modulation multi-porteuses

Les réseaux de capteurs sans fil opèrent dans la majorité du temps en large bande et Ultra-large bande. Leur efficacité est conditionnée par les performances de la couche physique qui reposent essentiellement sur la recherche du meilleur compromis entre la qualité des transmissions et leur consommation énergétique. Pour les applications en large bande, les techniques de modulation multi-porteuses sont les plus adoptées par les standards de communication sans fil (802.11a, 802.11g 'WiFi', et 802.16 'WiMax'). La modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation) est une technique de modulation qui consiste à répartir le signal sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonales modulées individuellement à bas débit. Dans le domaine temporel, le signal obtenu se décompose en symboles résultant de la superposition de N signaux sinusoidaux de fréquences différentes. Dans le domaine fréquentiel, les distorsions du signal introduites par le canal seront limitées car chaque sous-bande représentant un signal OFDM sera suffisamment étroite pour pouvoir considérer le canal comme localement plat. Ce qui permet d'atteindre une efficacité spectrale très proche de l'optimum, mais aussi procure une excellente résistance aux évanouissements de fréquences du canal [90].

Cependant, l'inconvénient majeur de cette technique est que le récepteur OFDM nécessite une synchronisation précise de la fréquence à la réception avec celle à l'émission. Tout décalage entre les deux fréquences engendre la perte de l'orthogonalité des sous-porteuses, créant ainsi des interférences entre ces dernières. Ce problème de synchronisation est assez présent dans le cas où les capteurs sont mobiles à différentes vitesses. Dans le cadre de cette thèse, les capteurs sont immobiles ou à faible mobilité, la synchronisation ne représente pas une contrainte particulière. D'où le choix de comparer notre architecture impulsionnelle à un système avec modulation multi-porteuses.

Pour un canal à évanouissements, un système à base d'une modulation OFDM utilisant une FFT à 128 points pour différentes modulations des sous-porteuses, est comparé à notre architecture en mode MTO. Les différents paramètres de l'étude sont les suivants :

- Nombre de sous-porteuses : 16
- Constellation : BPSK, QPSK et QAM16
- OFDM : Utilisation d'un préfixe cyclique de 20% de la durée symbole.
- IDWPT/DWPT : Utilisation de l'ondelette 'Symlet'.
- Canal de propagation : Canal à évanouissement avec BABG et canal à évanouissement avec bruit industriel.

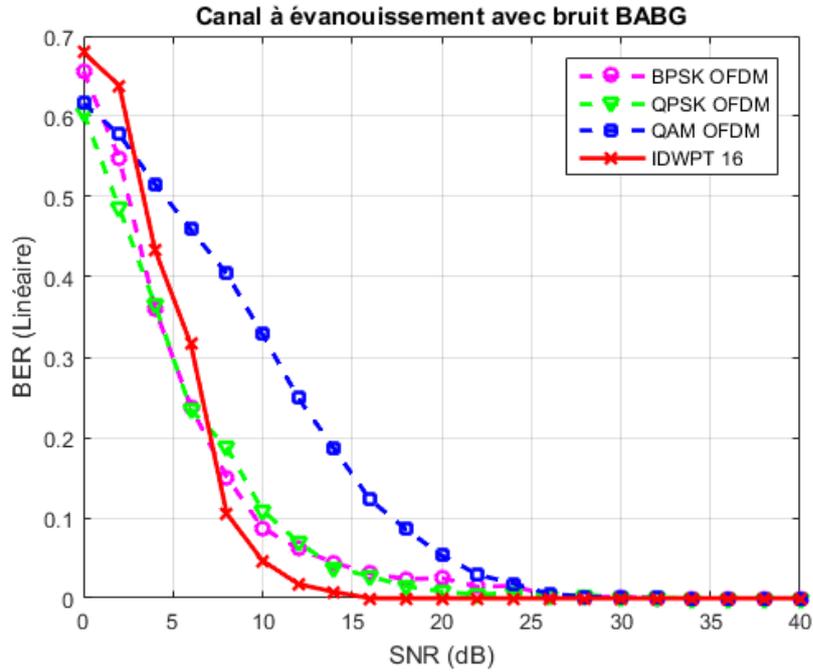


FIGURE 5.31 – BER pour un système OFDM sur un canal à évanouissements

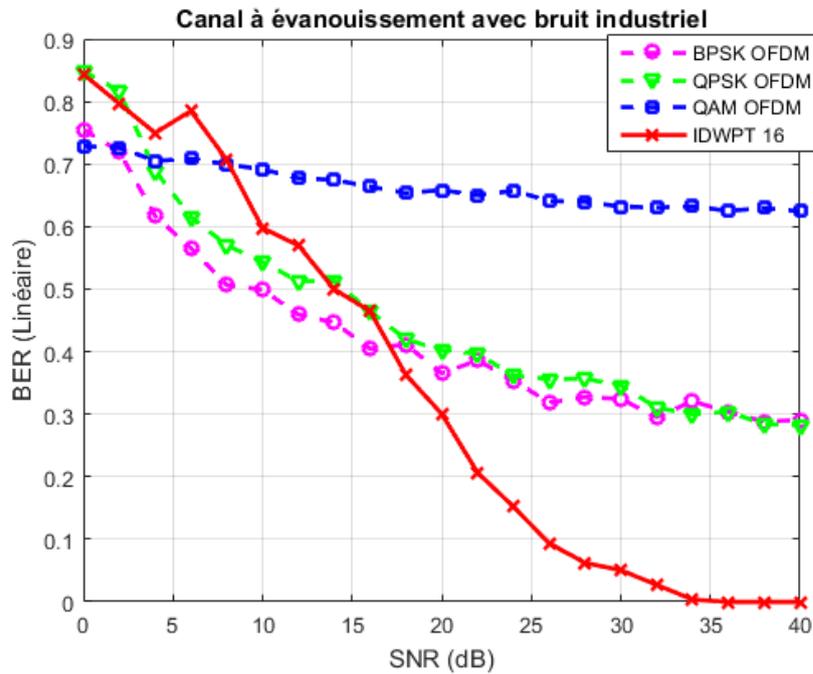


FIGURE 5.32 – BER pour un système OFDM sur un canal industriel

Les résultats de simulations sont présentés à la figure (5.31) et démontrent bien la robustesse de notre architecture face aux évanouissements. L'architecture impulsionnelle affiche des résultats

| Techniques | BER pour un Canal à évanouissement | | |
|--------------------------------|------------------------------------|----------|----------|
| | SNR=10dB | SNR=20dB | SNR=30dB |
| Architecture IDWPT/DWPT MTO | 0.05 | 0 | 0 |
| OFDM-BPSK | 0.09 | 0.04 | 0 |
| OFDM-QPSK | 0.11 | 0.01 | 0 |
| OFDM-QAM16 | 0.34 | 0.15 | 0 |

TABLE 5.4 – BER comparatif pour un canal à évanouissement

| Techniques | BER pour un Canal à évanouissement avec Bruit industriel | | |
|--------------------------------|---|----------|----------|
| | SNR=10dB | SNR=20dB | SNR=30dB |
| Architecture IDWPT/DWPT MTO | 0.6 | 0.3 | 0.05 |
| OFDM-BPSK | 0.5 | 0.37 | 0.32 |
| OFDM-QPSK | 0.55 | 0.4 | 0.35 |
| OFDM-QAM16 | 0.7 | 0.65 | 0.62 |

TABLE 5.5 – BER comparatif pour un canal à évanouissement avec bruit industriel

de BER plus bas que ceux d'un système à OFDM pour les trois modulations numériques mais à différents débit de transmission.

Quand le bruit industriel est considéré, le système OFDM peine à fonctionner correctement (figure 5.32). Ici, notre architecture démontre sa robustesse face au bruit industriel même sans utiliser un récepteur optimal pour réduire les effets du bruit. Il est clair que pour un réseau de capteurs sans fil en milieu industriel hostile, notre système à base de modulation impulsionnelle en mode MTO et OTM est mieux adapté pour fiabiliser la communication comparé aux systèmes classiques à base d'OFDM. Un comparatif des taux d'erreur binaire BER à différentes valeurs du SNR pour un canal à évanouissement et un canal à évanouissement avec bruit industriel est présenté aux tableau (5.4) et (5.5) respectivement.

5.7 Conclusion

Notre architecture de communication basée sur la transformée en ondelette en émission et réception pour une transmission multi-utilisateurs, a pu prouver selon les simulations son fonctionnement et ses performances dans un milieu industriel complexe. Lors de ce chapitre, nous avons présenté deux modes de communication, soit le *Many to one* ou *One to Many*, avec leurs différentes configurations de communication LOS et NLOS. Ceci pour illustrer les différents modes de communication dans un environnement industriel à moyenne échelle. Un choix de l'ondelette optimale a été fait en premier lieu avant de faire les simulations pour les canaux à évanouissements avec un bruit industriel additif. C'est l'ondelette 'Symlet' qui a démontré un meilleur taux d'erreur binaire comparée aux ondelettes 'Daubechies', 'Coifflets' et 'Biorthogonal'.

Pour améliorer la robustesse de notre architecture, deux techniques ont été utilisées ; le codage correcteur d'erreur et le seuillage du bruit impulsionnel à la réception. Ces deux techniques étant adaptées aux réseaux de capteurs sans fil, ont permis d'améliorer les performances et la robustesse de notre système. Le gain varie entre 6 à 10dB quand un code convolutif correcteur d'erreur est

utilisé pour les deux modes MTO et OTM. Et de 5 à 10dB en utilisant un récepteur optimal à base d'un seuillage de bruit industriel.

La comparaison de notre architecture avec un système à modulations multi-porteuses OFDM a montré une meilleure robustesse de notre architecture dans un milieu industriel fortement bruité. Les systèmes à base de modulations multi-porteuses classiques sont moins adaptés aux communications dans des environnement difficiles qui présentent des bruits impulsionnels.

Conclusion générale et perspectives

A l'ère du numérique, le monde industriel se transforme rapidement et radicalement en optant pour les nouvelles technologies de communications numériques. Ces technologies sont devenues une opportunité pour les entreprises qui visent l'accessibilité et la durabilité de leurs produits. Les grandes avancées technologiques réalisées dans le domaine de l'informatique et des communications sans fil ont contribué à la naissance de la nouvelle révolution industrielle industrie 4.0. En permettant ainsi d'avoir des usines numériques, intelligentes et connectées. L'objectif de cette thèse est de participer aux progrès de cette nouvelle révolution en proposant une architecture de communication sans fil multi-utilisateurs fiable et robuste face aux perturbations engendrées par le milieu de propagation complexe. Cette architecture est à base des réseaux de capteurs sans fil déployés dans un milieu industriel pour assurer la communication entre les différents équipements. La technique de modulation utilisée est une technique impulsionnelle basée sur la transformée par paquets d'ondelette adaptée aux réseaux de capteurs.

Deux modes de fonctionnement multi-utilisateurs de l'architecture impulsionnelle ont été proposés dans ce travail selon le type de communication souhaité Many-To-One (MTO) ou One-To-Many (OTM). Ces fonctionnements bénéficient de la souplesse allouée par l'architecture à base de la transformée en paquets d'ondelettes. Pour laquelle l'activation ou non des entrées donc des utilisateurs est rendue facile en optant pour une structure en banc de filtres en émission et réception. Pour se mettre dans un contexte d'étude en milieu industriel, il a été proposé dans ce travail un modèle de canal sans fil qui simule les différentes caractéristiques de propagation dans un tel environnement. Afin de proposer un système de communication complet et robuste pour les applications de l'usine du futur.

Dans le premier chapitre de ce manuscrit, nous avons présenté les différentes technologies de communication en milieu industriel. A commencer par les systèmes de communication filaires en industrie et leur évolution vers des systèmes sans fil auxquels les grandes innovations technologiques ont contribué. Les différents standards de communication sans fil ainsi que les technologies réglementant l'utilisation de l'internet des objets ont milieu industriel ont été aussi présenté à la fin de ce premier chapitre. Cette revue illustrant l'évolution des systèmes industriels communicants a servi pour présenter le contexte global du déploiement de notre architecture de communication.

Nous avons présenté au chapitre suivant les différentes caractéristiques d'un canal sans fil en particulier un canal modélisant la propagation en milieu industriel. Les différents modèles de propagation statistiques, déterministes et hybrides ont été présentés afin de proposer un modèle hybride simulé pour tester notre architecture. Ce modèle simulé combine les caractéristiques des multi-trajets avec évanouissements et un modèle de bruit industriel. Etant donné que l'architecture de communication vise des applications industrielles en large bande et ultra large bande, deux fréquences sont considérées ; 2.4 GHz et 5 GHz. La modélisation du canal à évanouissement tient en compte des configurations de communication LOS et NLOS avec différentes valeurs de dispersions temporelles. Notre modèle de canal simulé est déduit à partir d'une combinaison des

modèles statistiques et déterministes présentés dans des travaux de recherches. Ce qui a conduit à présenter un modèle dont la distribution de la réponse impulsionnelle suit une loi exponentielle décroissante et l'enveloppe du signal reçu suit une distribution de Rice pour la configuration LOS et de Rayleigh pour le cas NLOS. Quatre configurations ont été testées; LOS/NLOS à 2.4 GHz et LOS/NLOS à 5 GHz ayant toutes une réponse impulsionnelle à 10 trajets significatifs maximum.

En plus des évanouissements des canaux, un bruit industriel complexe affecte les signaux lors de leur propagation qui est constitué d'un bruit blanc gaussien et d'un bruit impulsionnel. L'intensité des impulsions varie selon les perturbations en fonction d'une constante de calibration d'amplitude que nous avons prise égale à 50 lors des simulations. Cette valeur illustre le cas d'un bruit impulsionnel assez prononcé. D'où la nécessité de proposer une architecture de communication performante et robuste qui fait face aux différentes perturbations dues à l'environnement de propagation.

Au troisième chapitre la théorie des ondelettes a été présentée car elle a servi comme base de modulation pour notre architecture impulsionnelle. Cette architecture de communication ayant pour modulateur une transformée inverse par paquets d'ondelettes IDWPT et une transformée directe DWPT comme démodulateur à la réception. L'utilisation de la transformée par paquets d'ondelettes nous a permis de profiter des avantages offerts par l'analyse multirésolution particulièrement en termes de choix de mode de fonctionnement multi-utilisateurs. Aussi, la diversité du choix d'ondelettes permet d'attribuer à chaque utilisateur une forme d'impulsions différentes des autres et ainsi le différencier à la réception. La profondeur des bancs de filtres d'analyse et de synthèse influence le nombre de capteurs à l'émission et réception.

Comme pour tout système de communication multi-utilisateurs, l'accès et le partage du canal est d'une grande criticité. L'exploitation de notre architecture de communication nécessite une adaptation pour le cas multi-utilisateurs. Ceci a fait objet du quatrième chapitre de cette thèse. Une brève revue des techniques d'accès multiples en milieu industriel a été fournie au début de ce chapitre suivie par une présentation des modes d'exploitation multi-utilisateurs de l'architecture DWPT. Pour le mode Many-To-one qui relie plusieurs capteurs émetteurs au même récepteur, une architecture de communication a été présentée avec 16 capteurs émetteurs chacun implémentant une transformée IDWPT dont le nombre d'entrée est équivalent au nombre de capteurs. Donc une échelle d'analyse d'ordre 4 ayant $2^4 = 16$ entrées. Une seule entrée de chaque capteur est activée et contient une trame binaire de données à transmettre les autres entrées sont mises à zéro. Tous les capteurs sont identifiés par un numéro correspondant au numéro de l'entrée activée. A la réception, un capteur à base d'une transformée DWPT à l'échelle 4 correspondant à 16 sorties est utilisé. Chaque trame envoyée et détectée au récepteur à la sortie équivalente au capteur transmetteur. Pour le mode One-To-Many, un capteur émet au même instant un signal ou plusieurs signaux vers différents capteurs récepteurs. La même échelle multirésolution que le mode MTO est utilisée ici. Soit un émetteur à 16 entrées, dont une seule entrée contient des informations à transmettre. A la réception, ce signal est détecté au niveau de la même sortie de tous les capteurs récepteurs. Ce qui est équivalent à une diffusion par 'Broadcast'. L'avantage principale de notre architecture est la facilité d'accéder au canal sans avoir recours à la couche MAC. Ce qui permet un gain considérable en termes d'économie d'énergie consommée par cette couche assez gourmande en ressources. Le fait de séparer les utilisateurs et de les identifier par une forme d'impulsion à l'émission, permet d'attribuer à chaque utilisateur une bande passante bien déterminée. Ainsi, aucune technique supplémentaire d'accès au canal n'est nécessaire pour déployer l'architecture DWPT en communication multi-utilisateur.

Les performances de ces deux modes de fonctionnement ont été présentées au cinquième chapitre. D'abord un choix de forme d'ondelette optimale en termes de taux d'erreur binaire

a été réalisé. Quatre formes ont été testées pour une communication MTO et OTM sur un canal à bruit blanc gaussien ; ‘Symlet’, ‘Daubechies’, ‘Coifflets’ et ‘Biorthogonale’. Pour les deux modes de fonctionnement, c’est l’ondelette ‘Symlet’ qui est la plus optimale, car elle représente le plus bas taux d’erreur binaire lors d’une transmission sur un canal à bruit blanc. Elle a été retenue lors de toutes les simulations suivantes. Pour un canal à évanouissement LOS et NLOS, notre architecture avec ces deux modes de fonctionnement a pu montrer sa robustesse face aux phénomènes des multi-trajets. Ceci est dû en premier lieu à l’orthogonalité des formes d’onde transmises ce qui les renforce contre les phénomènes des interférences. La détection des signaux émis se fait sans erreur ou à très faible taux d’erreur binaire au-delà d’un SNR de 20dB. En présence du bruit industriel, une dégradation des performances de l’architecture est notée. Néanmoins, la détection se fait à très faible erreur à partir de 35dB. Ces résultats sont satisfaisants car ils démontrent un fonctionnement robuste de notre architecture multi-utilisateurs même dans un environnement industriel complexe et fortement bruité. D’autres systèmes de communication à base de modulations multi-porteuses peinent à fonctionner dans un tel environnement.

En guise d’amélioration de la robustesse de l’architecture impulsionnelle, deux techniques ont été utilisées. Un codage correcteur d’erreur du canal à base des codes convolutif a été inséré à l’émission avant le bloc IDWPT. Le codage a été réalisé pour trois différentes valeurs de rendement de code ($1/2$, $1/3$ et $1/4$). Le taux de $1/4$ est celui qui a présenté les meilleurs gains en dB pour une transmission sur un canal à évanouissements pour les deux modes de fonctionnement. Pour le mode MTO, la réception se fait complètement sans erreur à partir d’un SNR de 8dB. Sans codage correcteur, la détection se fait à faible erreur au-delà de 16 à 18dB. De là le gain en robustesse rapporté par le codage correcteur dépasse 10dB en mode MTO. Pour le mode OTM, les erreurs de propagation sont complètement éliminées à partir d’un SNR de 6dB pour un codage correcteur à un taux de $1/4$. Le gain apporté par le codage du canal se situe aussi autour de 10dB pour ce mode de fonctionnement.

Pour minimiser les effets du bruit impulsionnel à la réception, un seuillage de celui-ci est effectué dès réception des signaux. Il consiste à détecter les impulsions à fortes amplitudes, de les réduire à un bruit gaussien ou à les éliminer complètement. Avec cette technique simple, un gain de 11dB est réalisé pour le mode MTO sur un canal industriel et un gain dépassant 6dB pour le mode OTM. Ceci montre bien la robustesse et l’adaptabilité de notre architecture pour une communication sans fil dans un milieu industriel.

A la fin du cinquième chapitre, une comparaison avec un système à base de modulation multi-porteuses OFDM a été réalisée pour valider notre architecture. Le choix de ce système se base sur le concept architectural global qui ressemble à notre architecture impulsionnelle. Bien que la robustesse d’un système à OFDM soit prouvée pour une transmission sur des canaux à évanouissements, la comparaison avec notre architecture a montré bel et bien sa robustesse et ses performances comparée au système OFDM. Plus encore, quand le bruit industriel est pris en compte, la robustesse de notre architecture dépasse celle du système OFDM pour différentes modulations numériques. Ce qui prouve que notre architecture impulsionnelle avec ses deux modes de fonctionnement est parfaitement adaptée à être utilisée dans un environnement industriel fortement bruité.

Ces résultats obtenus, ambitionnent pour faire d’autres études d’amélioration. En perspective de ces travaux, il est intéressant dans un premier temps de faire une étude sur les codes correcteurs d’erreur optimaux adaptés aux réseaux de capteurs sans fil qui portera sur la complexité versus la consommation d’énergie. Eventuellement une adaptation des codes LDPC à faible complexités pourrait rapporter plus de gain en termes de taux d’erreur binaire à notre architecture.

Une extension de notre architecture pour un mode de fonctionnement Many-To-Many pour lequel plusieurs capteurs interagissent au même moment avec d'autres capteurs peut apporter de la diversité spatiale à notre architecture. Surtout que les réseaux de capteurs sans fil sont contraints à fonctionner avec une énergie optimale. D'où l'intérêt de la diversité spatiale permettant de récupérer l'information sur au moins un capteur dans le cas où un autre capteur est en ressources limités en termes d'énergie. Ceci permettra la continuité de l'échange d'information entre les différents équipements.

Un autre volet d'étude est envisageable concernant la modélisation complète du canal industriel. Ce modèle doit illustrer les différents phénomènes de propagation tels les évanouissements, interférences et les variations temporelles dues à la mobilité. Ceci pourrait se faire en faisant des mesures réelles en utilisant une plateforme de test. Cette plateforme modélisera au mieux un environnement industriel et comportera plusieurs capteurs qui opèrent à différentes fréquences et portées selon les applications et les technologies que nous souhaitons tester.

Publications

REVUES

- S. Saadaoui, M. Tabaa, F. Monteiro, M. Chehaitly, A. Dandache, 'Discrete Wavelet Packet Transform based Industrial Digital Wireless Communication Systems', *Information*, 2019, vol. 10, no 3, p. 104. Available at <https://www.mdpi.com/2078-2489/10/3/104/htm>
- M. Chehaitly, M. Tabaa, F. Monteiro, S. Saadaoui, A. Dandache, 'High Throughput configurable architecture based on IDWPT/DWPT for Impulse Radio Wireless Communications', Accepted in *AIP-CP Journal* (Proceeding available in April 2019).
- M. Tabaa, S. Saadaoui, M. Chehaitly, A. Dandache, 'NLOS Identification for UWB Body communications', *International Journal of Computer Applications*, vol. 124, 2015.

CONFÉRENCES

- Aamre Khalil, Safa Saadaoui, Mohamed Tabaa, 'Performances of Convolutional and Reed-Solomon codes for IWSN applications', accepted as a full paper to The 16th International MobiSPC 2019.
- Mohamed Tabaa, Brahim Chouri, Safa Saadaoui, et al. 'Industrial Communication based on Modbus and Node-RED', *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 130, no C, p. 583-588.
- Safa Saadaoui, Mohamed Tabaa, Fabrice Monteiro, Mouhamad Chehaitly, Abbas Dandache and Karim Alami, 'Industrial WSN Based on Discrete Wavelet Packet Transform for Smart Factory Wireless Communications' (May 15, 2018). *Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18)*. Available at SSRN : <https://ssrn.com/abstract=3179221>.
- Saadaoui, S., Tabaa, M., Monteiro, F., and Dandache, A. 'IWSN Based on DWPT Using an Industrial Noisy Channel for Industry 4.0 Wireless Applications'. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Software Engineering and Information Management* (pp. 113-117). (2018, January) ACM
- Saadaoui, S., Tabaa, M., Monteiro, F., Chehaitly, M., Dandache, A., and Oukaira, A. 'IWSN under an industrial wireless channel in the context of Industry 4.0'. In *Microelectronics (ICM), 2017 29th International Conference on*(pp. 1-4). (2017, December). IEEE.
- S. Saadaoui, M. Tabaa, F. Monteiro, A. Dandache, 'A novel WSN Architecture based on UWBIR and DWPT'. *Journée doctorale des sciences de l'ingénieur 3ème édition, Casablanca, 10 Décembre 2016*
- S. Saadaoui, M. Chehaitly, M. Tabaa, F. Monteiro, A. Dandache, 'Vers une nouvelle approche des communications impulsives ULB basée sur la transformée par paquet d'ondelette', 5th Edition *On Innovation and News Trends in Information Systems INTIS*, Juillet 2016.
- S. Saadaoui, M. Chehaitly, M. Tabaa, F. Monteiro, A. Dandache, K. Alami, 'A new WSN Transceiver based on DWPT for WBAN applications', *IEEE International conference on Microelectronics ICM2015, Casablanca 20-23, Morocco*

Bibliographie

- [1] Magasine Schneider Electric de l'enseignement technologique er professionnel : Les bus et les réseaux de terrain en automatisme industriel Schneider Electric, Nov 2002
- [2] Sauter, T. (2010). The three generations of field-level networks—Evolution and compatibility issues. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(11), 3585-3595..
- [3] Rapport technique de Phoenix 'Industrial Wireless : industrial wireless Communication sans fil du capteur jusqu'au réseau', Phoenix Contact inspiring innovation, 2012.
- [4] M.Andersson, 'Wireless Technologies for Industrial applications', ConnectBlue Février 2013.
- [5] JP.Hauet, 'Aperçu sur les nouvelles communications sans fil et leurs applications dans l'industrie', Nov 2004.
- [6] Sesia, S. and Baker, M. and Toufik, I., 'LTE - The UMTS Long Term Evolution : From Theory to Practice'. Wiley, 2011, pp. 421–456.
- [7] F.Hu, Q.Hao (edited by), 'Intelligent Sensor Network : The Integration of Sensor Networks Signal Processing and Machine Learning', Taylor and Francis group, ISBN : 978-1-4398-9282-4, 2013.
- [8] Semiannual technical summary report of the defense advanced research projects agency, 'Distributed sensor networks', Massachusetts institute of technology Lincoln laboratory, issued 14 May 1987.
- [9] P.Corke, T.Wark, R.Jurdak, W.Hu, P.Valencia, D.Moore, 'Environmental Wireless Sensor Networks', vol. 98, No. 11, November 2010, proceeding of the IEE invited paper.
- [10] M.R.Yuce, 'Implementation of wireless body area networks for healthcare systems', sensors and actuators A 162 pp : 116-129, ELSEVIER 2010.
- [11] J.A.Gutiérrez, D.B.Durocher, B.Lu, R.G.Harley, T.G.Habelter, 'pplying Wireless Sensor Networks in industrial Plant Energy Evaluation and Planning Systems', IEEE IAS pulp and paper industry conference in appeleton, 1-4244-0281-6, 2005
- [12] Abdelfatah, F. (2008). 'Développement d'une bibliothèque de capteurs'. projet de Master Université de Montpellier 2
- [13] Wollschlaeger, M., Sauter, T., and Jasperneite, J. (2017). 'The future of industrial communication : Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0'. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), 17-27.
- [14] Bernd Michael Dorge and Thomas Scheffler. 'Using ipv6 and 6lowpan for home automation networks'. In *Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin)*, 2011 IEEE International Conference on, pages 44–47. IEEE, 2011

- [15] Sasajima, Hisashi, Toru Ishikuma, and Hisanori Hayashi. 'Future IIOT in process automation—Latest trends of standardization in industrial automation, IEC/TC65.' Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2015 54th Annual Conference of the. IEEE, 2015.
- [16] Communication Promoters Group of the Industry-Science Research Alliance, 'Final report of the Industrie 4.0', April, 2013
- [17] Zuniga, Juan Carlos, and Benoit Ponsard. 'Sigfox system description.' LPWAN@ IETF97, Nov. 14th (2016).
- [18] Vangelista, L., Zanella, A., and Zorzi, M. (2015, September). 'Long-range IoT technologies : The dawn of LoRa'. In Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures (pp. 51-58). Springer, Cham.
- [19] Sinha, R. S., Wei, Y., and Hwang, S. H. (2017). 'A survey on LPWA technology : LoRa and NB-IoT'. *Ict Express*, 3(1), 14-21.
- [20] Lauridsen, Mads, et al. 'From LTE to 5G for connected mobility.' *IEEE Communications Magazine* 55.3 (2017) : 156-162.
- [21] J. B. Keller. 'Geometrical Theory of Diffraction'. *J. Opt. Soc. Am*, 52(2) : 116-130, 1962. Cite en page 22.
- [22] M. Paetzold. 'Mobile Fading Channels'. Wiley, 2002.
- [23] H. Hijazi, thèse : 'Estimation de canal radio-mobile à évolution rapide dans les systèmes à modulation OFDM', 2008.
- [24] Rappaport, T. S. (1996). 'Wireless communications : principles and practice' (Vol. 2). New Jersey : prentice hall PTR. T.
- [25] J. D. Parsons. 'The Mobile Radio Propagation Channel'. John Wiley, 2000
- [26] S. R. Saunders, A. Aragon, 'Antennas and Propagation for Wireless communication Systems'. Wiley and Sons, 2. a. ed., May 2007.
- [27] J. Coll, 'Industrial environment characterization for future M2M applications, Electromagnetic Compatibility (EMC)', 2011 IEEE International Symposium.
- [28] S. Y. Wang, P.F. Wang, Y. W. Li, and L.C. Lau, 'Design and Implementation of a more Realistic Radio Propagation Model for Wireless Vehicular Networks over the NC-TUns Network Simulator', IEEE WCNC (Wireless Communications and Networking Conference), March 28 - 31, 2011, Cancun, Mexico.
- [29] P. Mariage, M. Liénard, P. Degauque, 'Theoretical and Experimental Approach of the Propagation of High Frequency Waves in Road Tunnels', *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.42, no.1, pp.75,81, Jan 1994.
- [30] S. Rappaport, 'Indoor radio communication for factories of the future', *IEEE communication magazine*. May 1989.
- [31] Kjesbu, Snorre, and Torkil Brunsvik. 'Radiowave propagation in industrial environments' Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE. Vol. 4. IEEE, 2000.
- [32] Tanghe, Emmeric, et al. 'The industrial indoor channel : large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 MHz', *IEEE Transactions on Wireless Communications* 7.7 (2008).

-
- [33] S.Rappaport, 'Statistical channel impulse response models for factory and open plan building radio communication system design', IEEE transactions on communications, VOL. 39, NO 5, May 1991.
- [34] 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.
- [35] J.Karedal, 'A measurement-based statistical model for industrial ultra-wideband channels', IEEE transaction on wireless communications, VOL.6, NO.8, August 2007.
- [36] Wireless Communication for industrial Applications. Cirronet,Inc. Summer 2002.
- [37] C. Holloway, M. Cotton, and P. McKenna, 'A model for predicting the power delay profile characteristics inside a room', IEEE Trans. on Vehicular Technolog, vol. 48, no. 4, pp. 1110–1120, Jul. 1999.
- [38] Cheffena, Michael. 'Industrial indoor multipath propagation—A physical-statistical approach', Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on. IEEE, 2014.
- [39] Cheffena, Michael. 'Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks [wireless corner]', IEEE Antennas and Propagation Magazine 58.1 (2016) : 66-73.
- [40] E.Tanghe, 'The industrial indoor channel : Statistical analysis of the power delay profile', International journal of electronics and communication AEU, June 2009.
- [41] Coll, Javier Ferrer. 'Rf channel characterization in industrial, hospital and home environments', Licentiate thesis, February 78 (2012).
- [42] H.Sheikh, 'On the design of a wireless network in an industrial environment',IEEE Communication Systems (ICCS), 2010.
- [43] K.S. YEE, ' Numerical solution of initial boundary value problems insolving maxwell's equations in isotropic media', IEEE Antennas and Propagation, AP-14 :302.307, 1966.
- [44] Chartois, Yannick. 'Étude paramétrique avancée de canaux SISO et MIMO en environnements complexes : Application au système HiperLAN/2', Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne-ENSTB ; Université Rennes 1, 2005.
- [45] Ling, H., R.-C. Chou, and S.-W. Lee (1989, February). 'Shooting and bouncing rays : calculating the rcs of an arbitrarily shaped cavity'. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on 37 (2), 194 –205.
- [46] T.Huschka, 'Ray tracing models for indoor environments and their computational complexity'. In Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1994. Wireless Networks - Catching the Mobile Future. 5th IEEE International Symposium on, pp. 486–490 vol.2, September 1994.
- [47] Y.Karasawa, K.Minamisoto, and T.Matsudo, 'Propagation channel model for personal mobile satellite systems', PIERS'94 Conference, 1994.
- [48] E. Lutz, D. Cygan, M. Dippold, F. Dolainsky, and W. Papke, 'The land mobile satellite communication channel-recording', statistics, and channel model, IEEE Trans. Veh. Technol. vol. 40, no. 2, pp. 375–386, May 1991.
- [49] Anthony ABELE, 'Modelisation du canal de propagation par satellite dans les bandes L, S et C', Ph.D. thesis, École doctorale Mathématiques Informatique et Télécommunications de Toulouse, 2009.

- [50] Li, Xiang, 'Un modèle hybride statistique-déterministe du canal LMS en environnements complexes'. Diss. Poitiers, 2010.
- [51] Essamlali, Kaoutar El Hariri, et al. 'Modélisation hybride du canal radio dans un contexte industriel', 18ièmes Journées Nationales Microondes. 2013.
- [52] Myers, H. A. 'Industrial equipment spectrum signatures', IEEE Transactions on Radio Frequency Interference 5.1 (1963) : 30-42
- [53] S. Zabin and H. Poor, 'Parameter estimation for Middleton class A interference processes', IEEE Trans. on Communications, vol. 37, no. 10, pp. 1042–1051, Oct. 1989.
- [54] Shan, Qingshan, et al. 'Characteristics of impulsive noise in electricity substations', Signal Processing Conference, 2009 17th European. IEEE, 2009.
- [55] Bhatti, Shahzad Ahmed, et al. 'Vulnerability of Zigbee to impulsive noise in electricity substations', General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI. IEEE, 2011.
- [56] Tsihrintzis, G. et C. Nikias. 'Fast estimation of the parameters of alpha-stable impulsive interference', IEEE Transactions on Signal Processing 1996, vol. 44, no. 6, p. 1492-1503.
- [57] Kim, Y. et G. Zhou. 'Representation of the Middleton class B model by symmetric alpha-stable processes and chi-distributions', In Fourth International Conference on Signal Processing Proceedings, 1998. ICSP'98. 1998. p. 180–183. IEEE.
- [58] Saaifan, Khodr A., and Werner Henkel. 'Decision boundary evaluation of optimum and suboptimum detectors in class-A interference', IEEE Transactions on Communications 61.1 (2013) : 197-205.
- [59] Park, Seung Keun, and al. 'Method and apparatus for impulsive noise mitigation using adaptive blanker based on BPSK modulation system', U.S. Patent No. 9,118,370. 25 Aug. 2015.
- [60] Tarik S. Shehata, I. M. et M. Al-tanany. 'Suboptimal detectors for alpha stable noise : Simplifying design and improving performances', IEEE Transactions on Communications, 2012, vol. 60, no. 10, p. 2982-2989.
- [61] Zhidkov, Sergey V. 'Impulsive noise suppression in OFDM-based communication systems', IEEE Transactions on Consumer Electronics 49.4 (2003) : 944-948.
- [62] Hu, Xiaoyu, Zhe Chen, and Fuliang Yin. 'Impulsive noise cancellation for MIMO power line communications', Journal of Communications 9.3 (2014) : 241-247.
- [63] Oh, Hyungkook, Haewoon Nam, and Seungkeun Park. 'Adaptive threshold blanker in an impulsive noise environment', IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 56.5 (2014) : 1045-1052.
- [64] Hakimi, Saeed, and Ghosheh Abed Hodtani. 'Generalized maximum correntropy detector for non-Gaussian environments', International Journal of Adaptive Control and Signal Processing 32.1 (2018) : 83-97.
- [65] Wong, K. Daniel. 'Physical layer considerations for wireless sensor networks', IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2004. Vol. 2. IEEE, 2004.
- [66] Yick, Jennifer, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. 'Wireless sensor network survey' Computer networks 52.12 (2008) : 2292-2330.

-
- [67] M.Ghavami, L.B. Michael, S.Haruyama, R.Kohno, 'A novel UWB pulse shape modulation system', *wireless personal communications* 23 : pp 105-120, springer 2002.
- [68] G.Mastroianni, G.V Milovanovic, 'Orthogonal polynomials and weighted polynomial approximation'. *Interpolation processes Springer Monographs in Mathematics* 2008, pp 75-192.
- [69] Gautier, Matthieu. 'Algorithmes et architectures de récepteurs pour les systèmes multi-porteuses par paquets d'ondelettes' Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2006.
- [70] Ciolino, Stéphane, Mohammad Ghavami, and Hamid Aghvami. 'Wavelet-based ultra wideband pulse generator circuits', *IET communications* 2.5 (2008) : 642-649.
- [71] Lakshmanan, Madan Kumar, and Homayoun Nikookar. 'A review of wavelets for digital wireless communication', *Wireless personal communications* 37.3-4 (2006) : 387-420.
- [72] Lakshmanan, Madan Kumar, and Homayoun Nikookar. 'Construction of optimum wavelet packets for multi-carrier based spectrum pooling systems', *Wireless personal communications* 54.1 (2010) : 95-121.
- [73] Tabaa, Mohamed. 'A novel transceiver architecture based on wavelet packet modulation for UWB-IR WSN applications', *Wireless Sensor Network* 8.09 (2016) : 191.
- [74] Gao, Robert X., and Ruqiang Yan. 'Wavelets : Theory and applications for manufacturing', Springer Science and Business Media, 2010.
- [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] Karl H. and Willig A. 'Protocols and architectures for wireless sensor networks'. John Wiley and Sons, Ltd, 2005.
- [77] I.Rhee, A.Warrier, J.Min, L.X.Drand, 'distributed Randomized TDMA scheduling for wireless ad-hoc networks' , *MobiHoc conference*, May 22-25, Florence Italy, 2006.
- [78] S.Mukherejee, G.P.Biswas, 'Design of hybrid MAC protocol for wireless sensor network, Recent advances in information technology', *Advances in intelligent systems and computing* 266, 10.1007/978-81-322-1856-2, springer india 2014
- [79] S.De, C.Qiao, A.Pados, M.Chatterjee, S.J.Philip, 'An integrated cross-layer study of wireless CDMA sensor networks', *IEEE journal on selected areas in communications*, vol.22.No.7, September 2004.
- [80] Decotignie, J-D. 'Ethernet-based real-time and industrial communications', *Proceedings of the IEEE* 93.6 (2005) : 1102-1117.
- [81] Hou, Wei-yan, Wei-chun Liu, and Min-rui Fei. "A token-based MAC oriented wireless industrial control networks." *2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*. IEEE, 2006.
- [82] S. Saadaoui, M. Tabaa, F. Monteiro, A. Dandache, K. Alami. 'A new WSN Transceiver based on DWPT for WBAN applications', *International conference on Microelectronics ICM2015*, Casablanca 20-23, Morocco
- [83] S. Saadaoui, M. Tabaa, F. Monteiro, M. Chehaitly, A. Dandache. 'Industrial WSN Based on Discrete Wavelet Packet Transform for Smart Factory Wireless Communications' (May 15, 2018). *Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18)*. Available at SSRN : <https://ssrn.com/abstract=3179221>

- [84] S. Saadaoui, M. Tabaa, F. Monteiro, A. Dandache, 'IWSN Based on DWPT Using an Industrial Noisy Channel for Industry 4.0 Wireless Applications', In Proceedings of the 2018 International Conference on Software Engineering and Information Management (pp. 113-117). ACM
- [85] Dessales, Denis. 'Conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation' Diss. Poitiers, 2011.
- [86] Salah, Moataz M., and Ashraf A. Elrahman. 'Energy efficiency based concatenated LDPC and turbo codes for wireless sensor networks', Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015.
- [87] L. Liang, 'Energy-efficient design and implementation of turbo codes for wireless sensor network' Diss. University of Southampton, 2012.
- [88] D. Schmidt, M. Berning, and N. Wehn. 'Error Correction in Single-Hop Wireless Sensor Networks : A Case Study', In Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test, pages 1296–1301, 2009.
- [89] A. Viterbi. 'Error Bounds for Convolutional Codes and an Asymptotically Optimum Decoding Algorithm', IEEE Transactions on Information Theory, 13(2) :260–269, 1967.
- [90] Nee, Richard van, and Ramjee Prasad. 'OFDM for wireless multimedia communications', Artech House, Inc., 2000.

Résumé

Dans cette thèse, nous présenterons une architecture de communication multi-utilisateurs à base des réseaux de capteurs sans fil dans un environnement industriel fortement bruité. Deux modes de fonctionnement de cette architecture sont présentés ; un mode Many-To-One reliant plusieurs capteurs émetteurs à un seul récepteur et un mode One-To-Many reliant un émetteur à plusieurs capteurs récepteurs. La couche physique de ce système est basée sur une modulation par transformée par paquets d'ondelettes inverse (IDWPT) à l'émission et une transformée par paquets d'ondelette discrète (DWPT) en réception. Pour tester notre architecture, un modèle de canal industriel est proposé qui tient compte des phénomènes des multi-trajets et des évanouissements en plus du bruit additif. Ce dernier étant modélisé comme un bruit gaussien auquel s'ajoute un bruit impulsionnel causant une dégradation significative des signaux. L'architecture est testée pour différentes configurations de communications sans fil et pour différentes formes d'ondelettes afin de proposer un mode de communication optimal. Aussi, une amélioration de la robustesse de notre système est effectuée en ajoutant un codage correcteur d'erreur du canal et un seuillage du bruit impulsionnel à la réception pour minimiser les effets du bruit industriel sur les signaux reçus. En utilisant un code correcteur d'erreur, la détection et reconstitution des signaux se fait sans erreur à partir d'un SNR de 8dB pour un taux de codage 1/4 pour une transmission sur un canal à évanouissement. Pour un récepteur optimal à base du seuillage du bruit, les performances en termes de taux d'erreur binaires sont améliorées de 10dB pour une transmission sur un canal à bruit industriel. Enfin, une comparaison de la robustesse de notre architecture impulsionnelle avec un système à base d'une modulation multi-porteuse classique OFDM est effectuée. Ceci nous amène à proposer un système de communication multi-utilisateurs robuste à base des réseaux de capteurs sans fil pour des communications en milieu industriel difficile.

Mots-clés: Réseau de capteurs sans fils industriel, transformée par paquet d'ondelette discrete, canal industriel, Many-to-one, One-to-Many.

Abstract

In this thesis, we will present a multi-user communication architecture based on wireless sensor networks in a noisy industrial environment. Two modes of operation of this architecture are presented ; a Many-To-One mode linking several transmitter sensors to a single receiver and a One-To-Many mode linking a transmitter to several receiver sensors. The physical layer of this system is based on the inverse transform (IDWPT) at transmission and the discrete wavelet packet transform (DWPT) at reception. To test our architecture, an industrial channel model is proposed that takes into account the phenomena of multipath and fading in addition to additive noise. The latter being modelled as Gaussian noise to which is added an impulse noise causing significant signal degradation. The architecture is tested for different wireless communication configurations and wavelet shapes to provide an optimal communication mode. Also, an improvement in the robustness of our system is achieved by adding channel error correction coding and pulse noise thresholding at reception to minimize the effects of industrial noise on the received signals. Using an error-correcting code, the detection and reconstruction of signals is error-free from an SNR of 8dB for a coding rate of 1/4 for transmission on a fading channel. For

an optimal receiver based on noise thresholding, the performance in terms of binary error rates is improved by 10dB for transmission over an industrial noise channel. Finally, a comparison of the robustness of our pulse architecture with a system based on a conventional OFDM multi-carrier modulation is carried out. This leads us to propose a robust multi-user communication system based on wireless sensor networks for communications in difficult industrial environments.

Keywords: Industrial wireless sensor network, Discrete wavelet packet transform, industrial channel, Many-to-one, One-to-Many